



การกำจัดการอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วย  
กระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน

โดย

นายกฤษดา ทองนาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การกำจัดการอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วย  
กระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน

โดย

นายกฤษดา ทองนาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

REMOVAL OF NATURAL ORGANIC MATTER AS TRIHALOMETHANE PRECURSOR  
IN WATER SUPPLY SYSTEM BY CHEMICAL COAGULATION AND FLOCCULATION  
: CASE STUDIES OF MAKLONG RIVER AND THACHIN RIVER

By  
Kritsada Thongnak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree  
MASTER OF SCIENCE  
Department of Environmental Science  
Graduate School  
SILPAKORN UNIVERSITY  
2010

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง "การกำจัดการอินทรีย์  
ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและ  
รวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน" เสนอโดย นายกฤษฎดา ทองนาค เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาอะโป

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิรา สรรณิ)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภางค์ จุฬาลักษณ์นกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาอะโป)

...../...../.....

49311308: สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : สารอินทรีย์ธรรมชาติ/สารไตรฮาโลมีเทน/กระบวนการสร้างและรวมตะกอน/ระบบผลิตน้ำประปา

นายกฤษฎา ทองนาค: การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์: รศ. ดร. มัลลิกา ปัญญาอะโป. 110 หน้า.

กระบวนการผลิตน้ำประปาสามารถบำบัดความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำได้เพียงบางส่วนเท่านั้น สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคและก่อให้เกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ สารส้ม ( $\text{Alum}$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) เฟอริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) และใช้ Anion polymer เป็นสารรวมตะกอน โดยใช้ตัวอย่างน้ำจากจุดสูบน้ำเข้าโรงงานประปาจากแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน pH ตั้งต้น รวมถึงชนิดและความเข้มข้นของโพลิเมอร์ พารามิเตอร์บ่งชี้ประสิทธิภาพการบำบัดคือ ความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบจากแม่น้ำท่าจีนพบว่ามีความขุ่นและสารอินทรีย์สูงกว่าแม่น้ำแม่กลอง ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ โดยสารสร้างตะกอนและสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้จริงในระบบประปาของน้ำจากแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน คือ Alum 40.0 mg/L Anion polymer 0.2 mg/L ที่ pH ตั้งต้น 7.0 และ Alum 60.0 mg/L Anion polymer 0.1 mg/L ที่ pH ตั้งต้น 6.0 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดจากการทดลองและน้ำจากระบบประปาในปัจจุบัน พบว่าทั้งการทดลองและระบบประปามีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงกัน โดยร้อยละของการบำบัดความขุ่นสูงกว่า 90 ส่วนประสิทธิภาพในการบำบัด TOC DOC UV-254 และ THMFP ของระบบประปา คือ 4.05 10.81 7.03 และ 0.05 ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองของแม่น้ำแม่กลองสามารถบำบัดได้ร้อยละ 49.56-56.36 38.03-49.15 36.61-44.36 และ 46.31-49.05 ตามลำดับ ส่วนแม่น้ำท่าจีนสามารถบำบัดได้ร้อยละ 34.46-39.48 32.15-49.31 35.38-47.26 และ 38.80-59.28 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าแม่น้ำท่าจีนมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าแม่น้ำแม่กลอง เนื่องจากแม่น้ำท่าจีนมีค่าความขุ่นและสารอินทรีย์ในน้ำดิบสูงกว่าแม่น้ำแม่กลอง นอกจากนี้ยังพบว่า THMFP ของน้ำที่บำบัดด้วยสภาวะที่ทำการทดลองมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น THMs ในมาตรฐาน ของ WHO และ US-EPA กำหนด จึงสรุปได้ว่าสภาวะการบำบัดตามการทดลองนี้สามารถบำบัดน้ำให้ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคในแง่ของการเกิดสาร THMs

49311308 : MAJOR: ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORDS: NATURAL ORGNIC MATTER/TRIHALOMETHANE/COAGULATION AND FLOCCULATION PROCESSES/WATER TREATMENT

KRITSADA THONGNAK: REMOVAL OF NATURAL ORGANIC MATTER AS TRIHALOMETHANE PRECURSOR IN WATER SUPPLY SYSTEM BY CHEMICAL COAGULATION AND FLOCCULATION: CASE STUDIES OF MAKLONG RIVER AND THACHIN RIVER THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. MALLIKA PANYAKAPO, D.TECH.SC. 110 PP.

In the productionof water supply, turbidity was efficiently removed by water treatment system while removal efficiency of dissolved organic matter was very low. Consequently, dissolved organic matter remained in water can react with added chlorine to form trihalomethanes which was a human carcinogenic substance. So the objective of this research was to investigate the optimum conditions of natural organic matter (NOM) removal by chemical coagulation and flocculation processes. Water samples were collected from raw water intake at water treatment plants located at MaKlong and ThaChin Rivers. The factors including types and dosages of coagulants (Alum, PACl and  $\text{FeCl}_3$ ), initial pH and flocculant dosages (Anion polymer) were assessed. The indicators of treatment efficiency were turbidity as well as NOM in terms of TOC, DOC, UV-254 and THMFP.

The results showed that turbidity and NOM in the water collected at ThaChin river was higher than those in MaKlong river. Coagulation and flocculation process resulted in a higher removal efficiency of turbidity in comparison to NOM. As considering the chemical cost and applicability in real water treatment system, the optimum conditions for MaKlong and ThaChin river water were the integration between alum dosage 40.0 mg/L at initial pH 7.0 and anion polymer dosage 0.2 mg/L and alum dosage 60.0 mg/L at initial pH 6.0 and anion polymer dosage 0.1 mg/L, respectively.

As comparing the treatment efficiencies of the experiments and the water treatment system, turbidity was effectively removed by the water treatment system and all of the experiments. The percentages of turbidity removal were higher than 90 whereas the removal efficiencies of NOM resulted from the experiments were much higher than those of the water treatment system. The removal percentages of TOC, DOC and UV-254 and THMFP of the water treatment system were 4.05 10.81 7.03 and 0.05, respectively, while those of MaKlong river experiments were in the ranges of 49.56-56.36 38.03-49.15 36.61-44.36 and 46.31-49.05, respectively, and those of ThaChin river experiments were 34.46-39.48 32.15-49.31 35.38-47.26 and 38.80-59.28, respectively. Moreover, THMFP in water, treated by these experimental conditions, was lower than THMs concentration in WHO and US-EPA standards.

---

Department of Environmental Science   Graduate School, Silpakorn University   Academic Year 2010  
Student's signature.....  
Thesis Advisor's signature.....

### กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.มัลลิกา ปัญญาะโป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความเมตตา กรุณา และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นคำแนะนำในการทำการทดลอง เป็นที่ปรึกษาและคอยช่วยเหลือในการเขียนรูปเล่ม เพื่อให้การแก้ไขงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง นอกจากนี้ในการเขียนวิทยานิพนธ์ยังได้รับคำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทธีรา สรรพณี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาวศ์ จุฬาลักษณ์านุกูล ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณผู้บริหารบริษัทยูนิเวอร์แซล ยูทิลิตี้ส์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องทุนทรัพย์ในการศึกษาและทำวิจัยนี้ จึงทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจจึงทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ซึ่งให้คำแนะนำต่าง ๆ มากมายและความช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณนางสาวนันท์ภัสร์ สิงห์คำ ที่คอยช่วยเหลือจึงทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ทุก ๆ คนที่คอยช่วยเหลือจึงทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

## สารบัญ

|                                                               | หน้า |
|---------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                          | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                       | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                          | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....                                              | ญ    |
| สารบัญภาพ.....                                                | ฎ    |
| บทที่                                                         |      |
| 1    บทนำ.....                                                | 1    |
| 2    บทตรวจเอกสาร.....                                        | 3    |
| กระบวนการผลิตน้ำประปา.....                                    | 3    |
| การฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน.....                               | 4    |
| สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน.....                     | 7    |
| กระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....                                | 15   |
| คุณภาพน้ำและการใช้ที่ดินริมฝั่งแม่น้ำในกรณีตัวอย่าง.....      | 22   |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ..... | 24   |
| 3    การทดลอง.....                                            | 27   |
| เครื่องมือและวัสดุ.....                                       | 27   |
| เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์.....                                | 27   |
| สารเคมี.....                                                  | 27   |
| ระเบียบวิธีวิจัย.....                                         | 28   |
| จุดเก็บตัวอย่างและวิธีเก็บตัวอย่าง.....                       | 28   |
| พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์.....                           | 29   |
| วิธีการรักษาตัวอย่าง.....                                     | 29   |
| วิธีการวิเคราะห์.....                                         | 29   |
| วิธีการวิจัย.....                                             | 33   |
| วิธีการทดลอง.....                                             | 33   |
| วิธีการทำการทดลองด้วย Jar test.....                           | 33   |
| สภาวะการทดลองด้วย Jar Tester.....                             | 36   |

| บทที่                                                                     | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------|------|
| 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....                                               | 38   |
| สมบัติของน้ำดิบ.....                                                      | 38   |
| แม่น้ำแม่กลอง.....                                                        | 38   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต<br>(Aluminium sulfate, Alum)..... | 38   |
| ผลของปริมาณ Alum.....                                                     | 38   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                     | 40   |
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                            | 42   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....                  | 43   |
| ผลของปริมาณ PACl.....                                                     | 43   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                     | 45   |
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                            | 47   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ).....           | 48   |
| ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$ .....                                         | 48   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                     | 51   |
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                            | 51   |
| สภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการสร้างและรวมตะกอน.....                   | 53   |
| สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum.....                        | 53   |
| สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl.....                        | 53   |
| สภาวะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย $\text{FeCl}_3$ .....            | 53   |
| การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอน<br>Alum PACl และ $\text{FeCl}_3$ .....  | 53   |
| ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP.....                           | 56   |
| แม่น้ำท่าจีน.....                                                         | 57   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต<br>(Aluminium sulfate, Alum)..... | 57   |
| ผลของปริมาณ Alum.....                                                     | 57   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                     | 58   |

| บทที่                                                                                                              | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                                                                     | 61   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl).....                                                            | 61   |
| ผลของปริมาณ PACl.....                                                                                              | 61   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                                                              | 63   |
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                                                                     | 64   |
| การสร้างและรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> ).....                                                   | 66   |
| ผลของปริมาณ FeCl <sub>3</sub> .....                                                                                | 66   |
| ผลของ pH ตั้งต้น.....                                                                                              | 66   |
| ผลของปริมาณ Anion polymer.....                                                                                     | 69   |
| สถานะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการสร้างและรวมตะกอน.....                                                            | 70   |
| สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum.....                                                                 | 70   |
| สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl.....                                                                 | 70   |
| สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย FeCl <sub>3</sub> .....                                                   | 71   |
| การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย<br>Alum PACl และ FeCl <sub>3</sub> .....                                     | 71   |
| ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP.....                                                                    | 73   |
| การเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำทั้ง 2 สาย.....                                                                   | 74   |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....                                                                                 | 76   |
| สรุปผลการทดลองของแม่น้ำแม่กลอง.....                                                                                | 76   |
| สรุปผลการทดลองของแม่น้ำท่าจีน.....                                                                                 | 77   |
| สรุปเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำทั้ง 2 สาย.....                                                                  | 78   |
| ข้อเสนอแนะ.....                                                                                                    | 79   |
| บรรณานุกรม.....                                                                                                    | 80   |
| ภาคผนวก.....                                                                                                       | 86   |
| ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....                                                                                          | 87   |
| ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน<br>(Trihalomethane formation potential, THMFP)..... | 105  |
| ประวัติผู้วิจัย.....                                                                                               | 110  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                  | หน้า |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | ผลของสารปนเปื้อนในน้ำต่อการเติมคลอรีน.....                                                       | 7    |
| 2        | ค่ามาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดที่หน่วยงานต่างๆกำหนดไว้.....                                         | 10   |
| 3        | ความเข้มข้นของสารประกอบ Chlorine by products ของประเทศต่างๆ.....                                 | 11   |
| 4        | การรักษาตัวอย่าง (Preservation).....                                                             | 30   |
| 5        | วิธีการรักษาตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ.....                                        | 32   |
| 6        | ภาวะการทดลองด้วย Jar test.....                                                                   | 37   |
| 7        | สมบัติของน้ำดิบ.....                                                                             | 38   |
| 8        | สภาวะการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในการบำบัด<br>สารอินทรีย์ของแม่น้ำแม่กลอง..... | 55   |
| 9        | ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดด้วยสภาวะที่ 1 2 และ 3 ของแม่น้ำแม่กลอง.....                      | 56   |
| 10       | สภาวะการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในการบำบัด<br>สารอินทรีย์ของแม่น้ำท่าจีน.....  | 73   |
| 11       | ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดด้วยสภาวะที่ 1 2 และ 3 ของแม่น้ำท่าจีน.....                       | 73   |
| 12       | การเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำท่าจีนและแม่น้ำแม่กลอง.....                                     | 75   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                                                 | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | การกระจายตัวของ HOCl และ OCl <sup>-</sup> ในน้ำที่มี pH ต่าง ๆ กัน.....                                         | 6    |
| 2      | สูตรโครงสร้างสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน.....                                                                          | 8    |
| 3      | ตัวอย่างโครงสร้างกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก.....                                                                     | 12   |
| 4      | ความสัมพันธ์ระหว่าง THMs and HAAs กับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา.....                                                | 13   |
| 5      | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ THMs แต่ละชนิด และ TTHM.....                                                  | 15   |
| 6      | โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACI และ Alum.....                                                                 | 17   |
| 7      | ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe (III) และ Al (III)<br>ในช่วงแต่ละช่วง pH ต่าง ๆ.....                      | 20   |
| 8      | จุดเก็บตัวอย่างน้ำแม่น้ำแม่กลอง บริเวณ หมู่ 1 ต.แพงพวย อ.ดำเนินสะดวก<br>จ.ราชบุรี.....                          | 28   |
| 9      | จุดเก็บตัวอย่างน้ำแม่น้ำท่าจีน บริเวณ ต.บางระกำ อ.บางเลน จ.นครปฐม.....                                          | 29   |
| 10     | สรุปขั้นตอนการทำ Jar test.....                                                                                  | 35   |
| 11     | เครื่อง Jar Tester.....                                                                                         | 36   |
| 12     | ผลของปริมาณ Alum ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                              | 39   |
| 13     | ผลของปริมาณ Alum ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                    | 39   |
| 14     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                      | 41   |
| 15     | ผลของ pH ตั้งต้น ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง.....          | 41   |
| 16     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง.....           | 42   |
| 17     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์<br>ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง..... | 43   |
| 18     | ผลของปริมาณ PACI ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                              | 44   |

| ภาพที่ |                                                                                                                  | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 19     | ผลของปริมาณ PACI ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                     | 44   |
| 20     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACI<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                       | 46   |
| 21     | ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย PACI ของแม่น้ำแม่กลอง.....            | 46   |
| 22     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย PACI ของแม่น้ำแม่กลอง.....            | 47   |
| 23     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์<br>ธรรมชาติด้วย PACI ของแม่น้ำแม่กลอง.....  | 48   |
| 24     | ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$ ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                    | 49   |
| 25     | ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$ ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....          | 49   |
| 26     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย $\text{FeCl}_3$<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....            | 50   |
| 27     | ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำแม่กลอง..... | 50   |
| 28     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำแม่กลอง..... | 52   |
| 29     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์<br>ธรรมชาติของแม่น้ำแม่กลอง.....            | 52   |
| 30     | การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum PACI และ $\text{FeCl}_3$<br>ของแม่น้ำแม่กลอง.....                     | 55   |
| 31     | ผลของปริมาณ Alum ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำท่าจีน.....                                | 57   |
| 32     | ผลของปริมาณ Alum ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ของแม่น้ำท่าจีน.....                      | 58   |

| ภาพที่ |                                                                                                              | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 33     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน.....                       | 59   |
| 34     | ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน.....            | 59   |
| 35     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน.....            | 60   |
| 36     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน.....  | 60   |
| 37     | ผลของปริมาณ PACl ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ของแม่น้ำท่าจีน.....                               | 62   |
| 38     | ผลของปริมาณ PACl ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ของแม่น้ำท่าจีน.....                     | 62   |
| 39     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน.....                       | 63   |
| 40     | ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน.....                | 64   |
| 41     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน.....            | 65   |
| 42     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน.....     | 65   |
| 43     | ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$ ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ของแม่น้ำท่าจีน.....                    | 66   |
| 44     | ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$ ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ของแม่น้ำท่าจีน.....             | 67   |
| 45     | ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำท่าจีน.....            | 68   |
| 46     | ผลของ pH ตั้งต้น ต่อร้อยละในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำท่าจีน..... | 68   |

| ภาพที่ |                                                                                                                        | หน้า |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 47     | ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำท่าจีน.....        | 69   |
| 48     | ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ<br>ด้วย $\text{FeCl}_3$ ของแม่น้ำท่าจีน..... | 70   |
| 49     | การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum, PACl และ $\text{FeCl}_3$<br>ของแม่น้ำท่าจีน.....                           | 72   |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันน้ำประปามีบทบาทในการดำรงชีวิตประจำวันของคนทั่วไปมากยิ่งขึ้น เนื่องจากผ่านกระบวนการบำบัดสารปนเปื้อนจากน้ำทำให้ได้น้ำที่ปลอดภัยที่จะใช้เพื่อการอุปโภค บริโภค และเพื่อลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคใน กระบวนการผลิตน้ำประปาจึงมีการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากคลอรีนเป็นสารเคมีที่ใช้ ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวกต่อการใช้ ราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย อย่างไรก็ตาม วิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนี้นักกลับก่อให้เกิดสารตกค้างต่าง ๆ ซึ่งบางกลุ่มจัดเป็นสารก่อมะเร็ง เช่น สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับ สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (Ottawa and Ontario, 2006)

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเกิดสารกลุ่ม THMs ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ธรรมชาติในน้ำ ปริมาณคลอรีน ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารอินทรีย์ ธรรมชาติในน้ำกับคลอรีน ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ อุณหภูมิของน้ำและปริมาณความเข้มข้น ของโบรไมด์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดสารประกอบกลุ่ม THMs (อนรรฆิยา, 2546)

การป้องกันการเกิดสารกลุ่ม THMs สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเปลี่ยน แหล่งน้ำที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณน้อย การเลือกสารเคมีในการฆ่าเชื้อโรคชนิดอื่น เช่น การใช้ โอโซนหรือแสงอัลตราไวโอเลต (UV) ในการฆ่าเชื้อโรคแทนคลอรีน แต่อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อ โรคด้วยคลอรีนก็ยังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางอันเนื่องมาจากคลอรีนสามารถฆ่าแบคทีเรียหรือ แม้กระทั่งไวรัสในน้ำ รวมถึงยังง่ายต่อการควบคุมดูแลในการจัดการ ดังนั้นการจัดการที่ต้นเหตุ คือการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำจึงง่ายกว่าการเปลี่ยนแปลงระบบสารเคมีใหม่ การกำจัด หรือลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำนั้นสามารถทำได้ด้วยกระบวนการสร้างตะกอน (Coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ด้วยสารประกอบของโลหะหรือเกลือของโลหะซึ่ง ละลายน้ำแล้วได้ประจุบวก เมื่อรวมตัวกับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำที่แตกตัวให้ประจุลบเกิดเป็น สารประกอบเชิงซ้อนซึ่งเป็นของแข็งแยกตัวออกจากริ่ก่อนที่จะทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

สำหรับการศึกษารุ่นนี้จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด สารอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการสร้างตะกอน (Coagulant)

ได้แก่ สารส้มหรืออลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate, Alum) โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) สารรวมตะกอน (Flocculant) คือแอนไอออนโพลิเมอร์ (Anion polymer) รวมทั้งผลของค่า pH ตั้งต้นด้วย

ดังนั้นการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบที่เก็บตัวอย่างจากแม่น้ำสายหลัก 2 สายซึ่งมีคุณลักษณะต่างกันและเป็นแม่น้ำสายหลักในพื้นที่ภาคตะวันตก คือแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดที่มีการสูบน้ำไปใช้ในการผลิตน้ำประปาในโรงบำบัดน้ำขนาดใหญ่

## 2. ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติจากแม่น้ำท่าจีนและแม่กลองซึ่งเป็นแหล่งน้ำหลักของพื้นที่ภาคตะวันตก

2.3 เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพในการเกิดสารตกค้างกลุ่ม THM ของน้ำจากแม่น้ำทั้ง 2 สาย

## 3. ขอบเขตของการศึกษา

3.1 ทำการศึกษาการบำบัดน้ำจากแหล่งน้ำ 2 แหล่งซึ่งเป็นแหล่งน้ำหลักของพื้นที่ภาคตะวันตก โดยจะทำการเก็บตัวอย่าง ณ จุดสูบน้ำดิบเข้าโรงบำบัดน้ำขนาดใหญ่ 2 แห่ง จุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 2 จุด ได้แก่ แม่น้ำท่าจีนเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณ ต.บางระกำ อ.บางเลน จ.นครปฐม และแม่น้ำแม่กลองเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณ หมู่ 1 ต.แพงพวย อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี

3.2 การเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละจุดจะทำแบบจ้วงตัก (Grab sampling) โดยเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวให้ได้ปริมาณที่เพียงพอต่อการทดลอง การเก็บตัวอย่างจะทำในเดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นช่วงที่ฝนตกชุกและน้ำดิบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง (การประปานครหลวง, 2554) เก็บรักษาตัวอย่างน้ำโดยบรรจุในภาชนะที่ทำจากโพลีเอทิลีนเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.3 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon (DOC) ค่า UV-254 และศักยภาพในการเกิดสารกลุ่ม THM (Trihalomethane formation potential, THMFP)

3.4 สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  สารรวมตะกอนที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ Polyacrylamide ซึ่งเป็น Anion polymer

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา

น้ำประปาเป็นน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดต่าง ๆ เพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน รวมทั้งมีความปลอดภัยในการนำมาใช้อุปโภคบริโภค รายละเอียดกระบวนการผลิตน้ำประปามีดังนี้

**2.1.1 การสูบน้ำ** การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่มีสารปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนดและต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตน้ำประปาได้อย่างต่อเนื่อง

**2.1.2 การสร้างและรวมตะกอน** น้ำดิบที่สูบน้ำเข้ามาแล้วจะนำมาผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาวเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการรวมตะกอนและสารละลายปูนขาวจะช่วยปรับความเป็นด่างรวมทั้งยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ

**2.1.3 การตกตะกอน** ขั้นตอนนี้จะนำน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนแล้วเข้าสู่ถังตกตะกอนทำให้ตะกอนตกลงสู่ก้นถังและถูกดูดทิ้ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

**2.1.4 การกรอง** ถังกรองใช้ตัวกลางต่างๆ เช่น ทราย ถ่านแอนทราไซต์ เพื่อการกรองตะกอนที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ น้ำที่ผ่านการกรองจะมีความขุ่นเหลืออยู่ประมาณ 0.2-2.0 NTU

**2.1.5 การฆ่าเชื้อโรค** น้ำที่ผ่านการกรองแล้วอาจมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำ ฉะนั้นจึงจะต้องทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารฆ่าเชื้อโรค เช่น สารคลอรีน น้ำที่ผสมคลอรีนแล้วเรียกว่า น้ำประปา จะจัดเก็บไว้ในถังขนาดใหญ่ เรียกว่า ถังน้ำใส และสามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคได้

**2.1.6 การควบคุมคุณภาพน้ำประปา** ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องตรวจสอบคุณภาพเพื่อให้ได้น้ำประปาที่ปลอดภัยสำหรับการอุปโภคบริโภค

## 2.2 การฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน

### 2.2.1 คลอรีน

คลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) เป็นธาตุในกลุ่มฮาโลเจนมีลักษณะเป็นแก๊สสีเหลืองแกมเขียวมีกลิ่นฉุน ไม่พบในธรรมชาติ ภายในสภาวะอุณหภูมิและความดันปกติจะอยู่ในรูปแก๊ส ในสภาวะภายใต้ความดันจะเปลี่ยนเป็นของเหลวสีเหลืองอำพัน เมื่อมีความชื้นจะมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงไม่ระเบิด และไม่ติดไฟในสภาวะของเหลวความดันของแก๊สจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลง

คลอรีนที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคมี 3 รูปแบบ ได้แก่

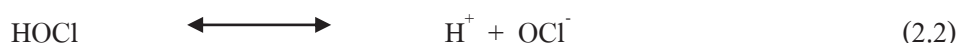
- แก๊สคลอรีน มีการบรรจุในถังขนาด 100 กก. 1,000 กก. และ 20-25 ตัน
- สารละลายคลอรีน ( $\text{NaClO}$ ) หรือโซเดียมไฮโปคลอไรด์ อยู่ในสถานะของเหลวมีสีเขียวทองอ่อน มีความเข้มข้นของคลอรีนร้อยละ 7-15 นำไปใช้ได้ง่ายเนื่องจากอยู่ในรูปของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการจ่ายผสมกับน้ำ
- คลอรีนผง ( $\text{Ca(OCl)}_2$ ) มีลักษณะเป็นผง เม็ด หรือเกล็ดสีขาวมีความเข้มข้นร้อยละ 65-71 ในการนำมาใช้ต้องนำมาละลายน้ำก่อน คลอรีนรูปนี้สามารถเก็บรักษาได้ง่ายและไม่ทำให้ความเข้มข้นสูญเสียไป

### 2.2.2 ปฏิริยาของคลอรีนในน้ำ

เมื่อแก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) รวมตัวกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเป็นกรดไฮโปคลอรัส ( $\text{HOCl}$ ) และกรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) ดังสมการที่ (2.1)



และ  $\text{HOCl}$  แตกตัวในน้ำจะได้ Hydrogen ion และ Hypochlorite ion ดังสมการที่ (2.2)



$\text{HOCl}$  ในน้ำจะมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่า ไฮโปคลอไรด์ ( $\text{OCl}^-$ ) ถึง 100 เท่า ในน้ำประปาที่ผลิตจากน้ำผิวดิน คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียที่มีอยู่ในน้ำเกิดเป็นคลอรามิน (Chloramines) ได้แก่ โมโนคลอรามิน ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) ไดคลอรามิน ( $\text{NHCl}_2$ ) และไตรคลอรามิน ( $\text{NCl}_3$ ) ดังสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) สารเหล่านี้รวมเรียกว่า Combined residual chlorine ซึ่งมีความสามารถในการฆ่าเชื้อได้แต่ปฏิกิริยาการฆ่าเชื้อจะช้ากว่าคลอรีนอิสระมาก อัตราเร็วของการ

ฆ่าเชื้อโรคขึ้นอยู่กับค่า pH อุณหภูมิ ระยะเวลาสัมผัส และอัตราส่วนระหว่างคลอรีนและแอมโมเนีย



ถ้าเติมแคลเซียมหรือโซเดียมไฮโปคลอไรด์ลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.6)

และ (2.7) ตามลำดับ



### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลในการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนในน้ำ

ปัจจัยที่มีผลในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนในน้ำ ได้แก่

#### (1) รูปแบบของคลอรีน

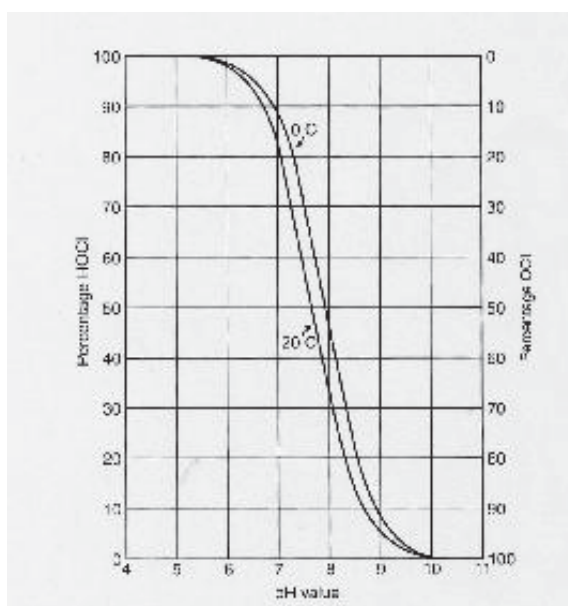
คลอรีนที่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้มี 2 รูปแบบ ได้แก่ คลอรีนอิสระ (Free chlorine) และคลอรีนรวม (Combined chlorine) โดยคลอรีนอิสระมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่าคลอรีนรวมประมาณ 40-80 เท่า

#### (2) ความเข้มข้นของคลอรีน

ความเข้มข้นของคลอรีนสามารถวัดได้จากปริมาณของคลอรีนที่ตกค้างอยู่ในน้ำ (Chlorine residual) เนื่องจากเมื่อเติมคลอรีนลงไปในน้ำ คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ถ้าเติมคลอรีนน้อยเกินไปก็จะมีคลอรีนเหลือตกค้าง แต่ถ้าเติมคลอรีนให้มากเกินไปพอหลังจากทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ แล้วก็จะมีคลอรีนอิสระหรือคลอรีนรวมเหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ทำให้สามารถฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ ปริมาณของคลอรีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารในน้ำเรียกว่าความต้องการคลอรีน (Chlorine demand) ดังนั้นปริมาณคลอรีนที่เติมเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำจึงหมายถึงความต้องการคลอรีนรวมกับปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างเพื่อสำรองไว้ฆ่าเชื้อโรค คลอรีนตกค้างในน้ำประปาตามมาตรฐานของการประปาภูมิภาคกำหนดคือ น้อยกว่า 0.5 mg/L (การประปาภูมิภาค, 2553)

### (3) pH

HOCl มีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่า  $\text{OCl}^-$  เป็นอย่างมาก ดังนั้น pH ต่ำจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ เนื่องจากคลอรีนจะอยู่ในรูปของ HOCl ที่ pH ต่ำทำให้ไม่สิ้นเปลืองคลอรีนในการใช้แต่ละครั้ง (มันสิน, 2539) ในทางกลับกันถ้า pH สูง คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ  $\text{OCl}^-$  ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำลง การกระจายตัวของ HOCl และ  $\text{OCl}^-$  แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การกระจายตัวของ HOCl และ  $\text{OCl}^-$  ในน้ำที่มี pH ต่าง ๆ กัน  
ที่มา: มันสิน, 2539

### (4) เวลาสัมผัส

การฆ่าเชื้อโรคให้มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีเวลาสัมผัสอย่างเหมาะสม เวลาสัมผัสขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของคลอรีนที่ใช้เป็นสำคัญ ถ้าใช้คลอรีนมากเวลาสัมผัสอาจต่ำแต่ถ้าใช้คลอรีนน้อยก็จำเป็นต้องมีเวลาสัมผัสนาน หากมีคลอรีนอิสระมากเวลาสัมผัสก็ไม่จำเป็นต้องสูง เนื่องจากคลอรีนอิสระมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคได้รวดเร็ว แต่ถ้าใช้คลอรีนรวม (Combined chlorine) ต้องใช้เวลาสัมผัสนานกว่า ทั้งนี้เพื่อให้มีความมั่นใจว่าเกิดการฆ่าเชื้อโรคได้อย่างแน่นอน

### (5) ความขุ่นของน้ำ

ของแข็งแขวนลอยในน้ำเป็นเกราะกำบังให้กับเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์อื่น ๆ ทำให้คลอรีนไม่สามารถเข้าไปสัมผัสได้ ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคจะให้ผลดีก็ต่อเมื่อน้ำมีความขุ่นต่ำ เช่น น้ำที่ผ่านเครื่องกรองแล้วเป็นต้น (มันสิน, 2539)

### (6) สารปนเปื้อนในน้ำ

สารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน ดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงถึงผลของสารปนเปื้อนในน้ำต่อการเติมคลอรีน

ตารางที่ 1 ผลของสารปนเปื้อนในน้ำต่อการเติมคลอรีน

|                  |                                                                                                                                            |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BOD COD TOC      | ทำให้ Chlorine demand สูงขึ้น เนื่องจากถูกออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน                                                                              |
| Humic material   | ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำลง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็น Chlorinated organic compounds ซึ่งไม่สามารถฆ่าเชื้อโรคได้      |
| FOG              | ทำให้ Chlorine demand สูงขึ้น                                                                                                              |
| TSS              | ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำลง เนื่องจากลดโอกาสที่คลอรีนจะสัมผัสกับเชื้อโรค                                                         |
| Ammonia          | ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำลง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็น Chloramines ซึ่งมีความสามารถในการฆ่าเชื้อโรคต่ำกว่าคลอรีนอิสระ |
| Nitrite          | ทำให้ Chlorine demand สูงขึ้น เนื่องจากถูกออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน เกิดเป็นสารกลุ่ม Nitrosamines                                                |
| Nitrate          | ทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารกลุ่ม Nitrosamines                                                                                                   |
| เหล็กและแมงกานีส | ทำให้ Chlorine demand สูงขึ้น เนื่องจากถูกออกซิไดซ์ด้วยคลอรีน                                                                              |
| pH               | มีผลต่อรูปแบบของคลอรีน                                                                                                                     |

ที่มา: มัลลิกา (2551)

### 2.3 สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

#### 2.3.1 ประเภทของสารตกค้าง

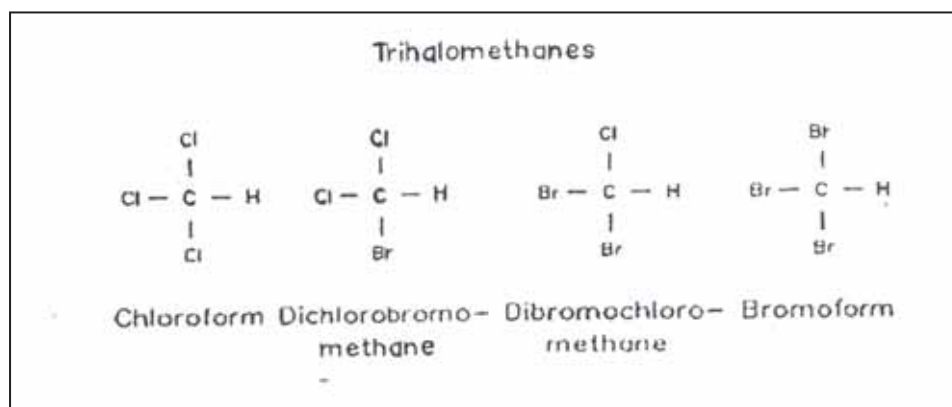
สารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products, DBPs) แบ่งเป็น 3 กลุ่มได้แก่

- (1) สารตกค้างที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant residuals) ได้แก่ คลอรีนอิสระ (Free chlorine) คลอรามิน (Chloramines)
- (2) สารตกค้างประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic by-products) เช่น คลอเรตไดออกไซด์ คลอไรต์ไดออกไซด์ เป็นต้น
- (3) สารตกค้างประเภท Halogenated organic by-products ได้แก่ สารประกอบกลุ่ม Trihalomethanes กลุ่ม Haloacetic acids กลุ่ม Haloacetonitriles กลุ่ม Haloketones กลุ่ม

Chlorophenols เป็นต้น ซึ่งสารตกค้างกลุ่มนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural organic matter, NOM) ในน้ำกับคลอรีน

### 2.3.2 สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs)

การเกิด THMs ในน้ำประปา เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคลอรีนอิสระกับ NOM ในน้ำ เช่น กรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก ดังสมการ (2.7) เกิดเป็นสารประกอบฮาโลเจนที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเป็นองค์ประกอบมีสูตรทั่วไปคือ  $\text{CHX}_3$  โดยตำแหน่งของ X อาจมีการแทนที่ด้วย ฟลูออรีน (F) ไอโอดีน (I) คลอรีน (Cl) โบรมีน (Br) หรือธาตุเหล่านี้ทุกตัวรวมกัน สารกลุ่มที่พบมากในน้ำประปามี 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (Chloroform,  $\text{CHCl}_3$ ) โบโรไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane,  $\text{CHCl}_2\text{Br}$ ) ไดโบโรคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane,  $\text{CHClBr}_2$ ) และโบโรฟอร์ม (Bromoform,  $\text{CHBr}_3$ ) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน

ที่มา: Edward & George, 1992 อ้างโดย ณัฐพงศ์ และคณะ, 2548

### 2.3.3 ความเป็นอันตรายของสารตกค้างและค่ามาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

THMs เข้าสู่ร่างกายโดยเส้นทางต่าง ๆ ได้แก่ ปากและทางเดินอาหาร ทางเดินหายใจ และการซึมผ่านผิวหนัง จากงานวิจัยของ Capece (1998) ซึ่งศึกษาในสหรัฐอเมริกา พบว่าคนที่อาบน้ำด้วยฝักบัวเป็นเวลา 10 นาที สามารถรับเอา THMs เข้าสู่ทางร่างกายได้มากเท่ากับการดื่มน้ำที่มี THMs 5 แก้ว

Brodthmann และคณะ (1979) อ้างโดย อนรรฆิยา (2546) ได้กล่าวถึงรายงานการวิจัยของสถาบันมะเร็งแห่งชาติประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งทดลองกับสัตว์ทดลองคือ หนู เมื่อได้รับ

คลอโรฟอร์มเข้าไปในปริมาณ 90 และ 180 mg/kg ของหนูตัวผู้เป็นเวลา 78 สัปดาห์และในหนูตัวเมีย 125 และ 250 mg/kg ของหนูตัวเมียใน 22 สัปดาห์แรก จึงให้เท่ากับหนูตัวผู้จนครบ 111 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าคลอโรฟอร์มทำให้หนูเป็นเนื้องอกที่ตับและสามารถทำให้เกิดมะเร็งในหนูที่ทดลอง นอกจากนั้นพบว่าสารโบรมไฮโดรคาร์บอน (Bromohydrocarbon) เป็นอันตรายต่อยีน (Gene) ของหนู โดยเป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดเนื้องอกที่ตับและกระเพาะอาหารของหนู

มัลลิกา และผ่องศรี (2550) ทำการประเมินความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งจากการได้รับ THMs ในน้ำประปา กรณีศึกษาประปาของเทศบาลนครนครปฐม พบว่าความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม โบโมไดคลอโรมีเทน ไดโบโมคลอโรมีเทน โบโรมฟอร์ม และ Total THMs ในน้ำประปาอยู่ในช่วง 6.72-29.19 1.12-11.75 0.63-3.35 0.08-3.40 และ 12.70-41.74  $\mu\text{g/L}$  ตามลำดับ และร้อยละความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งของสารทั้ง 4 ชนิด คือ คลอโรฟอร์ม โบโมไดคลอโรมีเทน ไดโบโมคลอโรมีเทน และโบโรมฟอร์ม คือ 13.6 62.9 21.3 และ 2.3 ตามลำดับ พบว่าถึงแม้คลอโรฟอร์มจะเป็นสารที่มีความเข้มข้นสูงสุด แต่ไม่ได้หมายความว่าเมื่อนำมาประเมินความเสี่ยงในการเกิดมะเร็ง แต่กลายเป็นโบโมไดคลอโรมีเทนที่มีความเสี่ยงในการเกิดมะเร็งมากที่สุด รองลงมาคือ ไดโบโมคลอโรมีเทน ส่วนความเสี่ยงของการเกิดมะเร็งเนื่องจากได้รับสารผ่านทางเดินอาหารและทางผิวหนังเท่ากับร้อยละ 7.06 และ 29.40 ตามลำดับ

จากความเป็นพิษดังที่ได้กล่าวมาแล้วหน่วยงานต่าง ๆ จึงกำหนดความเข้มข้นสูงสุด (Maximum contaminant levels, MCLs) ของสารประกอบ Chlorine by-products ในน้ำประปาดังตารางที่ 2

ปริมาณสารประกอบ Chlorine by-product ในน้ำประปาจากประเทศต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งเห็นได้ว่าความเข้มข้นสารประกอบ Chlorine by-product ในน้ำประปาของประเทศ Canada มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของ WHO และ US-EPA

ตารางที่ 2 ค่ามาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของสารประกอบ Chlorine by-products ในน้ำประปาที่หน่วยงานต่าง ๆ กำหนดไว้

| หน่วยงาน/<br>ประเทศ    | กลุ่มสาร             | maximum contaminant<br>levels,<br>MCLs (µg/L) | ที่มา                    |
|------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|
| WHO *                  | Total THMs           | 100                                           | มัลลิกา และฟองศรี (2550) |
| US-EPA**               | Total THMs           | 80                                            |                          |
|                        | HAAs                 | 60                                            |                          |
| European Union<br>(EU) | Total THMs           | 10                                            |                          |
| Thailand ***           | CHCl <sub>3</sub>    | 200                                           | การประปานครหลวง (2548)   |
|                        | CHCl <sub>2</sub> Br | 60                                            |                          |
|                        | CHClBr <sub>2</sub>  | 100                                           |                          |
|                        | CHBr <sub>3</sub>    | 100                                           |                          |
| Japan                  | CHCl <sub>3</sub>    | 60                                            | Wang et al.(2007)        |
|                        | CHCl <sub>2</sub> Br | 30                                            |                          |
|                        | CHClBr <sub>2</sub>  | 10                                            |                          |
|                        | CHBr <sub>3</sub>    | 90                                            |                          |
| Italy                  | THMs                 | 30                                            | Roccaro et al. (2005)    |
| Germany                | THMs                 | 50                                            |                          |
| Spain                  | THMs                 | 100                                           |                          |
| Austria                | THMs                 | 30                                            |                          |
| Belgium                | THMs                 | 30                                            |                          |

หมายเหตุ: \* อยู่ในระหว่างการกำหนดมาตรฐานสำหรับ THMs แต่ละชนิด

\*\* ค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปี

\*\*\* กำหนดค่ามาตรฐานตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก (WHO) ปี 2536

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของสารประกอบ Chlorine by products ของประเทศต่าง ๆ

| จุดเก็บตัวอย่าง         | ชนิดของ THMs             | ความเข้มข้น ( $\mu\text{g/L}$ ) | ที่มา                  |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Ankara, ตุรกี           |                          |                                 |                        |
| - Summer                | Total THMs               | 25-110                          | Tokmak et al. (2004)   |
| - Spring                |                          | 28-73                           |                        |
| - Winter                |                          | 25-74                           |                        |
| Hanoi, เวียดนาม         |                          |                                 | Duong et al. (2003)    |
|                         | $\text{CHCl}_3$          | <0.3-11                         |                        |
|                         | $\text{CHCl}_2\text{Br}$ | 0.5-7.3                         |                        |
|                         | $\text{CHClBr}_2$        | 0.3-22.3                        |                        |
|                         | $\text{CHBr}_3$          | 1.2-18.5                        |                        |
| มาเลเซีย                |                          |                                 | Abdullah et al. (2003) |
| - Tampin district       | $\text{CHCl}_3$          | 14.84-55.62                     |                        |
|                         | Total THMs               | 18.59-68.82                     |                        |
| - Sabak Bernam district | $\text{CHCl}_3$          | 42.92-81.00                     |                        |
|                         | Total THMs               | 54.64-89.83                     |                        |

ที่มา: มัลลิกา และพองศรี (2550)

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

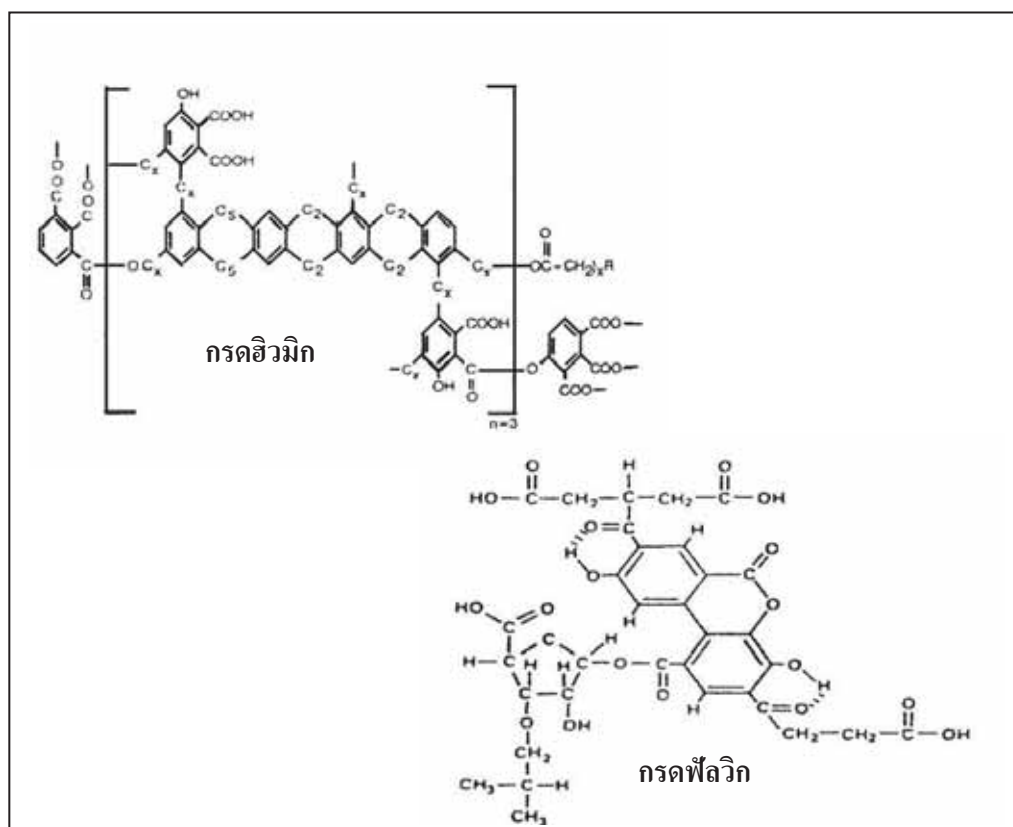
สาร THMs ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

(Natural organic matter, NOM) กับคลอรีน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ NOM ในน้ำดิบ โบรไมด์ อีออน pH อุณหภูมิของน้ำ ปริมาณคลอรีนที่เติม ในที่นี้จะกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญดังนี้

#### (1) สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (Natural organic matter, NOM)

NOM เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน NOM ในน้ำเป็นของผสมระหว่างสารประกอบฮิวมิก (Humic substances) ซึ่ง NOM ประกอบด้วยกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก และสารที่ไม่ใช่สารประกอบฮิวมิก (Non-humic material) สารฮิวมิกมีอยู่ทั่วไปในน้ำและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (ปิยรัตน์, 2545)

Stevenson (1994) อ้างโดยอนรรฆยา (2546) ได้ทำการศึกษาพบว่าโครงสร้างของกรดฮิวมิกมีโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกมากและมีหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอไมด์และฟีนอลลิก ที่ยื่นออกมาจากโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนที่คลอรีนสามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็นสาร THMs ได้ ตัวอย่างโครงสร้างกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างโครงสร้างกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

ที่มา: Stevenson (1994) อ้างโดยอนรรักษ์ (2546)

NOM ในน้ำสามารถวิเคราะห์ด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC) ค่าสารอินทรีย์โครงสร้างอะโรมาติก (UV-254) ซึ่งเป็นการวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 253.7 nm ค่านี้แสดงลักษณะโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีส่วนประกอบของอะโรมาติก โดยจะดูดกลืนแสง UV ที่ความถี่นี้ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กหรือสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นสายตรง จากนั้นยังสามารถแสดงค่าความเป็นอะโรมาติก (Aromaticity) ด้วยค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะ (Specific ultraviolet absorbent, SUVA) ซึ่งคิดจาก  $(UV-254/DOC) \times 100$  ดังนั้นค่า UV254 และ SUVA จึงเป็นค่าที่ใช้ในการบ่งชี้ถึงปริมาณกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิกในน้ำได้ (Rodriguez et al. 2004 และ Uyak and Toroz, 2007)

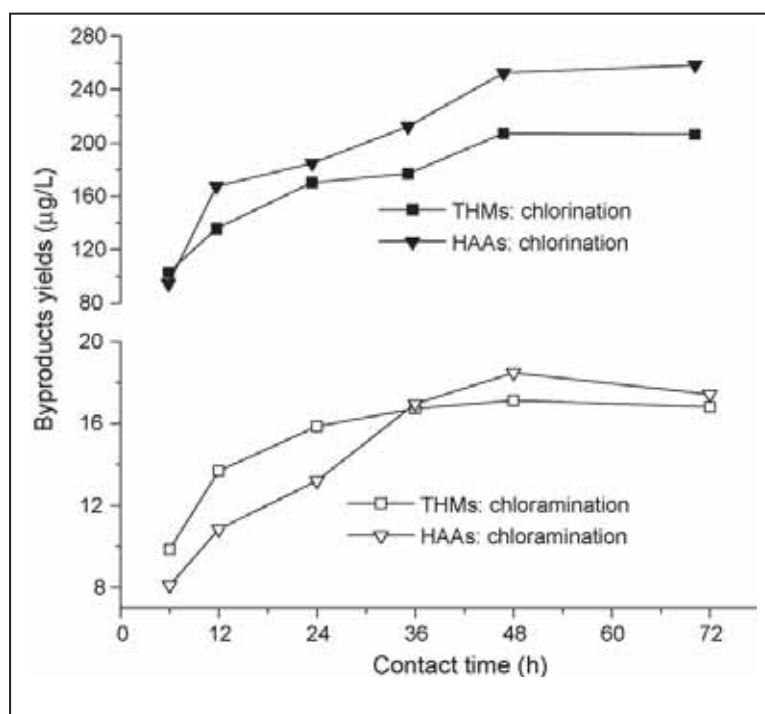
## (2) ปริมาณคลอรีน

ปริมาณคลอรีนที่เติมจะมีผลต่อชนิดและความเข้มข้นของสารตกค้าง โดยเมื่อความเข้มข้นคลอรีนที่เติมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารตกค้างสูงขึ้น (มัลลิกา และผ่องศรี, 2550)

### (3) ระยะเวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และคลอรีนมีผลต่อการเกิด THMs จากงานวิจัยของ Jinfeng et al. (2009) พบว่าหลังจากเติมคลอรีนลงในน้ำปริมาณ THMs จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 48 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มช้าลงในช่วง 48-72 ชั่วโมงถัดไปตามเวลาที่มากขึ้นดังภาพที่ 4

จากงานวิจัยของ Faust and Aly (1997) อ้างโดย มัลลิกา และผ่องศรี (2550) พบว่า หลังจากการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะเกิด THMs อย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรก ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์หลังจากเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง THMs and HAAs กับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา

ที่มา: Jinfeng et al. (2009)

### (4) pH ของน้ำ

สำหรับผลของ pH สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปประจุลบและสามารถจับตัวกันกลายเป็นคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นประจุลบของสารอินทรีย์ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งประจุลบส่วนใหญ่เกิดในกลุ่มคาร์บอกซิล ( $\text{COO}^-$ ) โดยที่  $\text{H}^+$  จะไอออนในช่องออกมาที่ pH ระหว่าง 3.0-8.0 ถ้าค่า pH สูงกว่านี้จะมีประจุลบมากขึ้น ดังนั้นสารอินทรีย์จะมีเสถียรภาพสูงทำให้ปฏิกิริยาการสร้างตะกอนเกิดได้ยาก จึงเหลือสารอินทรีย์ตกค้างจากการตกตะกอนมากขึ้น และเกิดการรวมตัวกับคลอรีนเกิดเป็น THMs เพิ่มขึ้นด้วย (อนรรฆยา, 2546)

### (5) อุณหภูมิของน้ำ

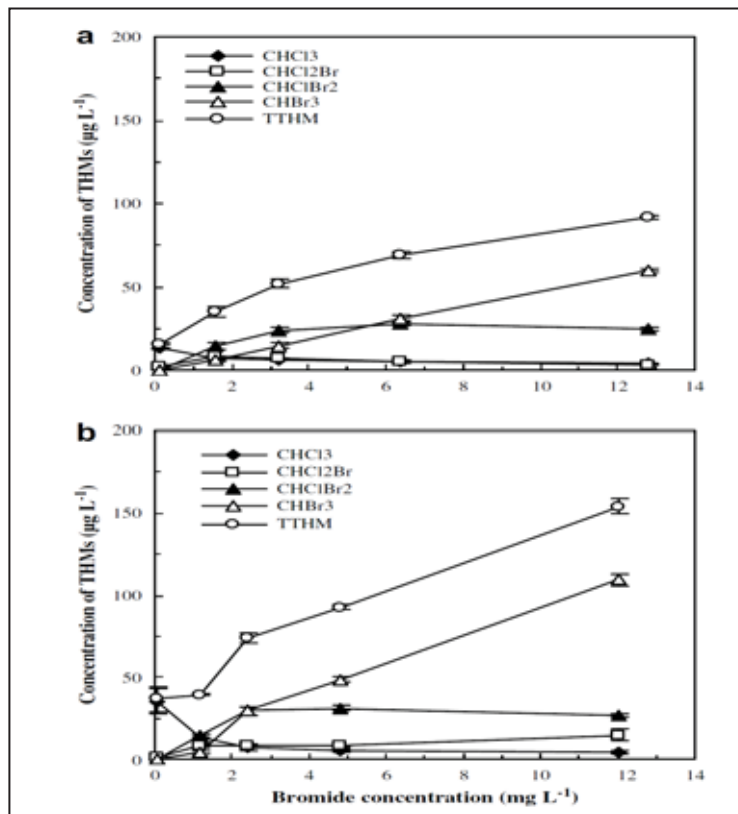
อุณหภูมิจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์เร็วขึ้น

ผลการวิจัยของ Rodriguez et al. (2004) และ Serodes et al. (2003) อ้างโดย มัลลิกา และผ่องศรี (2550) ซึ่งเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากประเทศแคนาดา สรุปว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น THMs ได้แก่ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำและอุณหภูมิของน้ำ

### (6) ความเข้มข้นของโบรไมด์

โบรไมด์เป็นปัจจัยสำคัญที่จะก่อให้เกิดสารตกค้างกลุ่มนี้ เนื่องจากโบรไมด์อิสระจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นโบรมีนอิสระ (Free bromine) และกรดไฮโปโบรมัส (Hypobromous) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำได้ดี จึงทำให้เกิดสารตกค้างที่มีโบรมีนเป็นองค์ประกอบ เช่น Bromoform Brominated Acetic acid และ Bromopicrin เป็นต้น นอกจากนี้สัดส่วนระหว่างโบรไมด์อิสระและปริมาณคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมีผลต่อการเกิด THMs โดยจะเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ของคลอรีนอะตอมในสารตกค้างด้วยโบรมีนอะตอม เมื่อสัดส่วนนี้เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดสารตกค้างที่มีองค์ประกอบของโบรมีนอะตอมเพิ่มมากขึ้นด้วย (USEPA, 1999)

งานวิจัยของ Sun et al. (2009) และ Kulkarni and Chellam (2010) พบว่าเมื่อปริมาณโบรไมด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณ  $\text{CHCl}_3$  ลดลงและปริมาณ  $\text{CHBr}_3$  เพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณของ  $\text{CHClBr}_2$   $\text{CHBr}_3$  เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณโบรไมด์ถึง 3.2 mg/L หลังจากนั้นจึงลดลง แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ THMs แต่ละชนิด และ Total THM ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโบรไมด์

ที่มา: Sun et al. (2009)

## 2.4 กระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Chemical coagulation and flocculation)

### 2.4.1 หลักการ

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนคือ การทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุเป็นลบจึงเกิดการผลักกันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น ขั้นตอนในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

- Coagulation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยในน้ำมีประจุเป็นกลาง โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกหรือเรียกว่า Coagulant เพื่อให้เกิดการสะเทินประจุที่ผิวของสารแขวนลอย ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงและรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

- Flocculation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยที่สะเทินประจุแล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า ฟล็อก (Floc) โดยการเติมสารเคมีที่เรียกว่า Flocculant เมื่อกลุ่มตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้นน้ำหนักก็มากขึ้นทำให้สามารถจมตัวลงสู่ก้นถังได้เร็วมากขึ้น

## 2.4.2 กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

กลไกการทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยรวมตัวกันตกตะกอนออกจากน้ำได้ คือ

### (1) การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

กลไกต่าง ๆ ของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ได้แก่

(1.1) กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge neutralization) เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของสารสร้างตะกอนที่มีประจุบวกทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่มีประจุลบให้กลายเป็นกลาง (Neutralization) และเกิดการดูดติดผิวทำให้อนุภาคของคอลลอยด์รวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และแยกตัวออกจากน้ำได้

(1.2) กลไกการสร้างผลึกเพื่อให้คอลลอยด์มาเกาะจับกันเป็นฟล็อก เป็นการเติมสารสร้างตะกอนที่มีความสามารถในการตกผลึกได้อย่างรวดเร็ว โดยเมื่อรวมตัวกับสารแขวนลอยจะมีน้ำหนักมากยิ่งขึ้นและแยกตัวออกจากน้ำได้

(1.3) กลไกแบบกวาด (Sweep coagulation) กลไกนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมสารสร้างตะกอนเกินพอ จนทำให้เกิดผลึกของสารสร้างตะกอนที่มีลักษณะเหนียวห่อหุ้มอนุภาคไว้ เป็นผลทำให้อนุภาคนั้นไม่สามารถแสดงอิทธิพลทางประจุออกมาได้ จึงทำหน้าที่สร้างคอลลอยด์ให้มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้

### (2) การสร้างสะพานเชื่อมต่อกอลลอยด์

โดยใช้สารโพลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาเชื่อมต่อก้อนของคอลลอยด์เข้าด้วยกัน เมื่อใส่ลงในน้ำจะเกาะจับกับคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคอื่นๆ เพื่อทำให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้

## 2.4.3 สารสร้างตะกอน (Coagulant) และ สารรวมตะกอน (Flocculant)

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการ Coagulation หรือเรียกว่าสาร Coagulant ที่นิยมใช้มีดังนี้

### (1) สารส้ม (Aluminium sulphate, Alum)

Alum มีสูตรโมเลกุล  $Al_2(SO_4)_3 \cdot x H_2O$  โดยที่  $x$  มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 ซึ่งแตกตัวในน้ำได้เป็นไอออนบวกดังสมการที่ (2.8)



เมื่อ Alum ละลายน้ำ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ  $Al^{+3}$  จะเกิดขึ้นทันทีที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ (2.9) (2.10) และ (2.11)

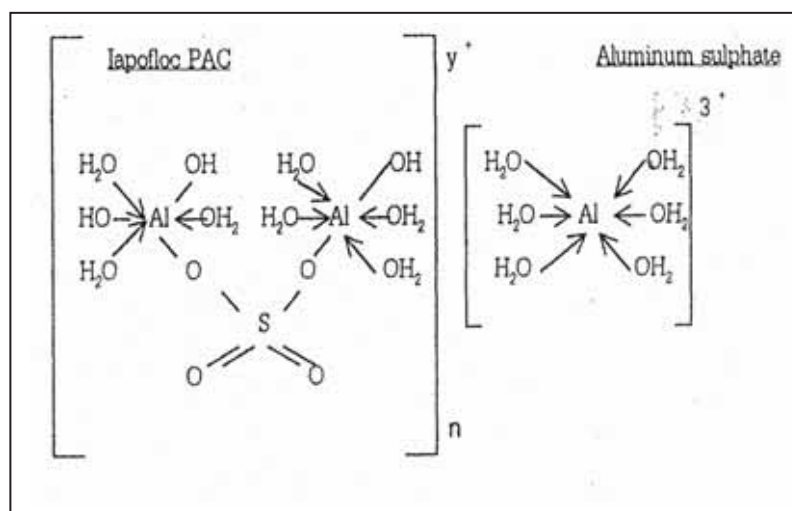


ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $\text{Al(OH)}_3$  ดังสมการที่ (2.12)



## (2) สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl)

PACl มีสูตรทั่วไปคือ  $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$  ถูกเตรียมขึ้นโดยอลูมิเนียมที่เป็น  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{HCl}$  ที่อุณหภูมิสูงจนเป็น  $\text{AlCl}_3$  หลังจากนั้นทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูงเกิดเป็นอลูมิเนียมโพลีเมอร์และเมื่อเติม Alum ลงไปจะได้  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ความเข้มข้น 10-11 % จากนั้นเติมซัลเฟตเพื่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างอะตอมของอลูมิเนียม ดังภาพที่ 6 ซึ่งแสดงโครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum

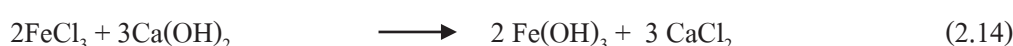


ภาพที่ 6 โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum

ที่มา: Viraraghavan and Wimmer, 1988 อ้างโดย ปิยรัตน์, 2545

### (3) สารเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride, (FeCl<sub>3</sub>))

FeCl<sub>3</sub> มีสูตรทั่วไปคือ FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O หรือ FeCl<sub>3</sub> anhydrous เป็นผลึกหรือสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลืองสามารถละลายน้ำได้ดี สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำจะได้ประจุบวก ซึ่งจะไปทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งเป็นประจุลบ จนเกิดเป็นตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และทำปฏิกิริยากับ Alkalinity ดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)



### (4) สารรวมตะกอน (Flocculant)

สารรวมตะกอนเป็นสารโพลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งเกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของ โมโนเมอร์เป็นสายโซ่ยาว โพลิเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

#### (4.1) โพลิเมอร์ประจุบวก (Cation polymer)

Cation polymer สามารถรวมตะกอนที่มีประจุลบได้เป็นอย่างดี นิยมใช้ในการปรับสภาพตะกอน ตัวอย่างเช่น 1-trimethylammonium-2-hydroxypropylmethacrylate methosulfate, 1-trimethylammonium-2-hydroxypropylacrylate methosulfate, 3-methacrylamido propyl trimethyl ammonium chloride และ Polydiallyldimethyl ammonium (PDADMA, cat-floc)

#### (4.2) โพลิเมอร์ประจุลบ (Anion polymer)

Anion polymer เป็นสารที่มีประจุเป็นลบเมื่อละลายน้ำ ตัวอย่างเช่น Polyacrylamide acid (PAA), hydrolyzed polyacrylamide (HPAM) และ Polystyrene sulfate (PSS)

#### (4.3) โพลิเมอร์ไม่มีประจุ (Nonion polymer)

โพลิเมอร์กลุ่มนี้ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถทำให้ตะกอนรวมกลุ่มกันได้ดีทำให้เกิด Floc ที่แข็งแรง ตัวอย่างเช่น Polyvinyl pyrrolidone (PVP)

#### (4.4) โพลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Amphoteric polymer)

Amphoteric polymer เป็นโพลิเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ตัวอย่างเช่น Amphoteric polyacrylamide (PAM)

### 2.4.4 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเกลือ Al<sup>3+</sup> และ Fe<sup>3+</sup>

Faust and Aly (1997) อ้างโดย มัลลิกาและพองศรี (2550) อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ เกลือ Al<sup>3+</sup> และ Fe<sup>3+</sup> ว่า Aluminium และ Ferric cation สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ โดยปฏิกิริยานี้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติของลิแกนด์ ความเข้มข้นของ Aluminium และ

Ferric cation และความเข้มข้นของ  $H^+$  ในน้ำ Al และ Fe เป็นสาร Amphoteric สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนทั้งที่เป็นแคทไอออนและแอนไอออนได้

เมื่อเติม Alum ลงในน้ำอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จาก  $Al_2(SO_4)_3$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำนอกจากนั้น  $OH^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (Hannah, 1967 อ้างโดยพรศักดิ์, 2550) เกิดทั้งผลิตภัณฑ์ประจุบวกและลบ เช่น  $Al^{3+}$   $Al(OH)^{2+}$   $Al_7(OH)_{17}^{4+}$   $Al(OH)_4^-$  ชนิดของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเกลืออลูมิเนียมและ pH ดังนั้น จากภาพที่ 7 แสดง Solubility diagram ของอลูมิเนียมชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าอลูมิเนียมมีการละลายต่ำในช่วง pH 5.7-6.2 ถ้าความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) คือ มากกว่า  $10^{-6}$  ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $Al(OH)_3$  ซึ่งทำให้เกิดการบำบัดความขุ่นได้ดี ถ้า pH ต่ำกว่า 5.7 อลูมิเนียมจะละลายน้ำได้ดีและเปลี่ยนรูปเป็นโมโนเมอร์และโพลิเมอร์ที่เป็นประจุบวก เช่น  $Al(OH)^{2+}$   $Al(OH)_2^+$   $Al_7(OH)_{17}^{4+}$  แต่ถ้า pH มากกว่า 6.2 อลูมิเนียมจะละลายน้ำได้ดีขึ้นและอยู่ในรูปประจุลบ คือ  $Al(OH)_4^-$  เพิ่มขึ้น (มัลลิกา และผ่องศรี, 2550 และ Jinming and John, 2003)

เกลืออลูมิเนียมที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำมี 2 ชนิด คือ Alum และ PACl ความแตกต่างของสาร 2 ชนิดนี้ ได้แก่ PACl จะแตกตัวให้สารเชิงซ้อนมากกว่า ที่ pH ต่ำกว่า 6.0 Alum จะไม่เกิดโพลิเมอร์ ในขณะที่ PACl จะเกิดโพลิเมอร์ขึ้น (มัลลิกา และผ่องศรี, 2550)

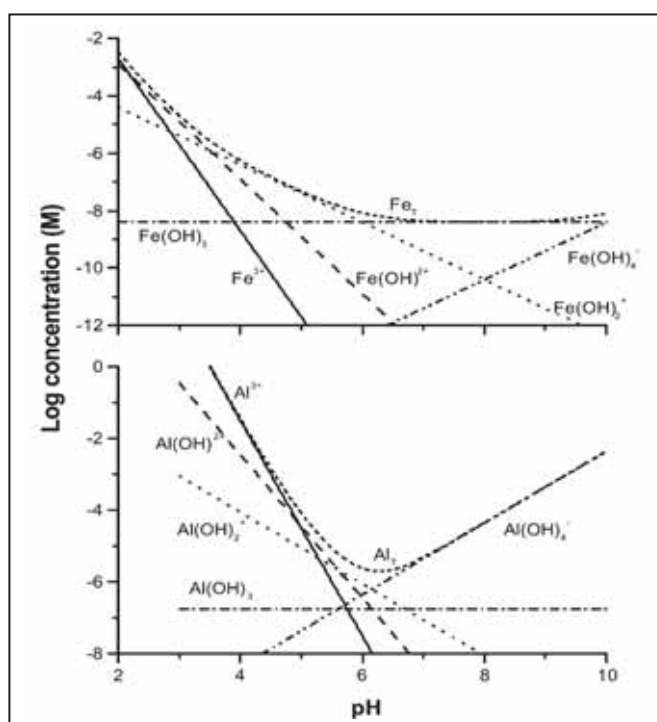
เมื่อเติม  $Fe^{3+}$  ลงในน้ำจะเกิดการตกตะกอนในรูป Amorphous  $Fe(OH)_3$  ถ้า pH ต่ำกว่า 8.0 ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นโนโนเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีประจุบวก เช่น  $Fe^{3+}$   $Fe(OH)_2^+$   $FeOH^{2+}$  กรณีที่ pH สูงกว่า 9.0 ก็จะเปลี่ยนรูปเป็น  $Fe(OH)_4^-$  นอกจากนี้  $FeCl_3$  มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่า Alum แต่ช่วง pH ของการละลายน้ำของ  $FeCl_3$  กว้างกว่า Alum คือช่วง pH 4.0-8.0

#### 2.4.4 กลไกของการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

NOM แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ สารอินทรีย์ส่วนที่ละลายน้ำซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดฟัลวิก สารกลุ่มมีความหนาแน่นของประจุลบที่ผิวสูง สารอีกกลุ่มหนึ่งได้แก่ สารคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง กลไกหลักในการบำบัด NOM ในน้ำมี 3 กลไก คือ กลไกการสะเทินประจุ (Charge neutralization) การดูดซับ (Absorption) และ กลไก Sweep coagulation

ความเข้มข้นของสาร Coagulant และค่า pH ดังนั้น มีผลต่อกลไกหลักของการบำบัดสารอินทรีย์ เนื่องจาก pH มีผลต่อรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือโลหะและ NOM เช่น เมื่อ pH ต่ำกว่า 5.7 เกลืออลูมิเนียมจะละลายน้ำได้ดีและเปลี่ยนรูปเป็นโมโนเมอร์และโพลิเมอร์ประจุบวก และถ้า pH ต่ำกว่า 8.0  $FeCl_3$  ก็จะเปลี่ยนรูปเป็นโนโนเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่มีประจุบวก

ส่วนสารอินทรีย์ถ้าอยู่ในช่วง pH ต่ำจะถูก Protonate มากขึ้นทำให้มีความหนาแน่นของประจุลบต่ำลง ดังนั้นการบำบัด NOM ในน้ำจึงมี pH ที่เหมาะสมในช่วง 5.0-6.0 เนื่องจากช่วง pH ดังกล่าวสารอินทรีย์มีความหนาแน่นของประจุลบสูงและสาร Coagulant ก็อยู่ในรูปประจุบวก จึงเกิดการสะเทินประจุและตกตะกอนได้ดี ที่ pH ต่ำกว่านี้สารอินทรีย์จะมีความหนาแน่นของประจุลบต่ำจึงไม่สามารถจับกับสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือโลหะที่มีประจุบวกได้ และถ้า pH สูงกว่านี้สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำมีความหนาแน่นประจุลบสูง เนื่องจากเกิดการแตกตัวให้  $H^+$  แต่สาร Coagulant กลับอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุหรือประจุลบจึงไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ (Faust and Aly, 1997 อ้างโดย มัลลิกา และพองศรี, 2550) และ Cathalifaud et al. 1993 อ้างโดย Jinming and John, 2003)



ภาพที่ 7 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของ Fe (III) และ Al (III) ที่ pH ต่าง ๆ  
 ที่มา: Jinming and John (2003)

#### 2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

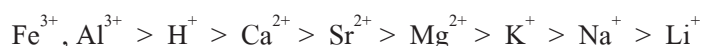
##### (1) ลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

เนื่องจากคุณภาพน้ำในแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของต้นน้ำ สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศและปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ส่งผลให้ลักษณะของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมีความแตกต่างกัน

Kim and Yu (2005) ทำการบำบัด NOM จากแม่น้ำฮั่นของประเทศเกาหลี โดยใช้เกลือของ  $Al^{3+}$  ในกระบวนการ Coagulation และ Sharp et al. (2006) ทำการบำบัด NOM ในน้ำจากแหล่งน้ำของประเทศอังกฤษ โดยใช้เกลือของ  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$  จากการศึกษาทั้งสองกรณี ได้ข้อสรุปตรงกันคือ สารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น Hydrophobic สามารถถูกบำบัดได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น Hydrophilic นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากระบวนการ Coagulation สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก

## (2) ชนิดและปริมาณของสาร Coagulant

สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการสร้างตะกอนมีด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสร้างตะกอนกับสารอินทรีย์ได้แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าเคมีที่ต่างกันและความสามารถในการสร้างตะกอนเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้



Uyak and Toroz (2007) ทำการศึกษาการใช้เกลือของ  $Al^{3+}$  และ เกลือ  $Fe^{3+}$  ในการบำบัด NOM พบว่าเกลือของ  $Fe^{3+}$  สามารถบำบัด NOM ได้ดีกว่าการใช้เกลือของ  $Al^{3+}$  และเมื่อเพิ่มปริมาณสาร Coagulant จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ดีขึ้น

Qin et al. (2006) ทำการศึกษากระบวนการ Coagulation เพื่อลด NOM ในน้ำของประเทศสิงคโปร์ โดยกำหนดปริมาณ Alum อยู่ในช่วง 2.0-6.5 mg/L พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum ประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ก็สูงขึ้น โดยปริมาณที่เหมาะสมในการบำบัด NOM ของ Alum คือ 5 mg/L ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัด NOM ได้ร้อยละ 45

Musikavong et al. (2005) ศึกษาการบำบัด NOM และ THMFP จากน้ำในภาคเหนือของประเทศไทยด้วย Alum และ  $FeCl_3$  โดยกำหนดปริมาณสารทั้งสองคือ 10-80 mg/L พบว่า Alum และ  $FeCl_3$  สามารถบำบัด NOM และ THMFP ได้ดีใกล้เคียงกัน โดยที่ปริมาณ 40 mg/L ทั้ง Alum และ  $FeCl_3$  สามารถบำบัด NOM ได้ร้อยละ 35 และพบว่า  $FeCl_3$  สามารถบำบัดการเกิด THMFP ได้ทุกชนิด

Rizzo et al. (2005) ทำการศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำจากแหล่งน้ำตอนใต้ของประเทศอิตาลี ด้วยกระบวนการ Coagulation โดยใช้ Alum PACl และ  $FeCl_3$  พบว่า PACl สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุดแต่บำบัด NOM ได้น้อย สำหรับ Alum และ  $FeCl_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ได้ดี ทั้งนี้ยังพบว่า PACl สามารถบำบัดโบรไมด์ออกได้ดี ทำให้สาร THMs อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษต่ำลง

### (3) pH

Kabsch-Korbutowicz (2005) ศึกษาการบำบัดสาร NOM ด้วยกระบวนการ Coagulation โดยใช้ Alum ที่ pH ในช่วง 5.0-10.0 ผลการศึกษาพบว่าที่ pH 6.0 สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด

Qin et al. (2006) ทำการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการ Coagulation เพื่อลด NOM ในประเทศสิงคโปร์ด้วย Alum พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด NOM เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งที่ pH 5.2 มีประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ได้ร้อยละ 45 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มค่า pH มากขึ้น จนกระทั่งที่ pH 7.2 กลับมีร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ 35 สรุปว่าความแตกต่างของค่า pH มีผลโดยตรงต่อการบำบัด NOM

Uyak and Toroz (2006) ทำการบำบัด NOM ในน้ำจากแหล่งน้ำในเมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกี ด้วยกระบวนการ Coagulation เพื่อลด NOM พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำมากกว่าปริมาณสารเคมีในกระบวนการ Coagulation

### (4) ชนิดและปริมาณของสาร Flocculant

ชนิดของ Flocculant ที่นิยมใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำคือ Cation polymer เนื่องจากมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับ Coagulant คือ มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกแต่มีจำนวนมากกว่า เนื่องจากโพลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นสายยาวมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เมื่อรวมตัวกับ Flocc ที่เกิดจากเกลือของเหล็กต่าง ๆ แล้ว ทำให้มีมวลโมเลกุลใหญ่มากขึ้นน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าเป็น Anion polymer หรือ Non-ion polymer จะมีประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ได้น้อยกว่า Cation polymer

Joo et al. (2005) ทำการทดลองใช้สารเคมีในการรวมตะกอนร่วมกับโพลิเมอร์ในการลดสีของน้ำทิ้งซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวคือ Alum หรือ  $\text{FeCl}_3$  สามารถลดสีน้อยกว่าการใช้ Polymer เข้าร่วมด้วย โดยประสิทธิภาพการบำบัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารรวมตะกอน

## 2.5 คุณภาพน้ำและการใช้ที่ดินริมฝั่งแม่น้ำในกรณีตัวอย่าง

### 2.5.1 แม่น้ำแม่กลอง

ลุ่มน้ำแม่กลองตั้งอยู่ทางตอนกลางของประเทศไทย พื้นที่ส่วนใหญ่ครอบคลุมพื้นที่ 7 จังหวัด คือ จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี นครปฐม สมุทรสาคร อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา และนนทบุรี ลักษณะลุ่มน้ำวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ พื้นที่ลุ่มน้ำทั้งสิ้น 30,836 ตารางกิโลเมตร สภาพทั่วไปของลุ่มน้ำแม่กลองเป็นที่ราบลุ่มริมแม่น้ำ ซึ่งเป็นที่ราบเดียวกันกับที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา ทางฝั่งตะวันตก ตอนบนของลุ่มน้ำเป็นที่ราบเชิงเขาแต่มีระดับไม่สูงมากนัก ส่วน

ตอนกลางและตอนล่างเป็นที่ราบลุ่มติดต่อกับที่ราบลุ่มของกลุ่มน้ำท่าจีน ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยผันแปรตั้งแต่ 900-2,200 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 1,333.8 มิลลิเมตร เป็นปริมาณฝนในช่วงฤดูฝน 1,159.6 มิลลิเมตร (คิดเป็นร้อยละ 86.94) ประชากรทั้งสิ้นจำนวน 1.672 ล้านคน

พื้นที่การเกษตรในกลุ่มน้ำแม่กลอง ส่วนใหญ่เป็นการปลูกข้าวและพืชไร่ โดยเป็นพื้นที่ปลูกพืชไร่มากที่สุดถึงร้อยละ 70.80 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด โดยพื้นที่ปลูกพืชไร่ส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่ราบที่อยู่ห่างไกลแหล่งน้ำ พืชที่ปลูกรองลงมาคือ ข้าว ซึ่งมีการปลูกประมาณร้อยละ 20.59 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด โดยจะปลูกบริเวณที่ราบลุ่มตอนล่างของกลุ่มน้ำบริเวณอำเภอเมือง อำเภอโพธารามและอำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรีเป็นส่วนใหญ่ ส่วนพื้นที่การเกษตรที่เหลือมีการปลูกไม้ผล ไม้ยืนต้นแต่จำนวนไม่มากนักประมาณร้อยละ 7.83 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด (กรมชลประทาน, 2553)

## 2.5.2 แม่น้ำท่าจีน

ลุ่มน้ำท่าจีนตั้งอยู่ทางตอนกลางประเทศและอยู่ทางฝั่งขวาของแม่น้ำเจ้าพระยา พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในเขตพื้นที่ 8 จังหวัด คือ จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี นครปฐม สมุทรสาคร อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา และนนทบุรี ลักษณะลุ่มน้ำวางตัวในแนวทิศเหนือ-ใต้ พื้นที่ลุ่มน้ำทั้งสิ้น 13,681 ตารางกิโลเมตร สภาพทั่วไปของกลุ่มน้ำท่าจีนเป็นที่ราบลุ่มริมแม่น้ำ ซึ่งเป็นที่ราบเดียวกับที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาทางฝั่งตะวันตก ตอนบนของลุ่มน้ำเป็นที่เชิงเขาแต่มีระดับไม่สูงมากนัก ส่วนตอนกลางและตอนล่างเป็นที่ราบลุ่มติดต่อกับที่ราบลุ่มของกลุ่มน้ำแม่กลอง แม่น้ำท่าจีนแยกออกมาทางฝั่งขวาของแม่น้ำเจ้าพระยาที่ตำบลมะขามเต่า อำเภอวัดสิงห์ จังหวัดชัยนาท ไหลผ่านจังหวัดสุพรรณบุรี นครปฐม และออกสู่อ่าวไทยที่จังหวัดสมุทรสาคร ปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยผันแปรตั้งแต่ 800-1,500 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณฝนรายปีเฉลี่ยทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 1,040.8 มิลลิเมตรเป็นปริมาณฝนในช่วงฤดูฝน 916.9 มิลลิเมตร (คิดเป็นร้อยละ 88.10) ของปริมาณฝนทั้งปี ประชากรทั้งสิ้นจำนวน 2.579 ล้านคน

พื้นที่การเกษตรในกลุ่มน้ำท่าจีน ส่วนใหญ่เป็นการปลูกข้าวและพืชไร่ โดยเป็นพื้นที่ปลูกพืชข้าวมากที่สุดถึงร้อยละ 55.31 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด โดยพื้นที่ปลูกพืชข้าวส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่ราบลุ่มสองฝั่งลำน้ำของแม่น้ำท่าจีนซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันออกของลุ่มน้ำที่อยู่ห่างไกลแหล่งน้ำ พืชที่ปลูกในลำดับรองลงมาคือ พืชไร่มีการปลูกประมาณร้อยละ 37.57 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด โดยจะปลูกบริเวณที่ราบที่อยู่ห่างไกลแหล่งน้ำ ซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันตกของลุ่มน้ำเป็นส่วนใหญ่ ส่วนพื้นที่การเกษตรที่เหลือมีการปลูกไม้ผล ไม้ยืนต้นแต่จำนวนไม่มากนักประมาณร้อยละ 6.67 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด (กรมชลประทาน, 2553)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

Uyak and Toroz (2007) ทำการบำบัด NOM ในน้ำจากแหล่งน้ำในเมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกี ด้วยกระบวนการ Coagulation โดยใช้  $\text{FeCl}_3$  และ Alum เป็นสาร Coagulant ผลการวิจัยพบว่า  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัด THMFP และ NOM ได้ดีกว่า Alum โดยสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด THMFP และ สารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ ที่ความเข้มข้น 80 mg/L และที่ pH 5.25-5.50 ซึ่งมีร้อยละการบำบัด THMFP และ สารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 อยู่ในช่วง 52-79 34-71 และ 55-84 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP คือ DOC กับ THMFP และ UV-254 กับ THMFP มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) 0.77 และ 0.80 ตามลำดับจึงสรุปได้ว่าในแหล่งน้ำดังกล่าวมีสารอินทรีย์ในรูป UV-254 เป็นสารตั้งต้นในการเกิด THMs

Rizzo et al. (2005) ทำการศึกษาผลของปริมาณ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์ในรูป TOC UV-254 และ THMFP จากแหล่งน้ำดิบ 2 แหล่ง (S1 และ S2) ในจังหวัดซัลเลอร์โน ทางตอนใต้ของประเทศอิตาลี โดยควบคุมน้ำดิบทั้งสองให้มีค่าความขุ่น <15 NTU ค่า TOC 2.86-3.37 mg/L Alkalinity >180 mgCaCO<sub>3</sub>/L และ pH >7.8 และ TTHMs ในน้ำประปาต่ำกว่า <30 µg/L ผลการทดลองพบว่า PACl สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าทั้ง Alum และ  $\text{FeCl}_3$  ทั้งตัวอย่างน้ำ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ของทั้งตัวอย่างน้ำ S1 และ S2 เรียงลำดับดังนี้ PACl > Alum >  $\text{FeCl}_3$  และ  $\text{FeCl}_3$  > PACl > Alum ตามลำดับ ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดของตัวอย่างน้ำ S1 คือ 80 mg/L โดยให้ร้อยละการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์ในรูป TOC UV-254 อยู่ในช่วง 73-96 29-42 และ 48-56 ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดของตัวอย่างน้ำ S1 คือ 60 mg/L โดยให้ร้อยละการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์ในรูป TOC UV-254 อยู่ในช่วง 66-91 25-35 และ 45-49 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากการทดลองทั้งหมด สารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดไม่สามารถลด THMFP ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ แม้จะใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณสูงถึง 80 mg/L ก็ตาม

Musikavong et al. (2005) ศึกษาการบำบัด NOM และ THMFP ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยควบคุมความเข้มข้นของ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  ในช่วง 10-80 mg/L และที่ pH 5.0-6.5 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  40 mg/L TOC ลดลงจากค่าเฉลี่ยที่ 6.1 mg/L เหลือ 4.0 mg/L ส่วนเมื่อใช้ปริมาณ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  20 mg/L ค่า SUVA มีค่าลดลงจากค่าเฉลี่ยที่ 4.7 L/mg-m เหลือ 2 L/mg-m นอกจากนี้ถ้าใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  ที่ความเข้มข้น 80 mg/L

ที่ pH 5.5 และ 5.0 สามารถลดสาร Chloroform formation potential จากองค์ประกอบของ THMFP ได้ร้อยละ 65 และ 60 ตามลำดับ

Qin et al. (2006) ทำการศึกษาผลของ pH ในกระบวนการ Coagulation เพื่อบำบัด NOM ในน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคของประเทศสิงคโปร์ โดยทำการทดลองในช่วง pH และ ปริมาณ Alum ที่แตกต่างกัน พบว่าที่ pH 5.2 และปริมาณ Alum 5 mg/L คือสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด NOM ได้ดีที่สุด โดยสามารถบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์ในรูป DOC ได้ร้อยละ 97 และ 45 ตามลำดับ ในสภาวะเช่นเดียวกันที่ pH 7.2 สามารถลด NOM ได้เพียงร้อยละ 35 จึงสรุปว่าการบำบัด NOM จำเป็นต้องควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการบำบัด

Kabsch-Korbutowicz (2005) ทำการศึกษากการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินด้วยกระบวนการ Coagulation กับกรกรองแบบ Ultrafiltration โดยทดสอบกับสารสร้างตะกอน 3 ชนิด คือ  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $NaAlO_2$  และ PACl โดยใช้ร่วมกับเยื่อกรอง 2 ชนิด คือ Cellulose และ Polyethersulphone ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดคือ ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน และค่า pH ของน้ำ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวที่ปริมาณอลูมิเนียม  $3.59 \text{ gAl/m}^3$  pH 5.0-6.0 ทั้ง  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $NaAlO_2$  และ PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัด NOM ได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละการบำบัดในช่วง 45-62 เมื่อใช้การสร้างตะกอนร่วมกับการกรองด้วยเยื่อกรองในช่วง pH 6.0-8.0 และสามารถบำบัด NOM ได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละการบำบัดในช่วง 60-70 นอกจากนี้ยังพบว่า  $Al_2(SO_4)_3$  และ PACl มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับการกรองด้วยเยื่อกรอง แต่  $NaAlO_2$  มีประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อใช้ร่วมกับการกรองด้วยเยื่อกรอง

Kabsch-Korbutowicz (2005) ทำการศึกษาคผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด NOM ด้วยกระบวนการ Coagulation ด้วย Alum กับกรกรองแบบ Ultrafiltration ด้วยเยื่อกรอง 2 ชนิด คือ Cellulose (C) และ Polyethersulphone (PES) โดยกำหนดสภาวะการทดลองในช่วง pH 5.0-10.0 และปริมาณ Alum ที่  $25$ ,  $40$  และ  $50 \text{ g/m}^3$  หรือเท่ากับ  $1.795$ ,  $2.872$  และ  $3.590 \text{ gAl/m}^3$  พบว่าการใช้ Alum ปริมาณที่น้อยที่สุด ( $25 \text{ g/m}^3$ ) ร่วมกับการกรองด้วยเยื่อกรอง Cellulose และ Polyethersulphone มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป TOC ได้ร้อยละ 10.8 และ 59.4 ตามลำดับ ส่วนที่ปริมาณ Alum ที่สูงที่สุด ( $50 \text{ g/m}^3$ ) ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป TOC ได้ถึงร้อยละ 69.2 และ 71.6 ตามลำดับ โดย pH ที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุดคือ ที่ pH 6.0

Selcuk et al. (2005) ทำการศึกษากกระบวนการ Coagulation ด้วย Alum และ PACl ร่วมกับ Pre-ozonation โดยศึกษาเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวกับการใช้สารสร้างตะกอนร่วมกับ Pre-ozonation ต่อการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป TOC และ UV-254

นอกจากนั้นยังทำการศึกษาปริมาณโบรไมด์ต่อการเกิด DBPs ในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการบำบัด กรณีศึกษาคือ แหล่งน้ำจาก Buyukcekmece และ Omerli ในเมืองอิสตันบูล ประเทศตุรกีและแหล่งน้ำจาก Carmine ในเมือง Salerno ประเทศอิตาลี จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมต่อการบำบัด TOC ของทั้ง Alum และ PAC คือ 40 mg/L ส่วนที่ปริมาณ 80 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัด THMFP สูงที่สุด โดยมีร้อยละการบำบัด 40 นอกจากนี้พบว่าการใช้ Pre-ozonation ร่วมกับการสร้างตะกอนทั้ง Alum และ PAC ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด TOC และ THMFP สูงขึ้น สำหรับการศึกษาปริมาณโบรไมด์ต่อการเกิด DBPs พบว่าการเพิ่มปริมาณโบรไมด์มีผลต่อการเกิด DBPs โดยที่ความเข้มข้นโบรไมด์ 0.15 Br<sup>-</sup>/TOC มีผลต่อการเกิด DBPs มากที่สุด

Zhonglian et al. (2010) ทำการศึกษาผลของ pH และ ปริมาณอลูมิเนียมในกระบวนการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำจากแม่น้ำเหลือง มณฑลซานตง ประเทศจีน ด้วยสารสร้างตะกอน Alum และ PACl โดยการวัดปริมาณอลูมิเนียมคงเหลือ ผลการทดลองพบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่า Alum โดยที่ pH 6.0 และ ปริมาณสาร 15 mg/L ทั้ง Alum และ PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 ได้ดีที่สุดในร้อยละการบำบัดที่ 94.5 34.8 และ 53.5 ตามลำดับ การเปรียบเทียบปริมาณคงเหลือของอลูมิเนียมในน้ำพบว่าที่ pH 6.0-8.0 มีปริมาณคงเหลือของอลูมิเนียมในน้ำปริมาณต่ำของสารทั้งสองชนิดสรุปว่า pH หรือปริมาณของสารสร้างตะกอนทั้ง Alum และ PACl มีผลต่ออลูมิเนียมคงเหลือในน้ำ โดยพบว่าการบำบัดด้วย PACl มีอลูมิเนียมคงเหลือน้อยกว่าการบำบัดด้วย Alum

สุรพงษ์ (2004) ทำการศึกษาถึงความน่าจะเป็นที่จะพบ THMs ในน้ำประปาที่ผลิตจากการประปาขนาดเล็กที่ใช้น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำอ่างแก้วและอ่างเก็บน้ำแม่เหียะ จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้กระบวนการ Coagulation การตกตะกอนร่วมการกรอง และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าน้ำประปาที่ผลิตได้จากการประปาทั้ง 2 แห่งตรวจพบ THMs 60.0 และ 62.5 µg/L ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง NOM กับสาร THMs พบว่า มีความสัมพันธ์กันอย่างชัดเจน โดยแสดงได้จากสมการ  $THMs = 37.70 + 14.32 TOC$  ซึ่งมีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.62 และพบว่าร้อยละ 85 ของน้ำประปาที่ผลิตได้มีค่า THMs ต่ำกว่า 80 µg/L และร้อยละ 11 ของน้ำประปาที่ผลิตได้มีค่า THMs ต่ำกว่า 40 µg/L ส่วนประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัด TOC DOC UV-254 และความขุ่นคือ ร้อยละ 48 32 47 และ 98 ตามลำดับ

### บทที่ 3

#### การทดลอง

### 3.1 เครื่องมือและวัสดุ

#### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) Gas Chromatograph ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น HS 40 XL Auto System XL Gas Chromatograph ในการวิเคราะห์ THMs 1 ทั้ง 4 ชนิดใช้คอลัมน์ Supelco 241 35-U PTE<sup>tm</sup>-5, carrier gas N<sub>2</sub> และ He อัตราการไหล 2 มล./นาที Injection temperature 220 °C Oven temperature 55 °C 15 นาที Detector temperature 300 °C TOC analyzer ยี่ห้อ Tekmar Dohrmann รุ่น Phoenix 8000 The UV-Persulfate TOC Analyzer

(2) Spectrophotometer ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530 UV-VIS Spectrophotometer

(3) Ion chromatograph ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 761 Compact IC ใช้คอลัมน์ Merosep Anion dual 2, Conductivity detector

(4) pH Meter ยี่ห้อ Eutech รุ่น Cyber Scan PC 510

(5) Turbidimeter ยี่ห้อ HACH รุ่น 2100 P

(6) Jar Test or Flocculator ยี่ห้อ ISCO รุ่น JF/6

(7) Vacuum pump ยี่ห้อ Gast รุ่น 0211-V45F-G230CX

#### 3.1.2 สารเคมี

(1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

(2) โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaOCl)

(3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

(4) โซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

(5) กรดอะซิติกเข้มข้น (Conc.CH<sub>3</sub>COOH)

(5) น้ำแข็ง

(6) ฟอสเฟตบัพเฟอร์

(7) โซเดียมไธโอซัลเฟต (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

(8) อะลูมิเนียมซัลเฟต (Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.18H<sub>2</sub>O)

(9) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

(10) เฟอริกคลอไรด์ FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O

(11) แอนไอออน โพลิเมอร์ (Anion polymer) ชนิด Polyacrylamide

(12) กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )

(13) โพแทสเซียมไอโอไดร (KI)

(14)  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$

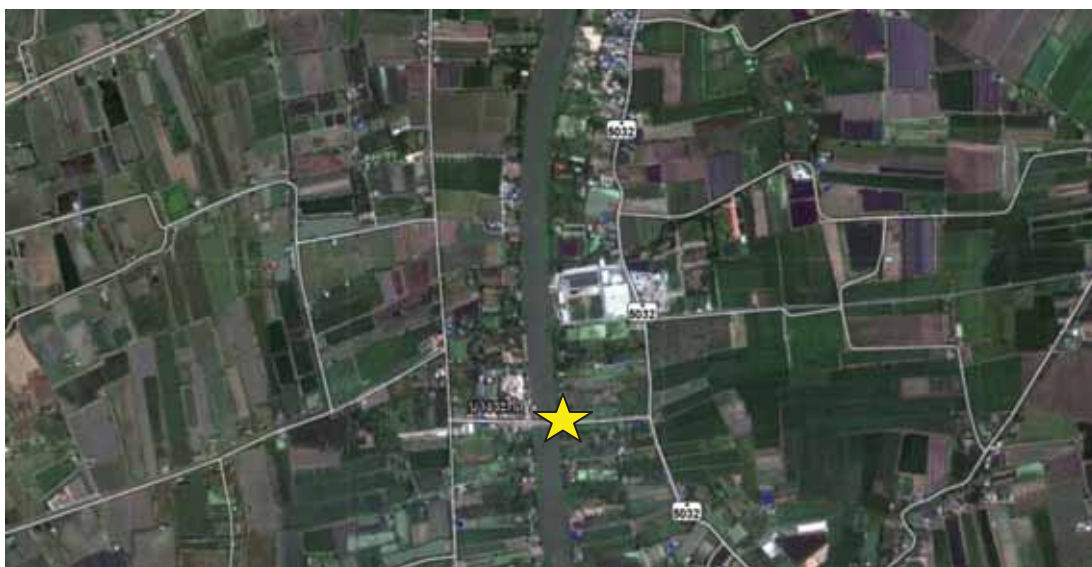
### 3.2 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.2.1 จุดเก็บตัวอย่างและวิธีเก็บตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ได้ทำการบำบัดน้ำจากแหล่งน้ำ 2 แหล่ง คือแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำหลักของพื้นที่ภาคตะวันตก โดยทำการเก็บตัวอย่าง ณ จุดสูบน้ำดิบเข้าโรงบำบัด น้ำขนาดใหญ่ 2 แห่ง จุดเก็บตัวอย่างน้ำทั้ง 2 จุด ได้แก่ แม่น้ำแม่กลอง เก็บตัวอย่างน้ำบริเวณ หมู่ 1 ต.แพงพวย อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี (ดังภาพที่ 8) และแม่น้ำท่าจีนเก็บตัวอย่างน้ำบริเวณต.บางระกำ อ.บางเลน จ.นครปฐม (ดังภาพที่ 9)



ภาพที่ 8 จุดเก็บตัวอย่างน้ำแม่น้ำแม่กลอง บริเวณ หมู่ 1 ต.แพงพวย อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี  
หมายเหตุ สัญลักษณ์ดาวคือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำ



ภาพที่ 9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำแม่น้ำท่าจีนบริเวณ ต.บางระกำ อ.บางเลน จ.นครปฐม  
หมายเหตุ สัญลักษณ์ดาวคือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำแต่ละจุดจะทำแบบจ้วงตัก (Grab sampling) โดยเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวให้ได้ปริมาณที่เพียงพอต่อการทดลอง การเก็บตัวอย่างจะทำในเดือนกรกฎาคมซึ่งเป็นช่วงที่ฝนตกชุกและน้ำดิบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง (การประปานครหลวง, 2554) เก็บรักษาตัวอย่างน้ำโดยบรรจุในภาชนะที่ทำจากโพลีเอทิลีนเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

### 3.2.2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

#### (1) วิธีการรักษาตัวอย่าง

วิธีการรักษาตัวอย่างเป็นไปตามวิธีมาตรฐานของบ APHA, AWWA, and WEF (1998) ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 4

#### (2) วิธีการวิเคราะห์

วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นไปตาม APHA, AWWA, and WEF (1998) ดังตารางที่ 5

##### (2.1) ค่า pH

วัดค่า pH ของน้ำทั้งก่อนนำมาทำ Jar test และหลังทำ Jar test ด้วยเครื่อง pH meter ยี่ห้อ Eutech รุ่น cyber scan 510 PC

ตารางที่ 4 การรักษาดัวอย่าง (Preservation)

| พารามิเตอร์                                    | การรักษาดัวอย่าง (Preservation)                                                             |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH                                             | วิเคราะห์ก่อนการทำ Jar test                                                                 |
| ความขุ่น (Turbidity)                           | แช่น้ำที่ 4 °C เก็บได้ 24 ชม.                                                               |
| UV-254                                         | แช่น้ำที่ 4 °C เก็บได้ 48 ชม.                                                               |
| สารอินทรีย์ทั้งหมด ( Total organic carbon)     | เติม Conc.H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ให้ pH<2                                           |
| สารอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon) |                                                                                             |
| Trihalomethanes                                | เติม HCl 1+1 จน pH<2                                                                        |
| Trihalomethanes formation potential            | + 0.1 N Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3 ml<br>แช่น้ำที่ 4 °C เก็บได้ 14 วัน |
| โบรไมด์ไอออน                                   | แช่น้ำที่ 4 °C เก็บได้ 28 วัน                                                               |

ที่มา: APHA, AWWA, and WEF (1998)

**(2.2) ความขุ่น (Turbidity)**

วัดความขุ่นของน้ำทั้งก่อนทำ Jar test และหลังทำ Jar test ด้วยเครื่องวัดความขุ่นยี่ห้อ Hach 2100 P

**(2.3) ค่า UV-254**

นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 253.7 nm โดยใช้เครื่อง UV-visible Spectrophotometer, Jasco V-530

**(2.4) คาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) และ คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (Dissolved organic carbon, DOC)**

วิเคราะห์ TOC และ DOC ด้วยเครื่อง TOC analyzer ยี่ห้อ Tekmar-Dohrman Phoenix 8000 สำหรับการวิเคราะห์ TOC ทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างโดยไม่ผ่านการกรอง แต่สำหรับ DOC ต้องนำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 0.45 µm ก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ TOC

### (2.5) สารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes, THMs)

วิเคราะห์ความเข้มข้นของสาร THMs ทั้ง 4 ชนิด คือ คลอโรฟอร์ม (Chloroform,  $\text{CHCl}_3$ ) โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane,  $\text{CHCl}_2\text{Br}$ ) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane,  $\text{CHClBr}_2$ ) และ โบรโมฟอร์ม (Bromoform,  $\text{CHBr}_3$ ) โดยเปิดน้ำตัวอย่างมา 5 ml ใส่ขวด vial ที่มี 0.5 g โซเดียมซัลเฟต แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Head-space gas chromatograph ECD detector ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Autosystem XL โดยใช้คอลัมน์ Supelco 241 35-U PTE<sup>™</sup>-5, carrier gas  $\text{N}_2$  และ He อัตราการไหล 2 มล./นาที Injection temperature 220 °C Oven temperature 55 °C 15 นาที Detector temperature 300 °C

### (2.6) ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes formation potential, THMFP)

THMFP คือ ค่าที่คำนวณจากความแตกต่างระหว่าง ความเข้มข้นของ THMs เริ่มต้น (Inst THMs) กับความเข้มข้นของ THMs เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยากับคลอรีน (Term THMs) โดยจะเป็นการเปรียบเทียบ THMFP จากสัดส่วนกับปริมาณของสารตั้งต้นทั้งหมด ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความเสี่ยงของผู้บริโภคที่จะได้รับ THMs รายละเอียดการวิเคราะห์แสดงดังภาคผนวก ข ภาพที่ 50

Instantaneous trihalomethanes (Inst THMs) concentration หมายถึง ความเข้มข้นของ THMs ในน้ำซึ่งวัดในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่าง ซึ่งอาจจะเป็นความเข้มข้นของสารในกลุ่ม THMs แต่ละตัว หรือเป็นผลรวมของความเข้มข้นของสารในกลุ่ม THMs ที่พบทั้งหมดก็ได้ ถ้าเป็นผลรวมจะใช้คำว่า Total trihalomethanes (TTHM) ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าที่กล่าวถึงในการกำหนดค่ามาตรฐานของข้อบังคับต่าง ๆ

Terminal trihalomethanes (Term THMs) concentration หมายถึง ความเข้มข้นของ THMs ที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนและสารตั้งต้น (Precursor) ในสภาวะต่าง ๆ ตามแต่การบำบัดของระบบประปา นั้น ๆ เป็นค่าที่ใช้มากกับการประเมินผลการปรับปรุงระบบประปาต่าง ๆ โดยมากจะเป็น THMs ที่ได้จากการนำน้ำตัวอย่างมาเก็บไว้ระยะเวลาหนึ่งที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิที่แน่นอนจนปฏิกิริยาไม่เกิดขึ้นต่อไป

### (2.7) โบรไมด์ไอออน

การวิเคราะห์โบรไมด์ไอออนตัวอย่างน้ำต้องผ่านการกรองก่อนด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูพรุน 0.45  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ion Chromatograph ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 761 Compact IC ใช้คอลัมน์ Metrosep Anion dual 2, Conductivity

ตารางที่ 5 วิธีการรักษาตัวอย่างและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

| พารามิเตอร์ | วิธีการรักษาตัวอย่าง                     | เครื่องมือ           | วิธีมาตรฐาน                     |
|-------------|------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| Turbidity   | แช่เย็นในที่มืดวิเคราะห์ภายใน 24 ชั่วโมง | Turbidity meter      | Turbidimeter                    |
| pH          | วัดทันที                                 | pH meter             | pH meter วิเคราะห์ ณ จุดเก็บน้ำ |
| TOC         | ปรับ pH ให้ต่ำกว่า 2<br>แช่เย็นที่ 4 °C  | TOC analyzer         | Standard Method 5310 B          |
| DOC         | ปรับ pH ให้ต่ำกว่า 2<br>แช่เย็นที่ 4 °C  | TOC analyzer         | Standard Method 5310 B          |
| THM         | ปรับ pH ให้ต่ำกว่า 2<br>แช่เย็น          | GC-ECD               | Standard Method 5710 B          |
| THMFP       | ปรับ pH ให้ต่ำกว่า 2<br>แช่เย็น          | GC-ECD               | Standard Method 5710 B          |
| UV-254      | แช่เย็นที่ 4 °C                          | UV Spectrophotometer | Standard Method 5910 B          |

ที่มา: APHA, AWWA, and WEF (1998)

### 3.2.3 วิธีการวิจัย

#### (1) วิธีการทดลอง

(1.1) เก็บตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีนบริเวณจุดสูบน้ำเพื่อนำไปผลิตน้ำประปาประมาณ 200 ลิตรเพื่อใช้ในการทดลองทั้งหมด โดยจัดเก็บใส่ถังโพลีเอทิลีนขนาด 20 ลิตร 10 ถัง เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ ค่า pH อุณหภูมิ ความขุ่น ค่า TOC ค่า DOC ค่า UV-254 ค่า THMFP ของน้ำดิบ

(1.2) นำตัวอย่างน้ำมาทำการทดลองด้วย Jar test รายละเอียดขั้นตอนการทำ Jar test แสดงในหัวข้อ (2) และภาพที่ 10 สถานะการทดลองที่วางแผนไว้ในตารางที่ 4 โดยทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารสร้างตะกอน ปริมาณของสารสร้างตะกอน ปริมาณ Anion polymer และ pH

(1.3) เมื่อเสร็จขั้นตอนการทำ Jar test แล้วนำน้ำตัวอย่างบริเวณกึ่งกลางบีกเกอร์มาวิเคราะห์หาค่า pH ความขุ่นและนำน้ำที่เหลือมากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C แล้วนำมาวิเคราะห์ค่า DOC และ UV-254 สำหรับการทดลองชุดที่ 4 วิเคราะห์ ค่า TOC THMFP เพิ่มเติม

(1.4) เก็บตัวอย่างน้ำจากกระบวนการประปา ที่จุดน้ำออกจากถังกรองทรายก่อนเดิมคลอรีนเพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ (1.3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์

#### (2) วิธีการทำการทดลองด้วย Jar test

งานวิจัยนี้จะปรับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ได้แก่ ชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน ปริมาณสารรวมตะกอนและ pH ของน้ำ ในการทดลองใช้สารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ สารส้ม (Alum) หรืออลูมิเนียมซัลเฟต มีสูตรโมเลกุล  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$  สาร Polyaluminium chloride (PACl) และสาร Ferric chloride หรือ  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  และใช้สารรวมตะกอน 1 ชนิด คือ Anion polymer ชนิด Polyacrylamide และกำหนดความเข้มข้นของสารเคมีต่าง ๆ ให้สัมพันธ์กับความขุ่นของน้ำตัวอย่างเพื่อให้ตกตะกอนได้ดีที่สุด โดยครอบคลุมในช่วงที่บำบัดความขุ่นได้ดี

ขั้นตอนการทำการทดลองด้วย Jar test มีแสดงดังภาพที่ 10

- กวนผสมน้ำดิบที่เก็บตัวอย่างมาแล้วให้เข้ากันดี
- ปรับ pH ให้ได้ตามต้องการด้วย 1 N NaOH และ 1N HNO<sub>3</sub>
- เทน้ำใส่ลงในบีกเกอร์ ๆ ละ 1 ลิตร
- นำแต่ละบีกเกอร์วางบนเครื่อง Jar Tester (ดังภาพที่ 11) ปรับให้ใบพัดอยู่ที่

ส่วนล่างของบีกเกอร์

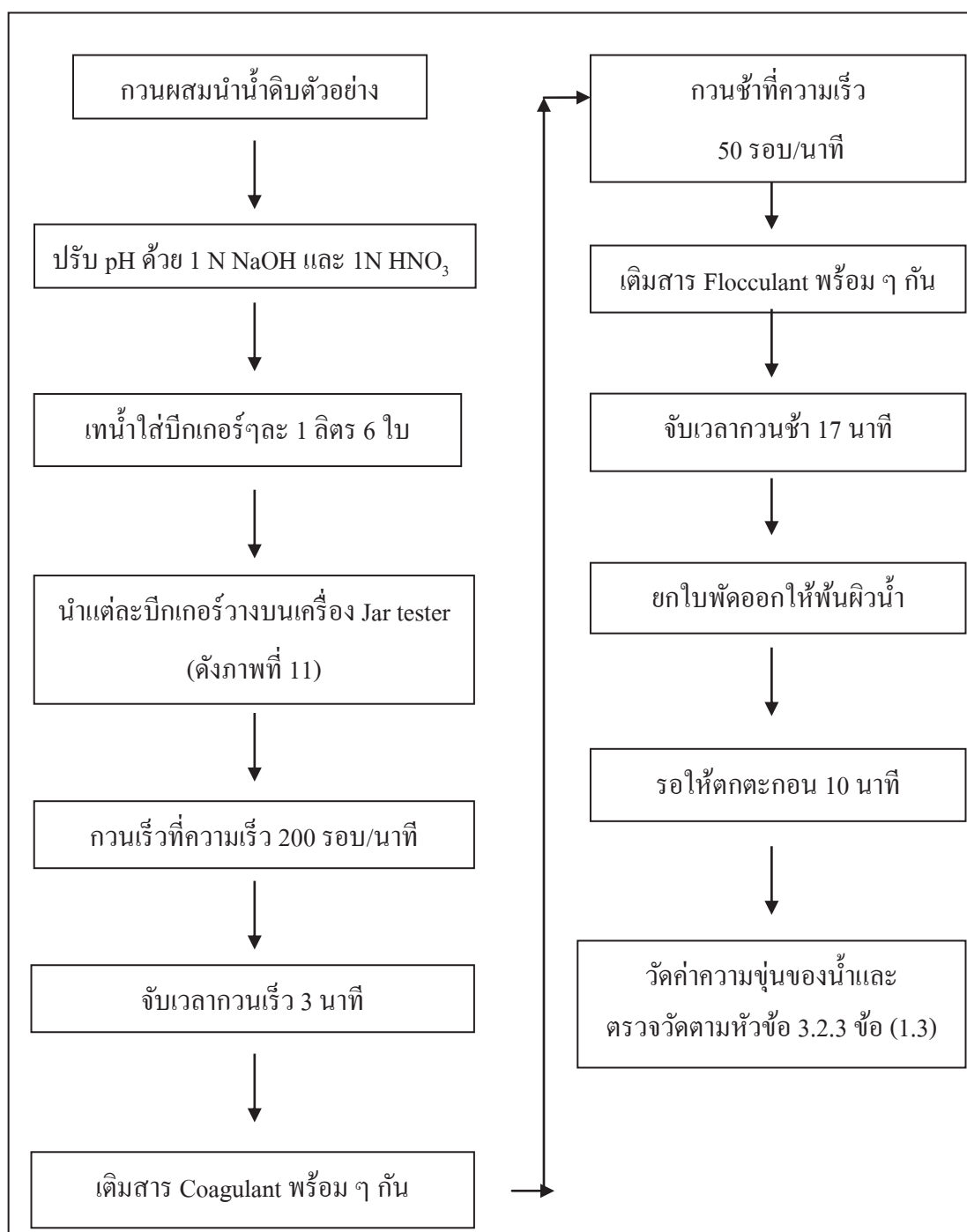
- เปิดให้ใบพัดหมุนทำงานที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที โดยความเร็วรอบและระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบคำนวณมาจากระบบการผลิตน้ำประปาเพื่อสร้างค่าความปั่นป่วนของน้ำให้ได้ใกล้เคียงกับระบบจริงเป็นการจำลองขั้นตอนการผสมในเส้นท่อของระบบผลิต

- เติมสาร Coagulant ลงในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบในเวลาพร้อมๆกันเริ่มจับเวลาการกวนเร็ว ทำการกวนเร็วเป็นเวลา 3 นาที

- ปรับลดความเร็วรอบการหมุนของใบพัดให้เหลือ 50 รอบ/นาที แล้วเติมสาร Flocculant ลงในบีกเกอร์ทั้ง 6 ใบในเวลาพร้อมๆกันเริ่มจับเวลาการกวนช้า ทำการกวนช้าเป็นเวลา 17 นาที เช่นเดียวกันในการกวนช้าจะคำนวณระยะเวลากับความเร็วรอบให้สัมพันธ์กับระบบการผลิตน้ำประปาเป็นการจำลองขั้นตอนการสร้างตะกอนในระบบผลิต แล้วหยุดการกวน

- ยกใบพัดออกจากบีกเกอร์ให้พ้นผิวน้ำ

- ตั้งรอให้ตกตะกอน 10 นาที ทำการวัดค่าความขุ่นของน้ำโดยใช้ปิเปตดูดตัวอย่างน้ำจากบริเวณกึ่งกลางบีกเกอร์มาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ และบันทึกผล



ภาพที่ 10 สรุปขั้นตอนการทำ Jar test



ภาพที่ 11 เครื่อง Jar Tester

### (3) สถานะการทดลองด้วย Jar Tester

สำหรับน้ำในแหล่งน้ำแต่ละแหล่งทำการทดลองด้วยสาร Coagulant 3 ชนิด ได้แก่ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  สำหรับแต่ละสารแบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลองดังตารางที่ 6 โดยทำการปรับเปลี่ยนต่าง ๆ ดังนี้

ชุดที่ 1 ปรับเปลี่ยน Coagulant dosage

ชุดที่ 2 ปรับเปลี่ยน pH ตั้งต้นครั้งที่ 1

ชุดที่ 3 ปรับเปลี่ยน Polymer dosage

ชุดที่ 4 ปรับเปลี่ยน pH ตั้งต้นครั้งที่ 2

ตารางที่ 6 สภาวะการทดลองด้วย Jar Tester

| บิก<br>เกอร์ | การทดลองที่ 1               |               |                           | การทดลองที่ 2               |               |                           | การทดลองที่ 3               |               |                           | การทดลองที่ 4               |               |                           |
|--------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|
|              | Coagulant<br>Dose<br>(mg/L) | pH<br>ตั้งต้น | Polymer<br>Dose<br>(mg/L) | Coagulant<br>Dose<br>(mg/L) | pH<br>ตั้งต้น | Polymer<br>Dose<br>(mg/L) | Coagulant<br>Dose<br>(mg/L) | pH<br>ตั้งต้น | Polymer<br>Dose<br>(mg/L) | Coagulant<br>Dose<br>(mg/L) | pH<br>ตั้งต้น | Polymer<br>Dose<br>(mg/L) |
| 1            | 10                          | 7.0           | 0.10                      | a                           | 4.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.05                      | a                           | b-1.00        | c                         |
| 2            | 20                          | 7.0           | 0.10                      | a                           | 5.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.10                      | a                           | b-0.50        | c                         |
| 3            | 40                          | 7.0           | 0.10                      | a                           | 6.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.15                      | a                           | b             | c                         |
| 4            | 60                          | 7.0           | 0.10                      | a                           | 7.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.20                      | a                           | b+0.50        | c                         |
| 5            | 80                          | 7.0           | 0.10                      | a                           | 8.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.25                      | a                           | b+1.00        | c                         |
| 6            | 100                         | 7.0           | 0.10                      | a                           | 9.0           | 0.10                      | a                           | b             | 0.30                      | a                           | b+1.50        | c                         |

a คือ ปริมาณสารส้มที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 1

b คือ ค่า pH ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2

c คือ ปริมาณ Polymer ที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 สมบัติของน้ำดิบ

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าน้ำดิบของทั้ง 2 แม่น้ำ มี pH และความขุ่นใกล้เคียงกัน ส่วนสารอินทรีย์ในรูป DOC UV-254 และ THMFP พบว่าแม่น้ำท่าจีนตรวจพบในปริมาณมากกว่าแม่น้ำแม่กลอง และสำหรับ THMs ตรวจไม่พบทั้งสองแม่น้ำ

ตารางที่ 7 สมบัติของน้ำดิบ

| สมบัติของน้ำ                   | แม่น้ำแม่กลอง | แม่น้ำท่าจีน  |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| pH                             | 7.48-7.71     | 7.21-7.83     |
| Turbidity (NTU)                | 12.60-18.50   | 7.63-33.00    |
| DOC (mg/L)                     | 1.39-3.59     | 2.06-7.92     |
| UV-254 ( $\text{cm}^{-1}$ )    | 0.0400-0.2036 | 0.0778-0.2690 |
| Total THMs ( $\mu\text{g/L}$ ) | ND            | ND            |
| THMFP                          | 83.78         | 106.53        |

หมายเหตุ ค่า ND=Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม THMs แต่ละชนิดคือ  $\text{CHCl}_3$

$\text{CHBrCl}_2$   $\text{CHBr}_2\text{Cl}$  และ  $\text{CHBr}_3$  เท่ากับ 0.03 0.05 0.05 และ 0.05  $\mu\text{g/L}$  ตามลำดับ

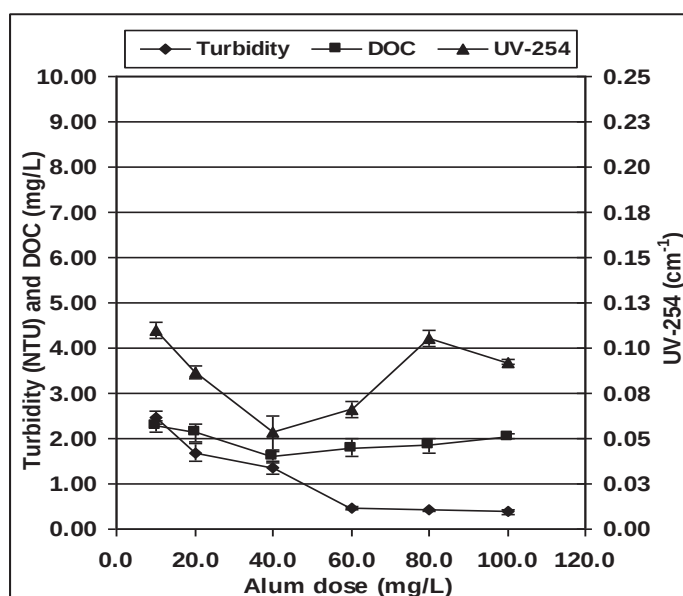
#### 4.2 แม่น้ำแม่กลอง

##### 4.2.1 การสร้างและรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate, Alum)

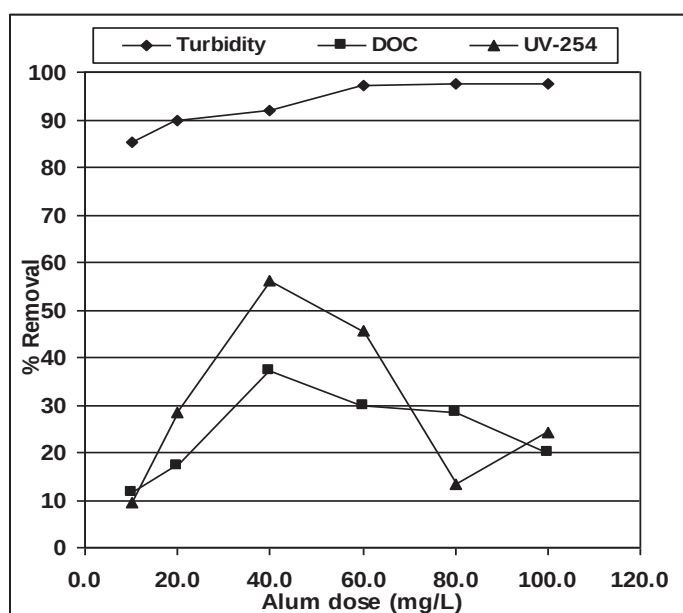
###### (1) ผลของปริมาณ Alum

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสม กำหนดให้ความเข้มข้นของ Alum อยู่ระหว่าง 10.0-100.0 mg/L และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 12 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum มีผลให้ความขุ่นและค่า DOC มีแนวโน้มลดลง ส่วนค่า UV-254 มีแนวโน้มไม่แน่นอน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 13 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum มีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 97.70 37.19 และ 56.01 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Qin et al. (2006) ทำการศึกษา

กระบวนการ Coagulation เพื่อบำบัด NOM ในน้ำของประเทสิงคโปร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum ในการทำ Jar test ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จากการทดลองนี้จึงเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมในการด้วย Alum 40.0 mg/L ปริมาณนี้ไปทำการทดลองในตอนต่อไป



ภาพที่ 12 ผลของปริมาณ Alum ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำแม่กลอง (หมายเหตุ ภาพที่ 12 ถึง 13 ควมคุม: pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L)

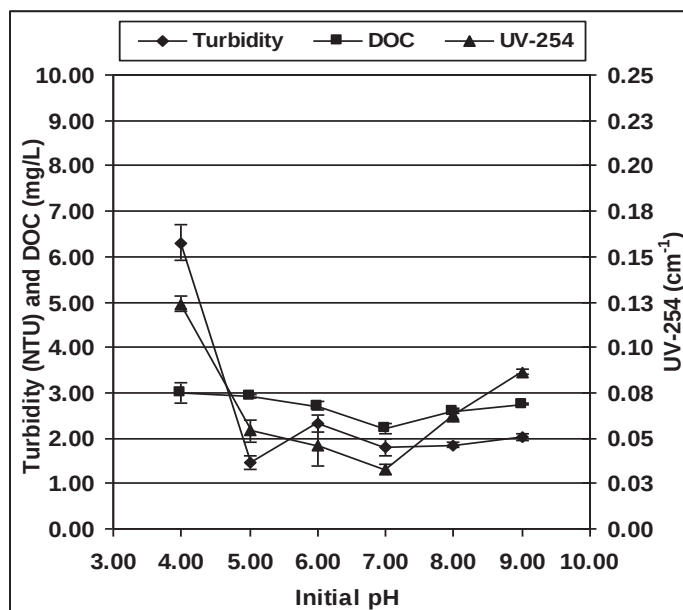


ภาพที่ 13 ผลของปริมาณ Alum ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำแม่กลอง

## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

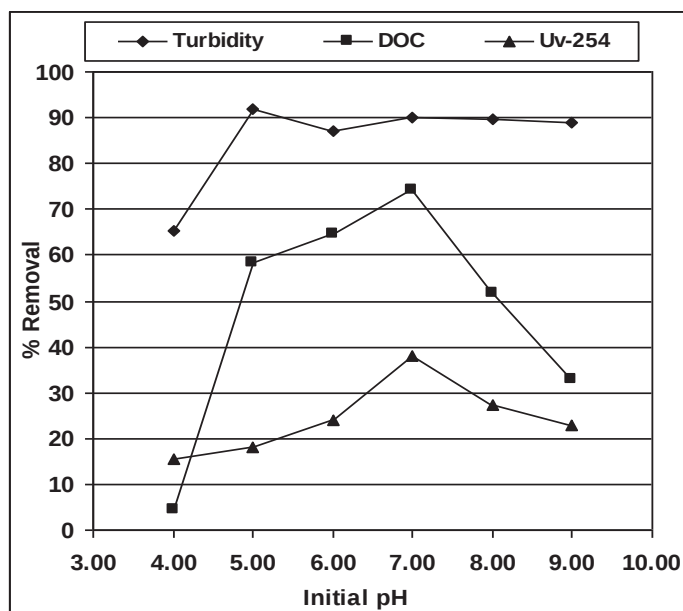
เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมโดยทำการทดลองช่วง pH 4.0-9.0 และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ Alum=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 14 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 5.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดี ส่วนที่ pH ตั้งต้น 7.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 15 พบว่า pH 7.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นดีกว่าการบำบัดสารอินทรีย์ โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 91.93 37.99 และ 74.30 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kabsch-Korbutowicz (2005) ซึ่งทำการบำบัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการสร้างตะกอนด้วยสารสร้างตะกอน 3 ชนิดคือ Alum  $\text{NaAlO}_2$  และ PACl พบว่าในช่วง pH 6.0-8.0 สารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมมีการละลายต่ำในช่วง pH 5.7-6.2 ในขณะเดียวกันถ้าความเข้มข้นของอลูมิเนียมมากเกินไปอลูมิเนียมจะคงอยู่ในรูปตะกอนวุ้น  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งทำให้บำบัดความขุ่นได้ดี และถ้า pH อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 5.7 อลูมิเนียมจะละลายน้ำอยู่ในรูปประจุบวก เช่น  $\text{Al}^{3+}$   $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$   $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  จึงเกิดการสะเทินประจุที่ผิวของคอลลอยด์ แต่ถ้า pH อยู่ในช่วงเบสสารนี้จะอยู่ในรูป  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ดังภาพที่ 2-7 ดังนั้นในช่วง pH ที่เหมาะสม กลไกหลักจึงเป็นการสะเทินประจุที่ผิวคอลลอยด์ การดูดซับบนผิวคอลลอยด์และกลไก Sweep Coagulation จึงจะสามารถทำให้คอลลอยด์ตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี (Gregor et al. 1997 อ้างโดย มัลลิกา และพ่องศรี, 2550 and Jinming and John, 2003)

สำหรับสารประกอบอิมิกที่ pH ต่ำจะเกิดการ Protonation ของสารอินทรีย์เปลี่ยนรูปให้มีความเป็น Hydrophobic สูงขึ้นจึงเกิดการตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี แต่ที่ pH สูงสารประกอบอิมิกจะมีประจุลบและอลูมิเนียมจะอยู่ในรูป  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และ  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  จึงไม่เกิดกลไกการสะเทินประจุแต่จะเกิดเฉพาะกลไกการดูดซับบน Floc เท่านั้น ดังนั้นทั้งสภาวะที่ pH ต่ำหรือสูงจนเกินไปจึงเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการบำบัดสารอินทรีย์ แต่จะที่ pH ช่วงหนึ่งที่ทำให้อลูมิเนียมอยู่ในรูปอ้อนบวกในรูปต่าง ๆ และสารประกอบอิมิกมีประจุลบซึ่งสามารถรวมตัวกันเกิดการตกตะกอน (Precipitation) ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gregor et al. (1997) อ้างโดยมัลลิกาและพ่องศรี (2550) จากการทดลองนี้จึงเลือก pH ตั้งต้น 7.0 เป็น pH ตั้งต้นในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยสารตกตะกอน Alum ไปทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 14 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง

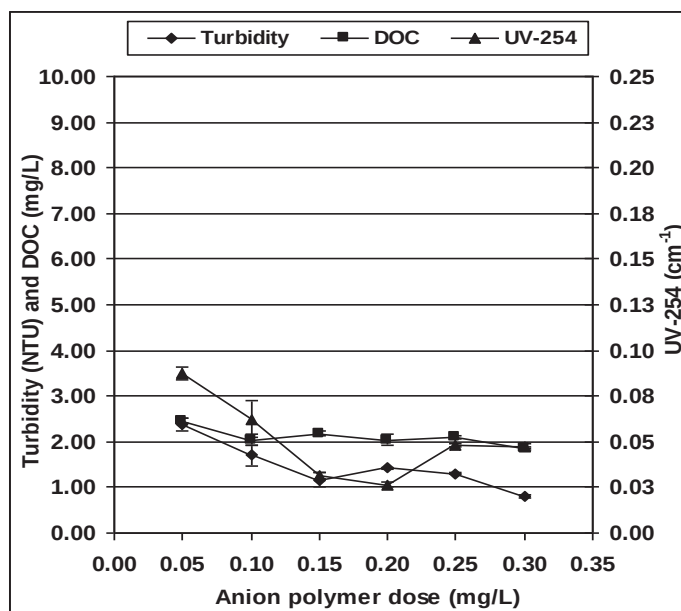
(หมายเหตุ ภาพที่ 14 ถึง 15 ควมคุม: Alum=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 15 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง

### (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

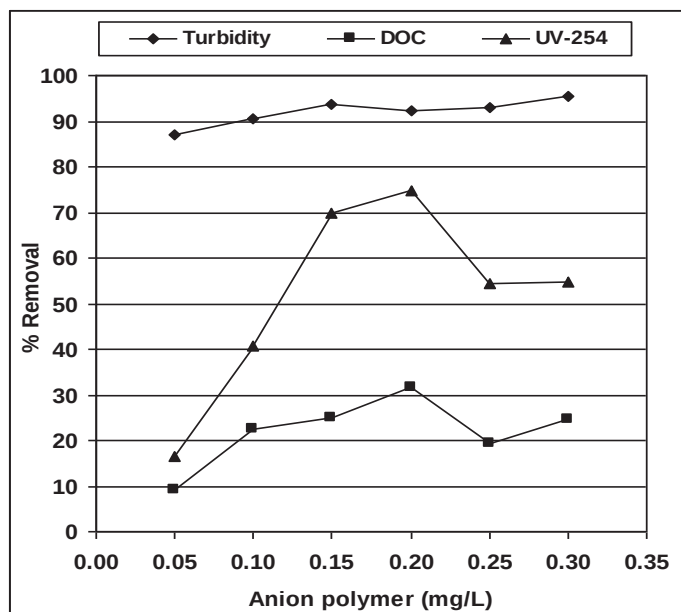
เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L โดยเลือกใช้ polymer ชนิด Anion polymer ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้จริงในระบบประปาและควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Alum=40.0 mg/L จากภาพที่ 16 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Polymer สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 17 พบว่าที่ความเข้มข้น Anion polymer 0.2 mg/L สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 ส่วนสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 มีร้อยละการบำบัดคือ 31.75 และ 74.79 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์ถูกสะเทินประจุไปแล้ว เพราะฉะนั้นไม่ว่าจะเลือกใช้ Cation polymer หรือ Anion polymer ประสิทธิภาพจึงไม่แตกต่างกัน ซึ่งแตกต่างกับกรณีของสารประกอบอิมิกที่ละลายน้ำแล้วมีประจุลบ จึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุของสารประกอบอิมิกและประจุลบของ Anion polymer จึงไม่สามารถรวมตัวกันแล้วตกตะกอนได้ (มัลลิกา และพ้องศรี, 2550) จากการทดลองนี้จึงเลือกปริมาณ Anion polymer 0.20 mg/L ไปทำการทดลองในตอนต่อไป



ภาพที่ 16 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย

Alum ของแม่น้ำแม่กลอง

(หมายเหตุ ภาพที่ 16 ถึง 17 ควบคุม: Alum=40.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=7.0)

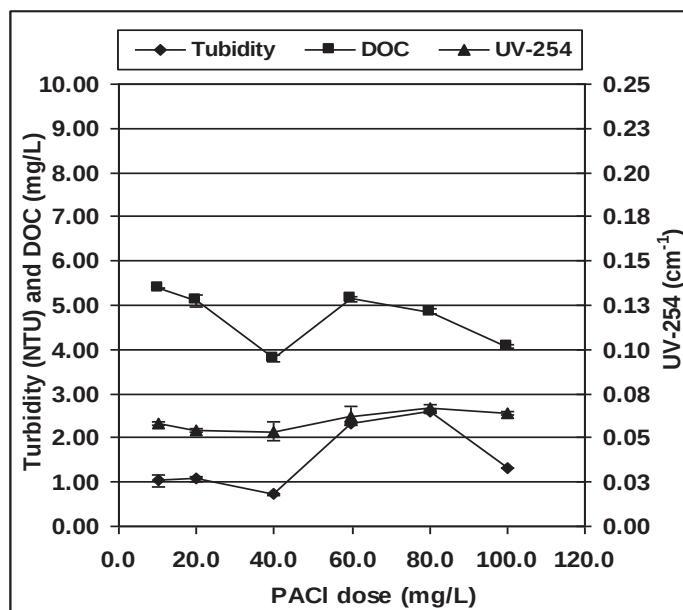


ภาพที่ 17 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำแม่กลอง

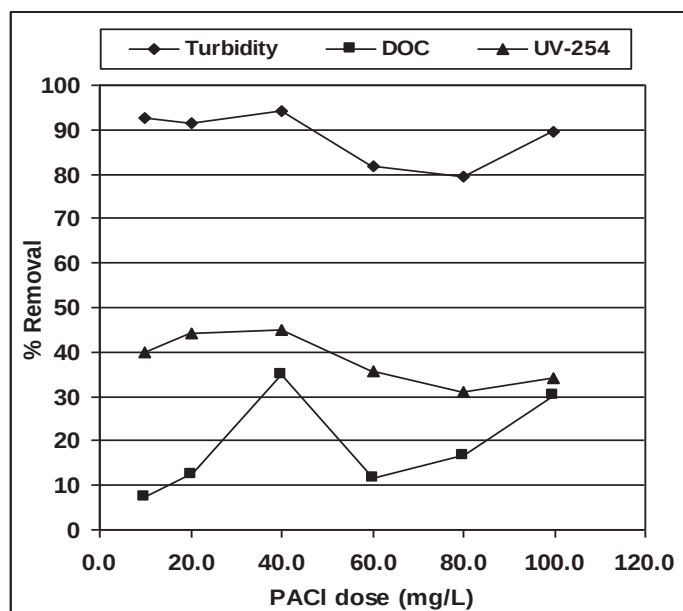
#### 4.2.2 การสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

##### (1) ผลของปริมาณ PACl

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ PACl ที่เหมาะสม โดยในการทดลองจะใช้ความเข้มข้นของ PACl ตั้งแต่ 10.0-100.0 mg/L และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 18 พบว่าที่ความเข้มข้นของ PACl 40.0 mg/L สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ลดลงในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 19 พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าค่าสารอินทรีย์ โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 94.29 34.81 และ 44.90 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhonglian et al. (2010) ซึ่งทำการศึกษาการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์โดยกระบวนการ Coagulation ด้วย PACl และ Alum กรณีศึกษาคือ แม่น้ำเหลือง ประเทศจีน พบว่าทั้ง PACl และ Alum มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 จากการทดลองนี้จึงเลือกปริมาณความเข้มข้น PACl ที่ 40.0 mg/L ไปทำการทดลองในตอนต่อไป



ภาพที่ 18 ผลของปริมาณ PACI ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำแม่กลอง  
(หมายเหตุ ภาพที่ 18 ถึง 19 ควมคุม: pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L)

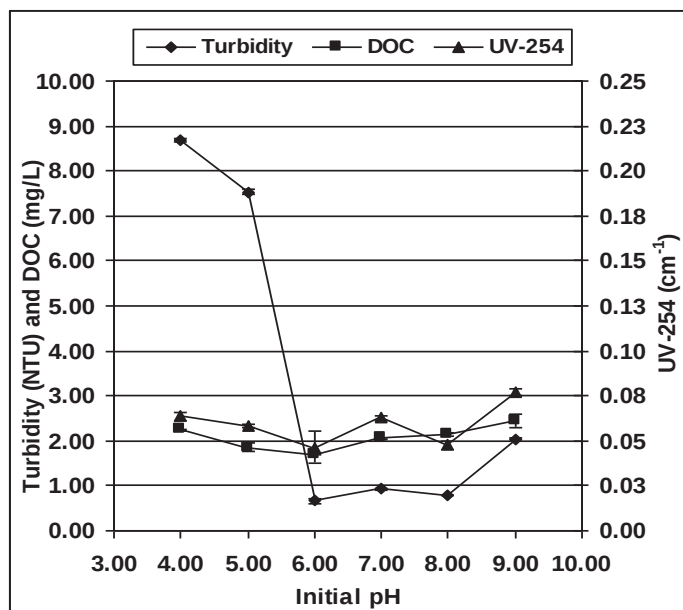


ภาพที่ 19 ผลของปริมาณ PACI ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ของแม่น้ำแม่กลอง

## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

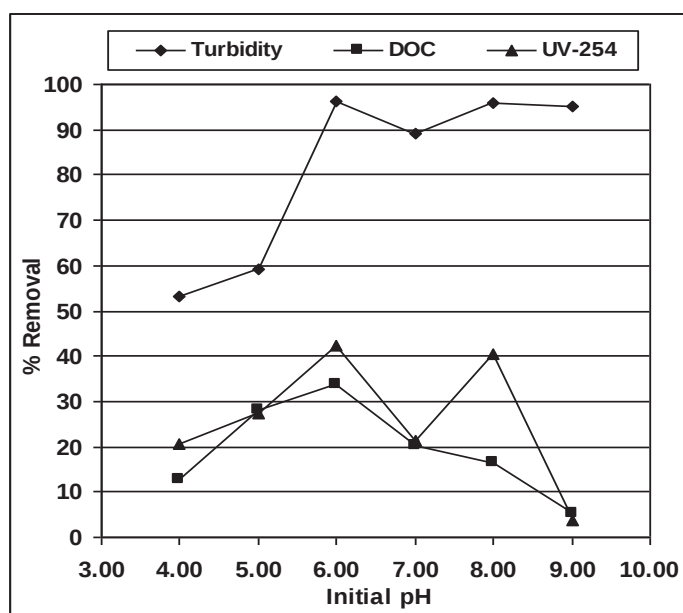
เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมโดยทำการทดลองในช่วง pH 4.0-9.0 และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ PACI=40.0 mg/L และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 20 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 6.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 21 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 6.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าสารอินทรีย์ โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 96.43 33.88 และ 42.23 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhonglian et al. (2010) ซึ่งทำการศึกษาการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์โดยกระบวนการ Coagulation ด้วย PACI และ Alum กรณีศึกษาคือ แม่น้ำเหลือง ประเทศจีน พบว่าที่ pH 6.0 PACI มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 ได้ดี โดยมีร้อยละการบำบัดคือ 86 45 และ 55 ตามลำดับ

PACI มีกลไกการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์รูปแบบเดียวกับ Alum แต่ PACI มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในช่วง pH กว้างกว่า Alum เนื่องจาก PACI อยู่ในรูปโพลิเมอร์หรือคอลลอยด์ของเกลืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย จึงใช้ได้ในช่วง pH กว้างกว่า Alum ไม่ว่าช่วง pH ต่ำหรือสูงก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดี ที่ pH ต่ำกว่า 6.0 Alum จะไม่เกิด Polymer ในขณะที่ PACI จะอยู่ในรูป Polymer คือ  $Al_3(OH)_4^{7+}$   $Al^{3+}$  และ  $AlOH^{2+}$  สำหรับสารประกอบอิมิกที่ pH ต่ำจะเกิด Protonation ของสารอินทรีย์ธรรมชาติเปลี่ยนรูป Hydrophobic สูงขึ้นจึงเกิดการตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี แต่ที่ pH สูงสารประกอบอิมิกจะมีประจุลบและอลูมิเนียมจะอยู่ในรูป  $Al(OH)_3$  จึงไม่เกิดกลไกการสะเทินประจุมากนักแต่จะเกิดเฉพาะกลไกการดูดซับบน Floc ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gregor et al. (1997) อ้างโดย มัลลิกา และพองศรี, (2550) ดังนั้นทั้งสภาวะที่มี pH ต่ำและ pH สูงเกินไปจึงเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะต่อการบำบัดสารอินทรีย์ แต่จะมี pH ที่เหมาะสมอยู่ช่วงหนึ่งคือที่ pH 6.0 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด จากการทดลองจึงเลือก pH ตั้งต้น 6.0 ไปทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 20 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำแม่กลอง

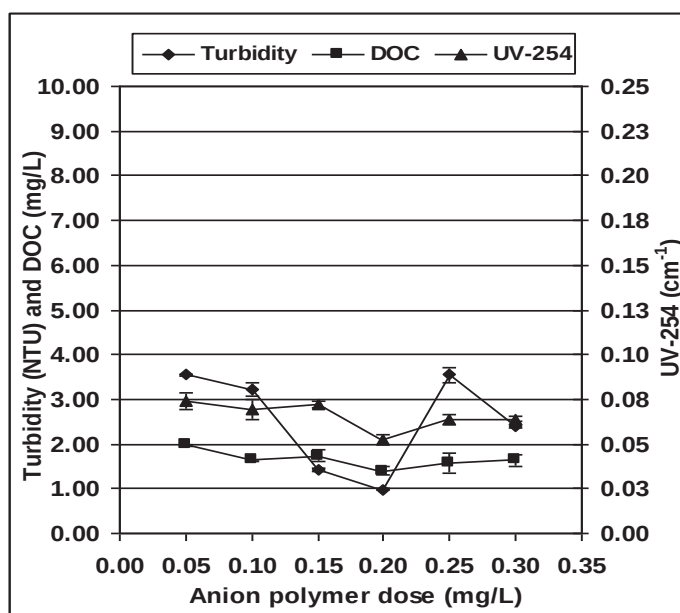
(หมายเหตุ ภาพที่ 20 ถึง 21 ควมคุม; PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 21 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำแม่กลอง

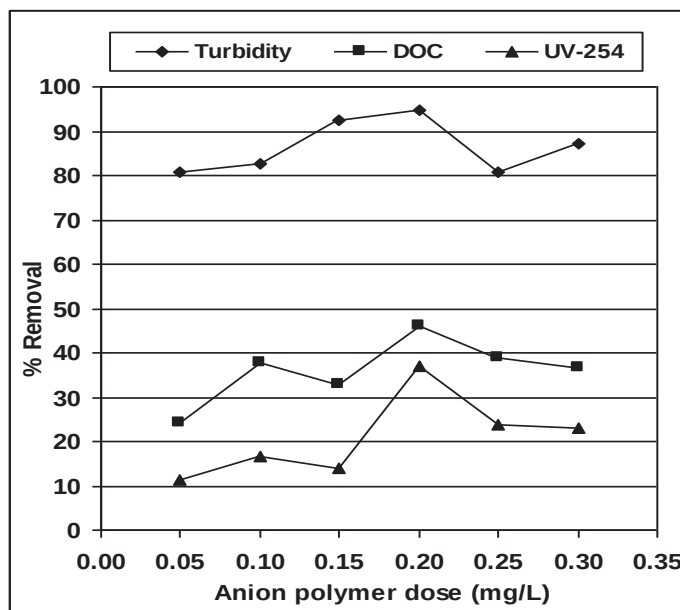
### (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L เลือกใช้ Polymer ชนิด Anion polymer ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้จริงในระบบประปาและควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=6.0 และปริมาณ PACl=40 mg/L จากภาพที่ 22 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Anion polymer มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) จากภาพที่ 23 พบว่าที่ความเข้มข้น Anion polymer 0.20 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ซึ่งมีร้อยละการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 94.70 46.08 และ 36.93 ตามลำดับ จากการทดลองนี้จึงเลือกใช้ Anion polymer 0.20 mg/L ไปทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 22 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ด้วย PACl ของแม่น้ำแม่กลอง

(หมายเหตุ ภาพที่ 22 ถึง 23 ควบคุม: PACl=40.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0)

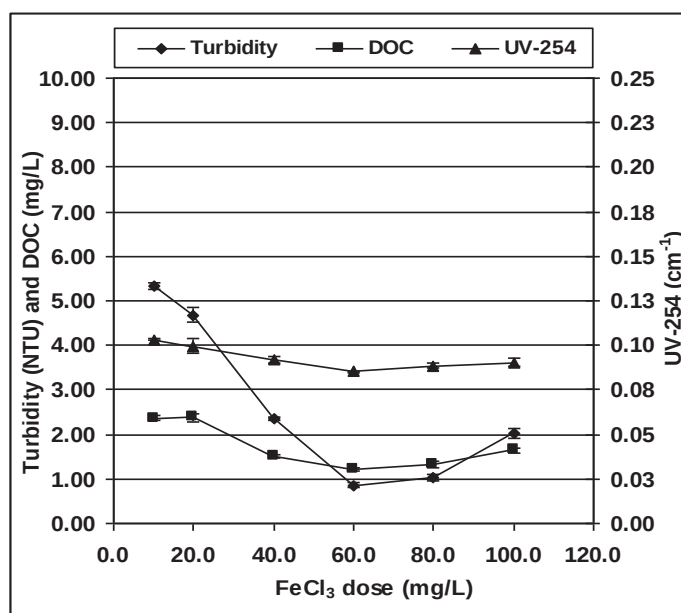


ภาพที่ 23 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำแม่กลอง

#### 4.2.3 การสร้างและรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ )

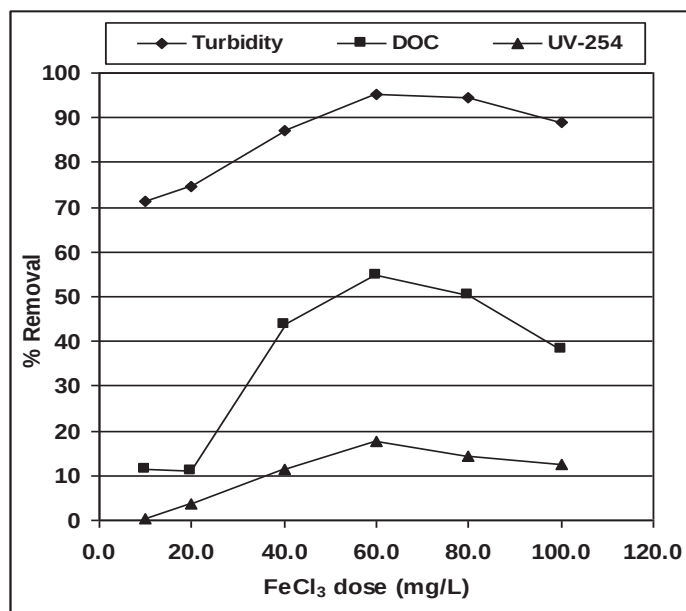
##### (1) ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$

นำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ที่เหมาะสม กำหนดให้ความเข้มข้นของ  $\text{FeCl}_3$  อยู่ระหว่าง 10.0-100.0 mg/L และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 24 พบว่าที่ปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  60 mg/L สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดีไปทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 25 พบว่าที่ปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  60.0 mg/L สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 โดยมีร้อยละการบำบัดคือ 95.35 54.92 และ 17.70 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizzo et al. (2005) ซึ่งทำการศึกษาผลของ  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จากการทดลองนี้จึงเลือกปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี คือ 60.0 mg/L ไปทำการทดลองต่อไป

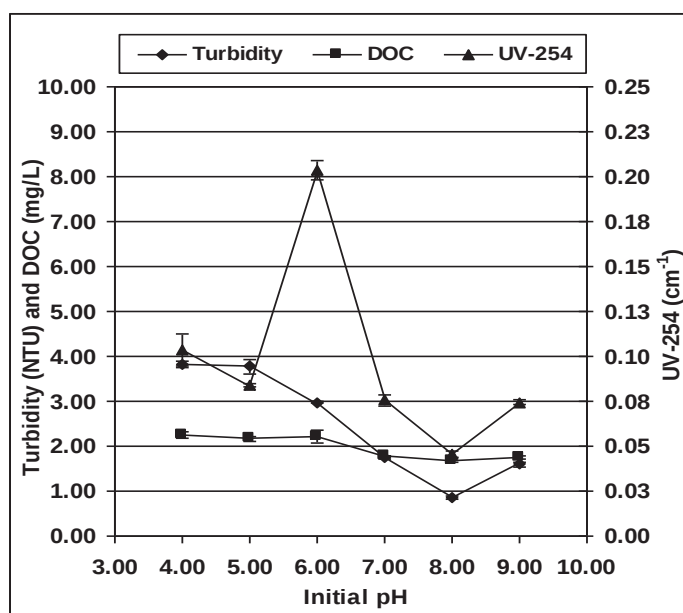


ภาพที่ 24 ผลของปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ของแม่น้ำแม่กลอง

(หมายเหตุ ภาพที่ 24 ถึง 25 ควคุม: pH ตั้งต้น 7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L)

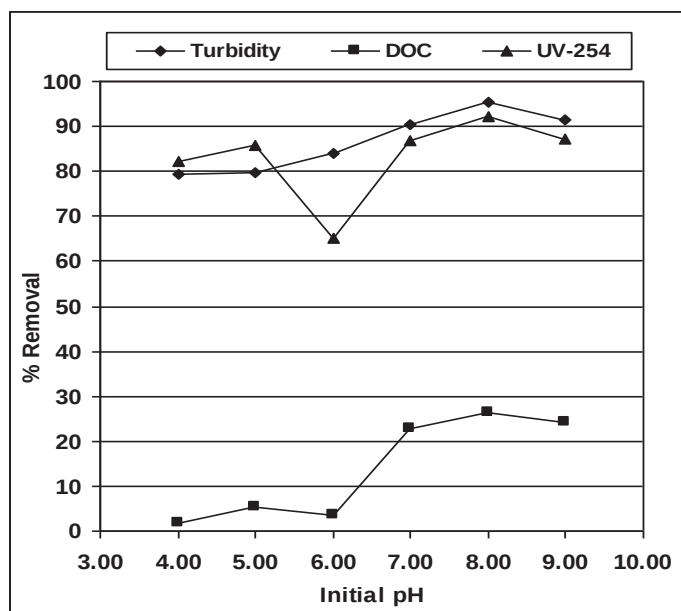


ภาพที่ 25 ผลของปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ของแม่น้ำแม่กลอง



ภาพที่ 26 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำแม่กลอง

(หมายเหตุ ภาพที่ 26 ถึง 27 ควมคุม:  $\text{FeCl}_3=60.0 \text{ mg/L}$  และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 27 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำแม่กลอง

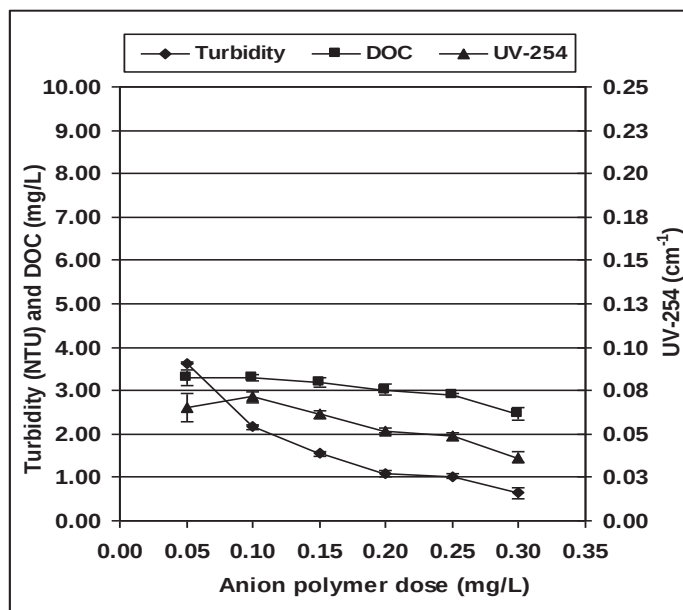
## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสม โดยทำการทดลองในช่วง pH 4.0-9.0 ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=60.0$  mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 26 พบว่าที่ pH 8.0 มีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นและบำบัด DOC และ UV-254 ได้ดีไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 27 พบว่าที่ pH 8.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 และสามารถบำบัดสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 ได้ดีที่สุด โดยมีร้อยละการบำบัดคือ 26.50 และ 92.21 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก  $\text{FeCl}_3$  เมื่อละลายน้ำในช่วง pH ต่ำกว่า 8.0 จะอยู่ในรูปประจุบวก ได้แก่  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{FeOH}^{2+}$  และ  $\text{Fe(OH)}_2^+$  ซึ่งจะเกิดการสะเทินประจุที่ผิวคอลลอยด์ เมื่อ pH สูงกว่า 9.0 จะอยู่ในรูปประจุลบคือ  $\text{Fe(OH)}_4^-$  มากขึ้น และตั้งแต่ pH 3.0 ขึ้นไป  $\text{FeCl}_3$  จะอยู่ในรูปตะกอน  $\text{Fe(OH)}_3$  (Faust and Aly, 1998 และ Jinming and John, 2003)

นอกจากนั้น pH ยังมีผลต่อรูปของสารประกอบฮิวมิก เนื่องจาก pH ต่ำ จะเกิดการ Protonation ของสารอินทรีย์ธรรมชาติจึงเกิดปฏิกิริยากับโมโนเมอร์ประจุบวกได้น้อย แต่ที่ pH สูงขึ้นสารประกอบฮิวมิกจะมีประจุลบมากขึ้นในขณะที่เหล็กที่อยู่ในรูปโมโนเมอร์ที่มีประจุบวก ดังนั้นที่ pH 8.0 จึงเกิดการสะเทินประจุระหว่างสารอินทรีย์ที่มีประจุเป็นลบและโมโนเมอร์ของเหล็กที่มีประจุบวกจึงเกิดการตกตะกอนได้ดี (Faust and Aly, 1997 อ้างโดย มัลลิกาและพ้องศรี, 2550 และ Jinming and John, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizzo et al. (2005) ที่ใช้  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่น NOM และ THMs ในประเทศอิตาลี โดยที่ pH 8.0 สามารถบำบัดความขุ่น NOM และ THMs ได้ดี จากการทดลองนี้จึงเลือก pH ตั้งต้น 8.0 ไปทำการทดลองต่อไป

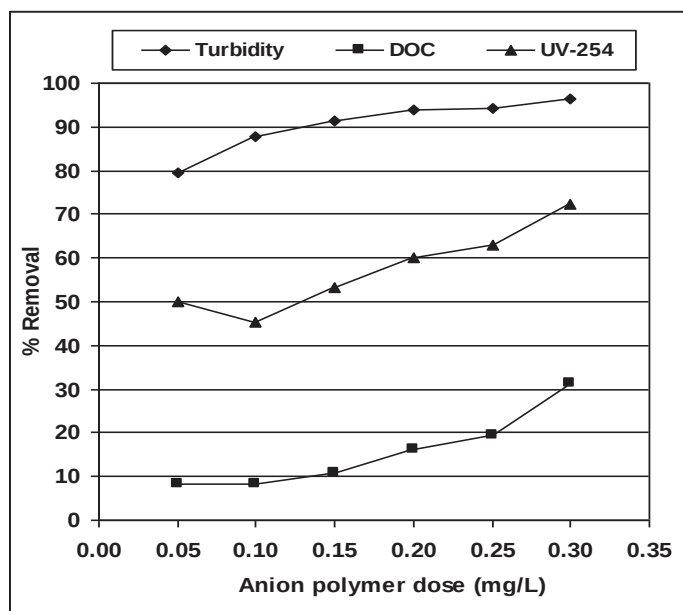
## (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L เลือกใช้ Polymer ชนิด Anion polymer ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้จริงในระบบประปาและควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ  $\text{FeCl}_3=60.0$  mg/L และ pH ตั้งต้น=8.0 จากภาพที่ 28 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Anion polymer สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 29 พบว่าสามารถบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 ส่วนการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีร้อยละการบำบัด 31.25 และ 72.13 ตามลำดับ จากการทดลองนี้พบว่า ความเข้มข้นของ Anion polymer ที่ดีที่สุดที่สามารถบำบัดทั้งความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด คือ 0.30 mg/L ไปทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 28 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำแม่กลอง

(หมายเหตุ ภาพที่ 28 ถึง 29 ควมคุม:  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ pH ตั้งต้น=8.0)



ภาพที่ 29 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำแม่กลอง

#### 4.2.4 สถานะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการสร้างและรวมตะกอน

##### (1) สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum

จากการทดลองจะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมในตารางที่ 8 แสดงประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ Alum คือ ปริมาณ Alum 40.0 mg/L pH ตั้งต้น 7.0 และ Anion polymer 0.20 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ร้อยละ 93.13 49.56 38.03 36.61 และ 41.31 ตามลำดับ จากภาพที่ 30 เห็นได้ว่า Alum มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

##### (2) สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl

จากการทดลองจะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมดังตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ PACl คือ ปริมาณ PACl 40.0 mg/L pH ตั้งต้น 6.5 และ Anion polymer 0.20 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ร้อยละ 94.55 56.36 49.15 42.22 และ 48.14 ตามลำดับ จากภาพที่ 30 เห็นได้ว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

##### (3) สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย FeCl<sub>3</sub>

จากการทดลองจะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมดังตารางที่ 8 ประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ FeCl<sub>3</sub> คือ ปริมาณ FeCl<sub>3</sub> 60.0 mg/L pH ตั้งต้น 8.0 และปริมาณ Anion polymer 0.30 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ร้อยละ 96.91 53.78 45.10 44.36 และ 49.05 ตามลำดับ จากภาพที่ 30 เห็นได้ว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

##### (4) การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum, PACl และ FeCl<sub>3</sub>

จากการทดลองในตอนๆที่ 4.2.1 ถึง 4.2.3 ได้คัดเลือกสถานะการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์มา 3 สถานะดังตารางที่ 8

ในการทดลองที่ผ่านตัวชี้วัดประสิทธิภาพการบำบัดคือ ความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 เท่านั้น เพื่อเป็นการยืนยันว่าสถานะการบำบัดต่าง ๆ สามารถลดสารอินทรีย์ซึ่งมีผลต่อการเกิด THMs จึงนำสถานะทั้ง 3 สถานะที่เลือกมาทำการทดลองซ้ำเพื่อหาร้อยละของการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8 และ ภาพที่ 30

จากภาพที่ 30 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละของการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ของน้ำในระบบประปาและจากการทดลองทั้ง 3 สถานะซึ่งเห็นได้ว่าร้อยละของการบำบัดความขุ่นในระบบประปาและทุกสถานะจากการทดลองใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 93.13-96.91 แต่สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์แล้วสถานะจากการทดลองสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีว่าระบบประปา โดยระบบประปาสามารถบำบัดสาร TOC DOC UV-254 และ THMFP ร้อยละ 4.05 10.81 7.03 และ 0.05 ตามลำดับ ในขณะที่สถานะทั้ง 3 สถานะสามารถบำบัด TOC DOC UV-254 และ THMFP ได้ร้อยละ 49.56-56.36 38.03-49.15 36.61-44.36 และ 41.31-49.05 ตามลำดับ

เมื่อประเมินจากร้อยละของการบำบัดทั้ง 3 สถานะดังตารางที่ 8 พบว่า  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์และ THMFP ได้ดีกว่า Alum และ PACl ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abbas et al. (2009) ซึ่งทำการวิจัยการลดลงของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแม่น้ำไทกริส กรุงแบกแดด ประเทศอิรัก โดยใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  พบว่า  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่า Alum นอกจากนี้งานวิจัยของ Musikavong et al. (2009) ได้ทำการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมทางภาคเหนือของประเทศไทยด้วยกระบวนการ Coagulation โดยใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  พบว่าสารทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัด THMFP ได้ดีใกล้เคียงกัน

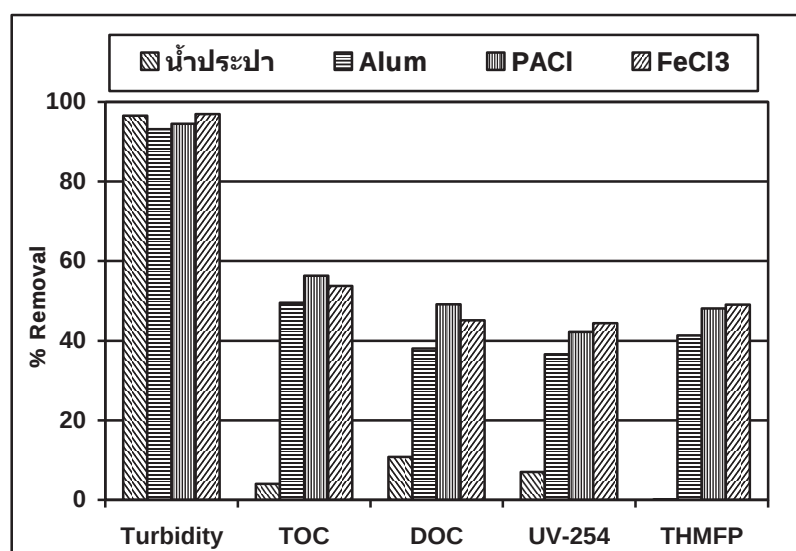
เมื่อเปรียบเทียบ THMFP ของน้ำที่บำบัดด้วยสถานะการทดลองกับมาตรฐานของ WHO และ US-EPA ซึ่งมีค่ามาตรฐานกำหนดคือ 100 และ 80  $\mu\text{g/L}$  ตามลำดับ พบว่าผลจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น THMs ในมาตรฐานกำหนดของทั้ง WHO และ US-EPA

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อการผลิตน้ำประปา ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบดังตารางที่ 8 และภาพที่ 30 จะเห็นว่าสถานะที่ 3 คือ  $\text{FeCl}_3$  ซึ่งเป็นสถานะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด แต่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสารสีเหลือง ดังนั้นน้ำประปาที่มี  $\text{FeCl}_3$  ละลายนํ้าอยู่จะมีสีเหลืองอ่อนทำให้ไม่น่านำไปอุปโภคบริโภค เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสถานะที่ 1 และ สถานะที่ 2 จะเห็นว่าแม้ว่าสถานะที่ 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าสถานะที่ 1 แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี (Alum 2.50 บาทต่อกิโลกรัม PACl 15.00 บาทต่อกิโลกรัม และ  $\text{FeCl}_3$  5.00 บาทต่อกิโลกรัม) พบว่าค่าสารเคมีของสถานะที่ 2 สูงกว่าสถานะที่ 1 จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าสถานะที่ 1 2 และ 3 มีค่าสารเคมีเท่ากับ 0.13 0.63 และ 0.34 บาทต่อ ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปว่าสถานะที่ 1 เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบผลิตน้ำประปา โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ Alum และสารรวมตะกอน

ตามความเหมาะสมของน้ำ นอกจากนั้นปรับ pH ตั้งต้นให้เหมาะสมด้วย โดยในที่นี้ pH ตั้งต้น=7.0 คือ pH ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในน้ำ

ตารางที่ 8 สภาวะการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ของแม่น้ำแม่กลอง

| สารรวม<br>ตะกอน   | Coagulant<br>dosage<br>(mg/L) | Initial<br>pH | Polymer<br>dosage<br>(mg/L) | ร้อยละการบำบัด (%Removal) |       |       |        |       |
|-------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------|-------|-------|--------|-------|
|                   |                               |               |                             | ความขุ่น                  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| น้ำประปา          | -                             | -             | -                           | 96.50                     | 4.05  | 10.81 | 7.03   | 0.05  |
| Alum              | 40.0                          | 7.0           | 0.20                        | 93.13                     | 49.56 | 38.03 | 36.61  | 41.31 |
| PACl              | 40.0                          | 6.5           | 0.20                        | 94.55                     | 56.36 | 49.15 | 42.22  | 48.14 |
| FeCl <sub>3</sub> | 60.0                          | 8.0           | 0.30                        | 96.91                     | 53.78 | 45.10 | 44.36  | 49.05 |



ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum PACl และ FeCl<sub>3</sub> ของแม่น้ำแม่กลอง

ตารางที่ 9 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดด้วยสภาวะที่ 1 2 และ 3 ของแม่น้ำแม่กลอง

|                              | Coagulant<br>dose<br>(mg/L) | Flocculant<br>dose (mg/L) | ราคา<br>Coagulant<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์เมตร<br>น้ำดิบ | ราคา<br>Flocculant<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์<br>เมตรน้ำดิบ | ราคารวม<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์<br>เมตร<br>น้ำดิบ |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| สภาวะที่ 1 Alum              | 40.0                        | 0.20                      | 0.10                                                  | 0.03                                                   | 0.13                                            |
| สภาวะที่ 2 PACl              | 40.0                        | 0.20                      | 0.60                                                  | 0.03                                                   | 0.63                                            |
| สภาวะที่ 3 FeCl <sub>3</sub> | 60.0                        | 0.30                      | 0.30                                                  | 0.04                                                   | 0.34                                            |

หมายเหตุ Alum=2.50 บาทต่อกิโลกรัม

FeCl<sub>3</sub>=5.00 บาทต่อกิโลกรัม

PACl=15.00 บาทต่อกิโลกรัม

Polymer=135.00 บาทต่อกิโลกรัม

#### (5) ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP

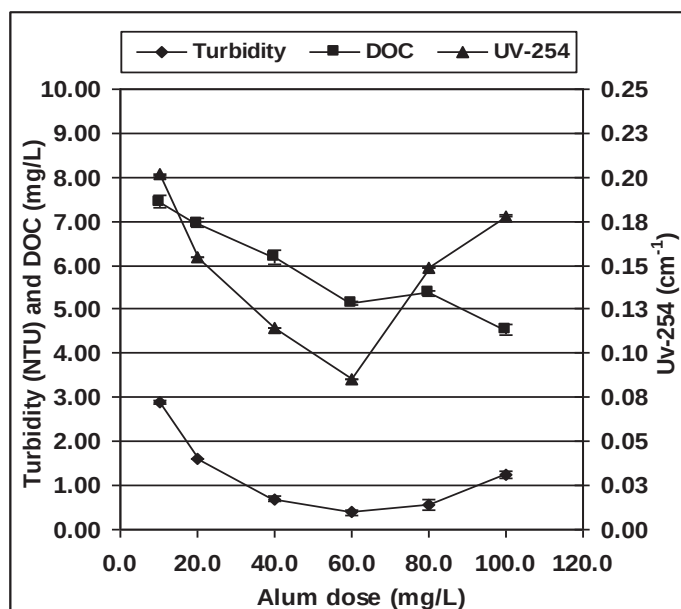
เมื่อนำผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ในรูป TOC กับ THMFP DOC กับ THMFP และ UV-254 กับ THMFP เพื่อยืนยันว่าสารอินทรีย์ทั้งสามรูป เป็น สารตั้งต้นที่จะก่อให้เกิดสาร THMs โดยหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่กล่าวมาแล้ว พบว่าค่า r มีค่าเท่ากับ 0.58 0.59 และ 0.63 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ค่า TOC กับ THMFP DOC กับ THMFP มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่า UV-254 กับ THMFP มีความสัมพันธ์กันทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองนี้การเกิด THMs จึงขึ้นอยู่กับทั้ง TOC DOC และ UV-254 โดยสรุปว่า TOC และ DOC เป็น สารตั้งต้นให้เกิด THMs ส่วน UV-254 เป็นสารตั้งต้นหลักที่ก่อให้เกิดสารประกอบ THMs ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uyak and Toroz (2007) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง DOC กับค่า THMFP และ UV-254 กับค่า THMFP โดยมีค่า r เท่ากับ 0.77 และ 0.80 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า UV-254 คือ สารตั้งต้นหลักที่ก่อให้เกิด THMs

### 4.3 แม่น้ำท่าจีน

#### 4.3.1 การสร้างและรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate, Alum)

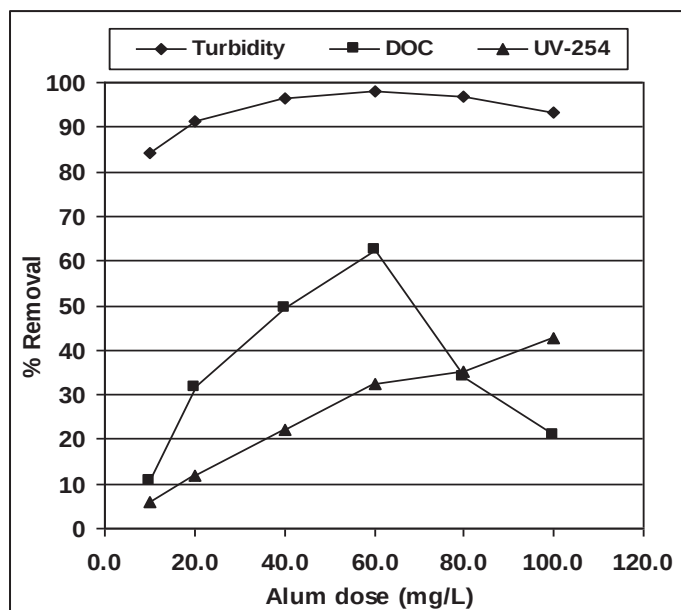
##### (1) ผลของปริมาณ Alum

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสม กำหนดให้ความเข้มข้นของ Alum อยู่ระหว่าง 10.0-100.0 mg/L และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 31 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum มีผลให้ค่า DOC ที่มีแนวโน้มลดลง ส่วนความขุ่นและค่า UV-254 มีแนวโน้มลดลงจนถึงความเข้มข้น 60.0 mg/L หลังจากนั้นแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 32 พบว่าความขุ่นมีร้อยละการบำบัดได้ดีที่สุดคือ 98.82 โดยเมื่อเทียบกับสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดที่มีร้อยละการบำบัด 42.81 และ 62.30 ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณของ Alum เหมาะสำหรับการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Abbas et al. (2009) โดยการศึกษาการลดลงของ NOM และ DBPs ในแม่น้ำไทกริส กรุงแบกแดด โดยใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสารสร้างและรวมตะกอน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  ความขุ่นและสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลง จากการทดลองนี้จึงเลือกความเข้มข้น Alum 60.0 mg/L ในการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยสารตกตะกอน Alum ต่อไป



ภาพที่ 31 ผลของปริมาณ Alum ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำท่าจีน

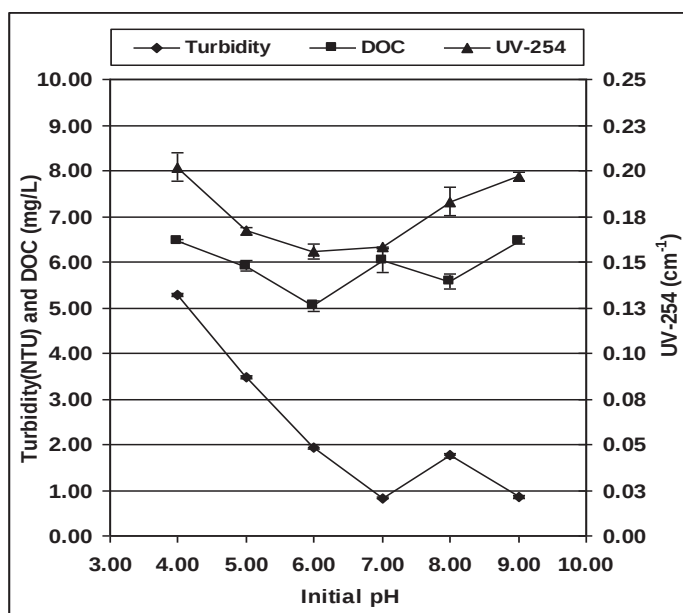
(หมายเหตุ ภาพที่ 31 ถึง 32 ควบคุม: pH ตั้งต้น=7.0 และ polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 32 ผลของปริมาณ Alum ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำท่าจีน

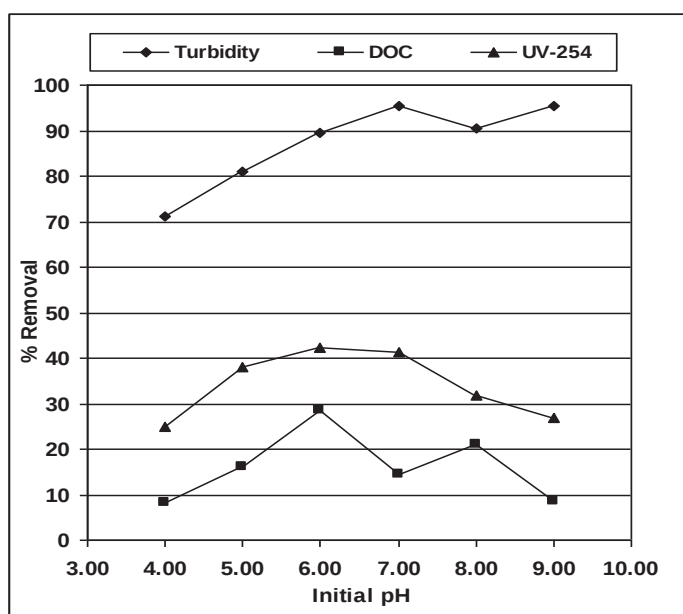
## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้น ที่เหมาะสมโดยทำการทดลองช่วง pH 4.0-9.0 และควบคุมพารามิเตอร์อื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ Alum=60.0 mg/L และ ปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 33 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 7.0 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุด ส่วนที่ pH ตั้งต้น 6.0 สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) จากภาพที่ 34 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 มีร้อยละการบำบัด 95.46 28.64 และ 42.19 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kabsch-Korbutowicz (2005) ซึ่งทำการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยกระบวนการสร้างตะกอน ด้วย Alum ที่ pH ตั้งต้นในช่วง 5.0-10.0 พบว่าที่ pH 6.0 สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด เนื่องจากในช่วง pH ดังกล่าว Alum จะอยู่ในรูปไอออนบวกและสารประกอบอิมิกอยู่ในรูปประจุลบซึ่งทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดี จึงสอดคล้องกับการทดลองตอนที่ 4.2.1 (2) ซึ่งอธิบายเหตุผลดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จากการทดลองนี้จึงเลือก pH ตั้งต้น 6.0 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดีที่สุดเพื่อทำการทดลองต่อไป

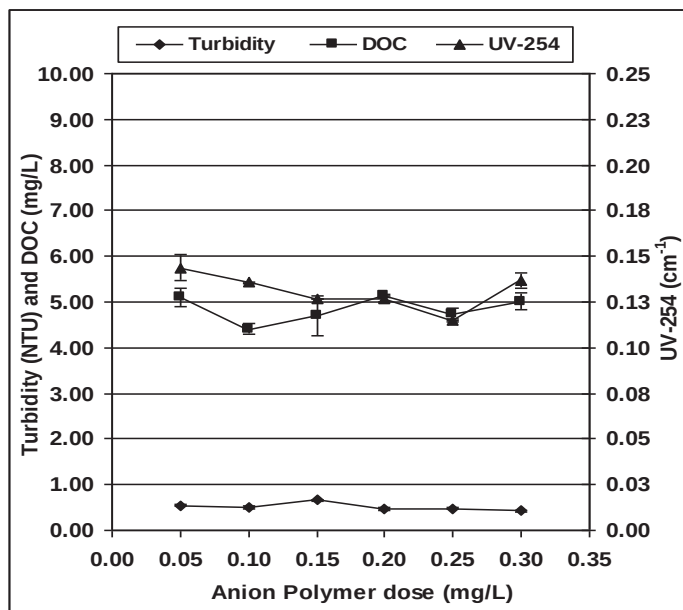


ภาพที่ 33 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน

(หมายเหตุ ภาพที่ 33 ถึง 34 ควมคุม: Alum=60.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L)

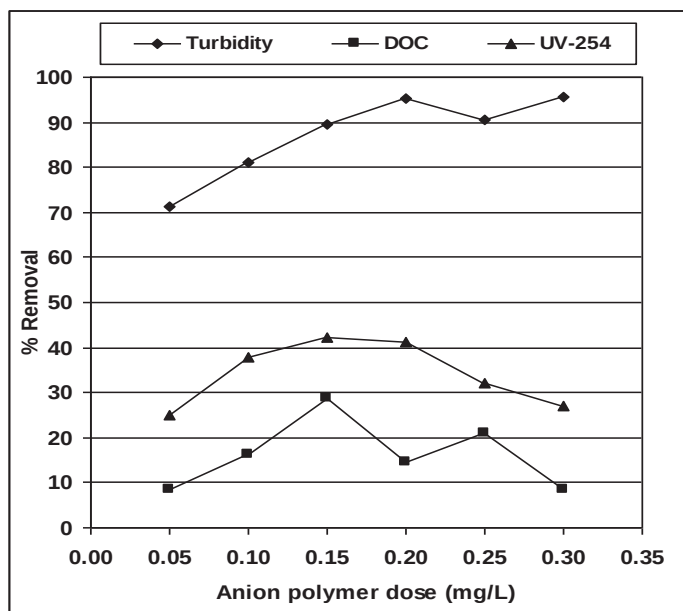


ภาพที่ 34 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน



ภาพที่ 35 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน

(หมายเหตุ ภาพที่ 35 ถึง 36 ควมคุม: Alum=60.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0)



ภาพที่ 36 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย Alum ของแม่น้ำท่าจีน

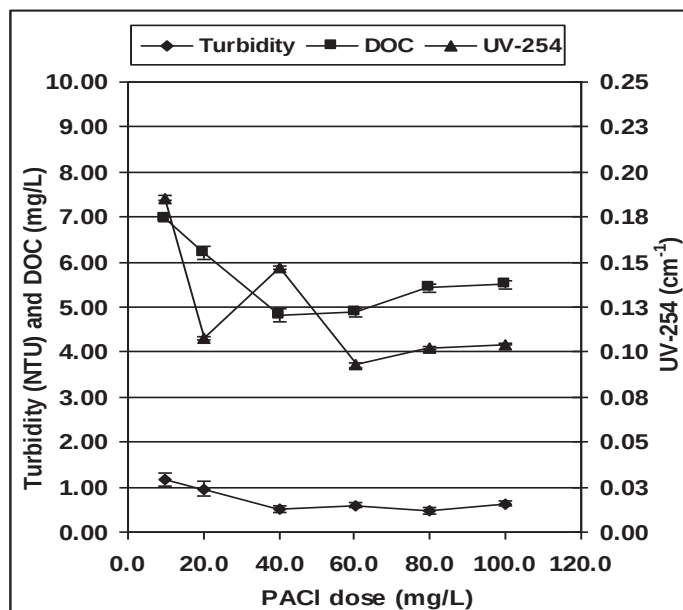
### (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L โดยเลือกใช้ Polymer ชนิด Anion polymer และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ได้แก่ pH ตั้งต้น=6.0 และปริมาณ Alum=60.0 mg/L จากภาพที่ 35 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Anion polymer สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีแต่ไม่สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 36 สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีแต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ต่ำลง โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC UV-254 คือ 97.69 42.2 และ 47.65 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสารรวมตะกอนที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดของ Anion polymer ซึ่งเป็นสารที่ใช้จริงในระบบประปา เมื่อสารประกอบอิมิกละลายน้ำจะอยู่ในรูปประจุลบ ดังนั้นจึงเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบของสารประกอบอิมิกและประจุลบของ Anion polymer จึงไม่สามารถรวมตัวกันแล้วตกตะกอนได้ จากการทดลองนี้จึงเลือกปริมาณ Anion polymer 0.10 mg/L ไปทำการทดลองในต่อไป

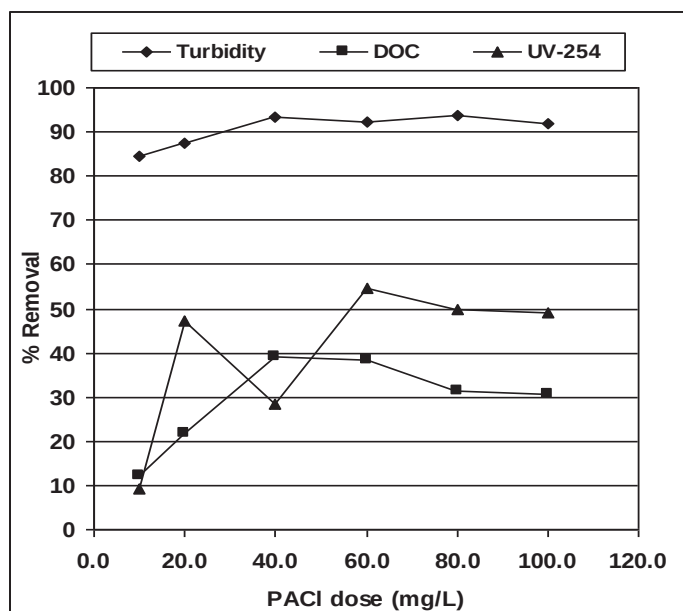
#### 4.3.2 การสร้างและรวมตะกอนด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

##### (1) ผลของปริมาณ PACl

จากการทดลองกำหนดให้ความเข้มข้นของ PACl ตั้งแต่ 10.0-100.0 mg/L และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ได้แก่ pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 37 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PACl ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงไปทางเดียวกันโดยสามารถบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizzo et al. (2005) คือ เมื่อเพิ่มปริมาณ PACl ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น DOC UV-254 และ THMFP เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 38 พบว่าที่ปริมาณ PACl 40.0 mg/L มีร้อยละการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงร้อยละ 100 ส่วนสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 มีร้อยละการบำบัด 39.14 และ 54.63 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าปริมาณ PACl ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี คือ 40.0 mg/L



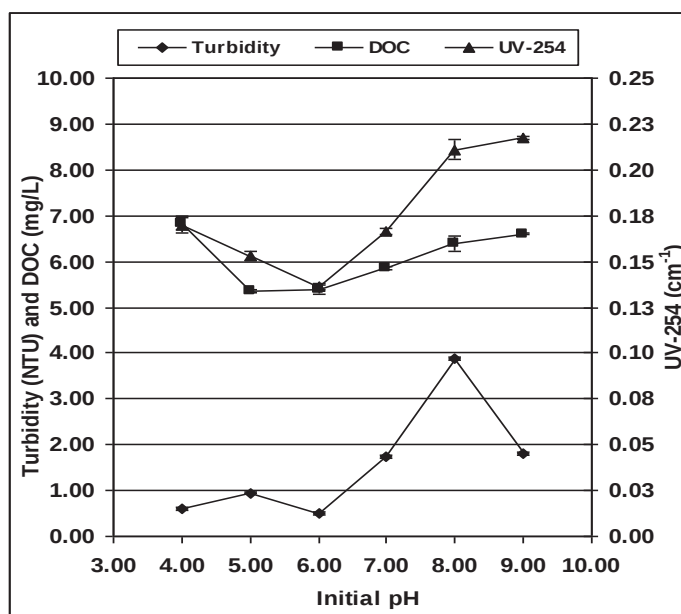
ภาพที่ 37 ผลของปริมาณ PACI ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำท่าจีน  
(หมายเหตุ ภาพที่ 37 ถึง 38 ควมคุม: pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 38 ผลของปริมาณ PACI ต่อร้อยละของการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ  
ของแม่น้ำท่าจีน

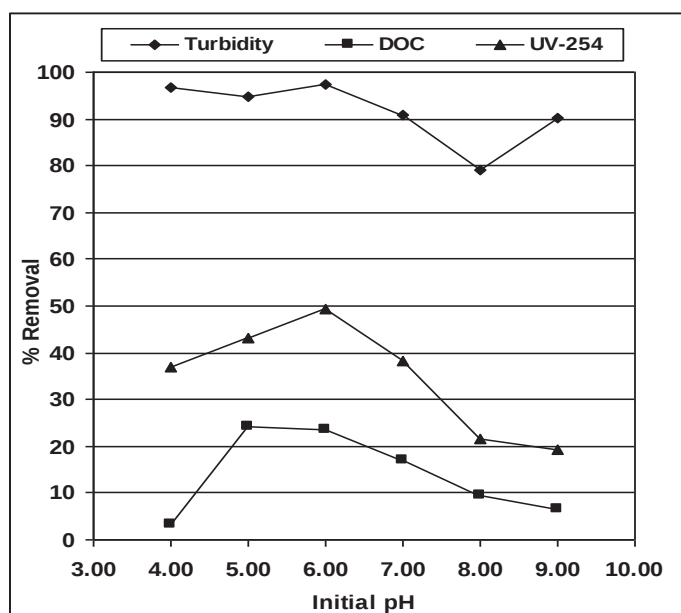
## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้น ที่เหมาะสมโดยทำการทดลองในช่วง pH 4.0-9.0 และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ PACl=40.0 mg/L และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 39 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 6.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 40 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 6.0 มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าการบำบัดสารอินทรีย์ทั้งสองชนิด โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่น DOC และ UV-254 ที่ดีที่สุดคือ 97.26 24.16 และ 49.39 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก PACl เป็นสารรวมตะกอนที่เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นออลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมายจึงใช้ได้ในช่วง pH ที่กว้างทั้งช่วง pH ต่ำหรือ pH สูงก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตอนต้นที่ 4.2.2 (2) ซึ่งได้อธิบายเหตุผลต่าง ๆ มาแล้วข้างต้น ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงเลือก pH ตั้งต้น 6.0 มาทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 39 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน

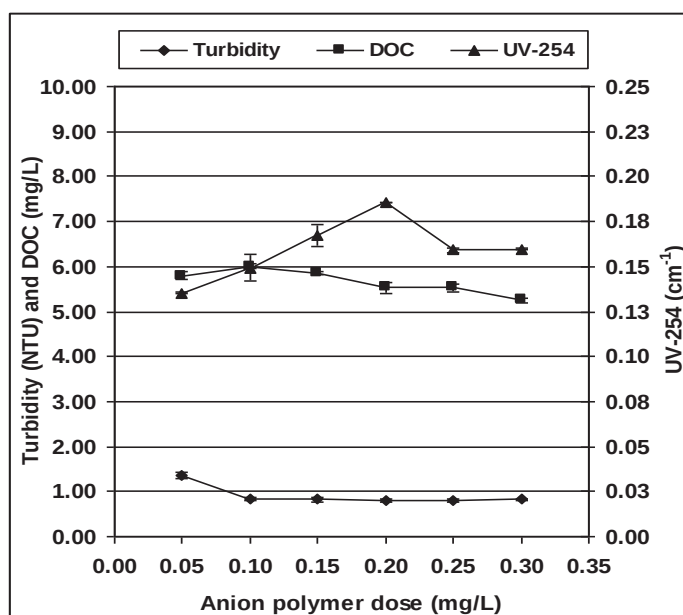
(หมายเหตุ ภาพที่ 39 ถึง 40 ควบคุม: PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 40 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย PACI ของแม่น้ำท่าจีน

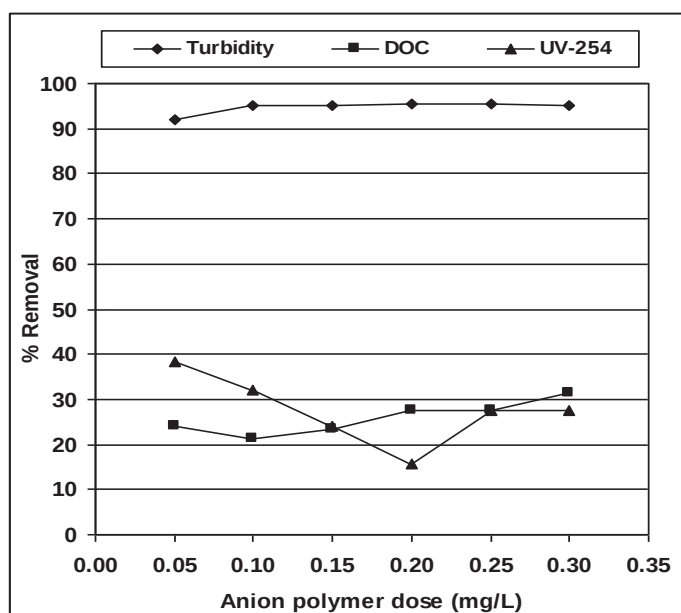
### (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L เลือกใช้ Polymer ชนิด Anion polymer และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ ได้แก่ pH ตั้งต้น=6.0 และ ปริมาณ PACI=40.0 mg/L จากภาพที่ 41 ถึง 42 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Anion polymer สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีแต่บำบัดสารอินทรีย์ต่ำลง โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 95.41 31.26 และ 38.49 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองตอนที่ 4.3.1 (3) จากการทดลองนี้ปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์คือ 0.10 mg/L



ภาพที่ 41 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน

(หมายเหตุ ภาพที่ 41 ถึง 42 ขวบนุม: PACl=40.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0)

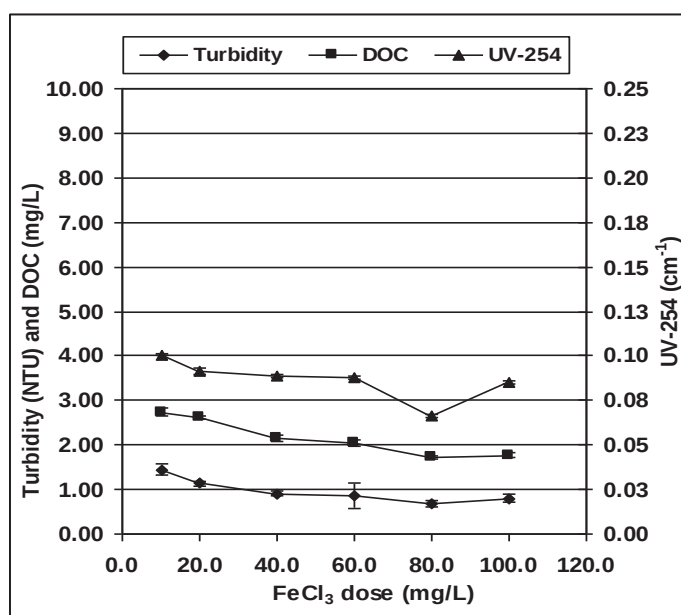


ภาพที่ 42 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย PACl ของแม่น้ำท่าจีน

### 4.3.3 การสร้างและรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ )

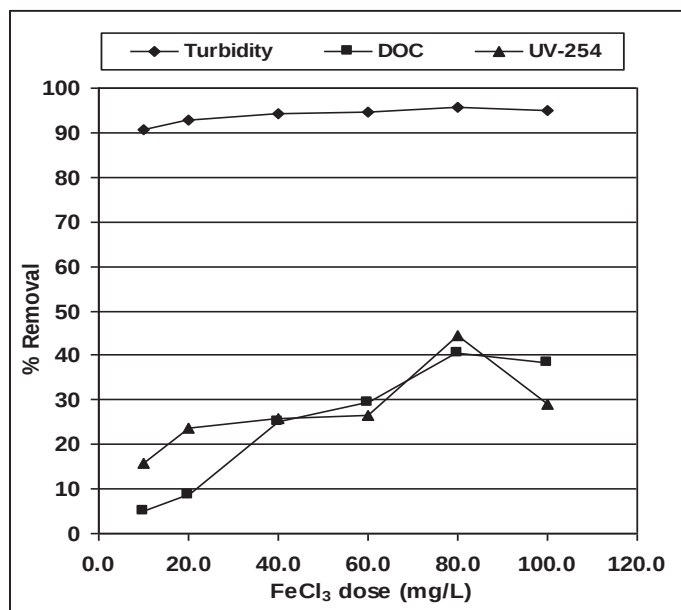
#### (1) ผลของปริมาณ $\text{FeCl}_3$

จากการทดลองนี้กำหนดให้ความเข้มข้นของ  $\text{FeCl}_3$  อยู่ระหว่าง 10.0-100.0 mg/L ควบคุม pH ตั้งต้น=7.0 และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L ซึ่งจำลองจากกระบวนการผลิตน้ำประปาโดยวิธี Jar test จากภาพที่ 43 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 44 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าสารอินทรีย์ โดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงร้อยละ 100 ส่วนสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 นั้นมีร้อยละการบำบัด 40.38 และ 44.61 ตามลำดับ จากการทดลองนี้พบว่าปริมาณของ  $\text{FeCl}_3$  ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงเลือกปริมาณนี้ไปทำการทดลองในตอนต่อไป สอดคล้องกับงานวิจัยของ คือ 80.0 mg/L Musikavong et al. (2005) ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  จาก 10.0-80.0 mg/L ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น  $\text{FeCl}_3$  80.0 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และTHMs ได้ดีที่สุด



ภาพที่ 43 ผลของปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำท่าจีน

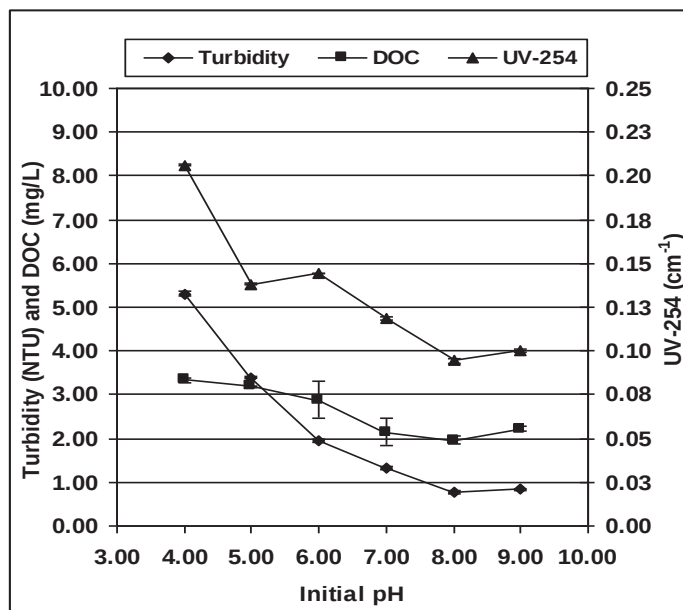
(หมายเหตุ ภาพที่ 43 ถึง 44 ควบคุม: pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 44 ผลของปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติของแม่น้ำท่าจีน

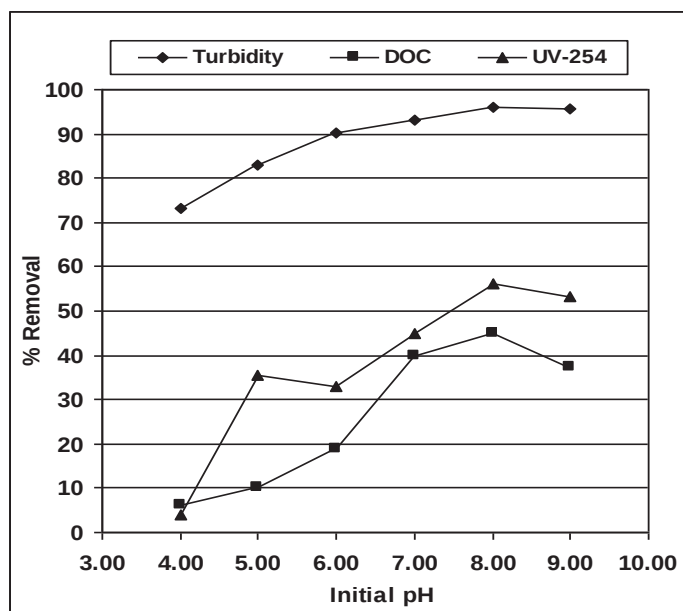
## (2) ผลของ pH ตั้งต้น

เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมโดยทำการทดลองในช่วง pH 4.0-9.0 และควบคุมพารามิเตอร์ชนิดอื่น ๆ ให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0$  mg/L และปริมาณ Anion polymer=0.10 mg/L จากภาพที่ 45 พบว่าเมื่อ pH เพิ่มขึ้นความขุ่นและสารอินทรีย์มีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 46 พบว่าที่ pH ตั้งต้น 8.0 สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 คือ 96.16 44.77 และ 56.01 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rizzo et al. (2005) ซึ่งใช้  $\text{FeCl}_3$  ในการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์และ THMs ในประเทศอิตาลี โดยที่ pH 8.0 สามารถบำบัดความขุ่นสารอินทรีย์และ THMs ได้ดี และสอดคล้องกับการทดลองตอนที่ 4.2.3 (2) ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงเลือก pH ตั้งต้น 8.0 เพื่อทำการทดลองต่อไป



ภาพที่ 45 ผลของ pH ตั้งต้นในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำท่าจีน

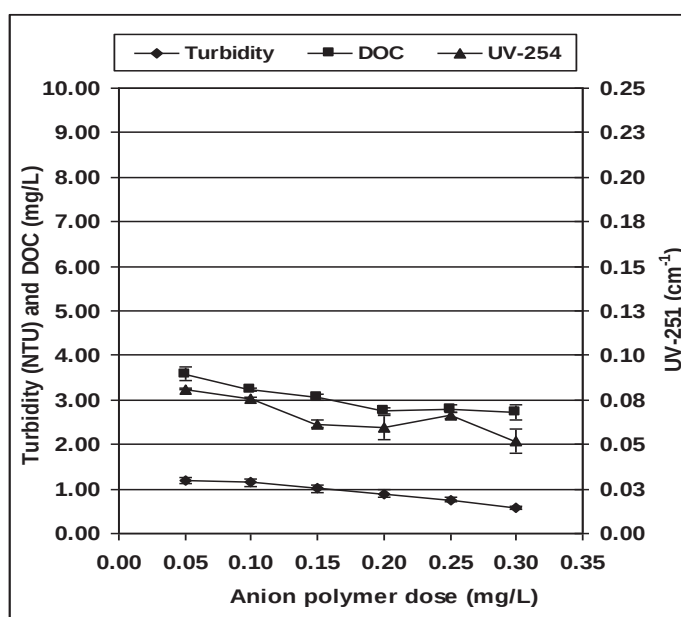
(หมายเหตุ ภาพที่ 45 ถึง 46 ควมคุม:  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ Anion polymer=0.10 mg/L)



ภาพที่ 46 ผลของ pH ตั้งต้นต่อร้อยละในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำท่าจีน

### (3) ผลของปริมาณ Anion polymer

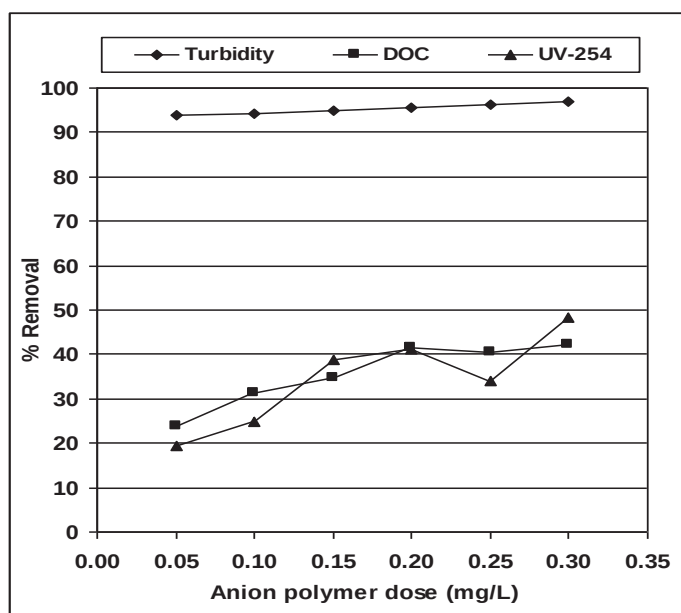
เมื่อนำน้ำดิบมาผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีโดยการทำ Jar test เพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นของ Anion polymer ตั้งแต่ 0.05-0.30 mg/L เลือกใช้ Polymer ชนิด Anion polymer และควบคุมพารามิเตอร์อื่นๆให้คงที่ ได้แก่ ปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ pH ตั้งต้น=8.0 ดังภาพที่ 47 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Anion polymer สามารถบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ได้ดีไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาร้อยละการบำบัด (% Removal) ดังภาพที่ 48 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 ไม่แตกต่างกัน โดยมีร้อยละการบำบัดคือ 42.15 และ 48.36 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองตอนที่ 4.2.1 (3) จากการทดลองนี้ปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์คือ 0.30 mg/L



ภาพที่ 47 ผลของปริมาณ Anion polymer ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ

ด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำท่าจีน

(หมายเหตุ ภาพที่ 47 ถึง 48 ควบคุม:  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ pH ตั้งต้น=8.0)



ภาพที่ 48 ผลของปริมาณ Anion polymer ต่อร้อยละการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติ ด้วย  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำท่าจีน

#### 4.3.4 สถานะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการสร้างและรวมตะกอน

##### (1) สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum

จากการทดลองจะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมดังตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ Alum คือ ปริมาณ Alum 60.0 mg/L pH ตั้งต้น 6.0 และปริมาณ Anion polymer 0.10 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัด ค่าความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ได้ร้อยละ 94.20 35.09 33.50 35.38 และ 38.80 ตามลำดับ จากภาพที่ 49 เห็นได้ว่า Alum มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

##### (2) สถานะที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย PACl

จากการทดลองจะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมดังตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ PACl คือ ปริมาณ PACl 40.0 mg/L pH ตั้งต้น 6.0 และปริมาณ Anion polymer 0.10 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ได้ร้อยละ 95.61 34.46 32.15 45.57 และ 54.11 ตามลำดับ จากภาพที่ 49 เห็นได้ว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

### (3) สภาพที่เหมาะสมในการสร้างและรวมตะกอนด้วย $\text{FeCl}_3$

จากการทดลองจะเห็นว่าสภาพที่เหมาะสมดังตารางที่ 10 ประสิทธิภาพในการรวมตะกอนของ  $\text{FeCl}_3$  คือ ปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  80.0 mg/L pH ตั้งต้น 8.0 และปริมาณ Anion polymer 0.30 mg/L มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ได้ร้อยละ 97.01 39.48 49.31 47.26 และ 59.28 ตามลำดับ จากภาพที่ 49 เห็นได้ว่า PACl มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีใกล้เคียงร้อยละ 100 แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และ THMFP ใกล้เคียงกัน

### (4) การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum PACl และ $\text{FeCl}_3$

จากการทดลองในตอนต้นที่ 4.3.1 ถึง 4.3.3 ได้คัดเลือกสภาวะการบำบัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์มา 3 สภาวะดังตารางที่ 10

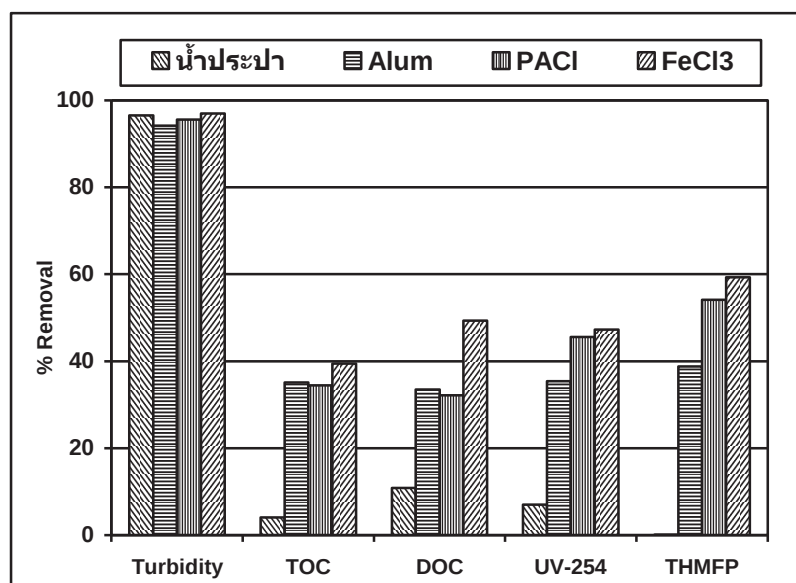
ในการทดลองที่ผ่านตัวชี้วัดประสิทธิภาพการบำบัดคือ ความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป DOC และ UV-254 เท่านั้นเพื่อเป็นการยืนยันว่าสภาวะการบำบัดต่าง ๆ สามารถลดสารอินทรีย์ซึ่งมีผลต่อการเกิด THMs จึงนำสภาวะทั้ง 3 สภาวะที่เลือกมาทำการทดลองซ้ำเพื่อหาร้อยละของการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 10 และภาพที่ 49

ภาพที่ 49 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละของการบำบัดความขุ่น TOC DOC UV-254 และ THMFP ของน้ำในระบบประปาและจากการทดลองทั้ง 3 สภาวะ จากกราฟจะเห็นว่าร้อยละของการบำบัดความขุ่นในระบบประปาและทุกสภาวะจากการทดลองใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 94.20-97.01 แต่สำหรับการบำบัดสารอินทรีย์สภาวะจากการทดลองสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีว่าระบบประปา โดยระบบประปาสามารถบำบัดสาร TOC DOC UV-254 และ THMFP ร้อยละ 4.05 10.81 7.03 และ 0.05 ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะทั้ง 3 สภาวะสามารถบำบัด TOC DOC UV-254 และ THMFP ได้ร้อยละ 34.46-39.48 32.15-49.31 35.38-47.26 และ 38.80-59.28 ตามลำดับ

เมื่อประเมินจากร้อยละของการบำบัดทั้ง 3 สภาวะดังตารางที่ 10 และภาพที่ 49 พบว่า  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์และ THMFP ได้ดีกว่า Alum และ PACl สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abbas et al. (2009) ซึ่งทำการวิจัยการลดลงของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแม่น้ำไทกริส กรุงแบกแดดโดยใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  พบว่า  $\text{FeCl}_3$  มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้ดีกว่า Alum งานวิจัยของ Musikavong et al. (2009) ทำการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมทางภาคเหนือของประเทศไทยด้วยกระบวนการ Coagulation โดยใช้ Alum และ  $\text{FeCl}_3$  พบว่าสารทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการบำบัด THMFP ได้ดีใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบ THMFp ของน้ำที่บำบัดด้วยสภาวะการทดลองกับมาตรฐานของ WHO และ US-EPA ซึ่งมีค่ามาตรฐานกำหนดคือ 100 และ 80  $\mu\text{g/L}$  ตามลำดับ พบว่าผลจากการทดลองมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น THMs ในมาตรฐานกำหนดของทั้ง WHO และ US-EPA

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการผลิตน้ำประปา ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดจากตารางที่ 10 และภาพที่ 49 สภาวะที่ 3 คือ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดแต่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของ  $\text{FeCl}_3$  เป็นสารสีเหลือง ดังนั้นน้ำประปาที่มี  $\text{FeCl}_3$  ละลายน้ำอยู่จะมีสีเหลืองอ่อนทำให้ไม่นำนำไปอุปโภคบริโภค เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 แม้ว่าสภาวะที่ 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าสภาวะที่ 1 แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีดังตารางที่ 11 (Alum 2.50 บาทต่อกิโลกรัม PACI 15.00 บาทต่อกิโลกรัม และ  $\text{FeCl}_3$  5.00 บาทต่อกิโลกรัม) ในการบำบัดจริงในระบบประปาจะเห็นได้ว่าต้องใช้ปริมาณ Alum มากกว่า PACI ส่วนปริมาณ Anion polymer ใช้เท่ากัน แต่เมื่อนำมาคิดรวมเป็นค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีดังตารางที่ 11 จะเห็นว่าสภาวะที่ 2 สูงกว่าสภาวะที่ 1 โดยสภาวะที่ 1 2 และ 3 มีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีคือ 0.16 0.61 และ 0.34 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปว่าสภาวะที่ 1 เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริงในระบบผลิตน้ำประปา โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ Alum และสารรวมตะกอนตามความเหมาะสมของน้ำ นอกจากนั้นปรับ pH ตั้งต้น ให้เหมาะสมในการตกตะกอน โดยในที่นี้ pH ตั้งต้น=6.0 คือ pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนของน้ำ



ภาพที่ 49 การเปรียบเทียบการสร้างและรวมตะกอนด้วย Alum PACI และ  $\text{FeCl}_3$  ของแม่น้ำท่าจีน

ตารางที่ 10 สภาวะการทดลองที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ของแม่น้ำท่าจีน

| สารรวม<br>ตะกอน   | Coagulant<br>dosage<br>(mg/L) | Initial<br>pH | Polymer<br>dosage<br>(mg/L) | ร้อยละการบำบัด (% Removal) |       |       |        |       |
|-------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|-------|-------|--------|-------|
|                   |                               |               |                             | ความขุ่น                   | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| น้ำประปา          | -                             | -             | -                           | 96.50                      | 4.05  | 10.81 | 7.03   | 0.05  |
| Alum              | 60.0                          | 6.0           | 0.10                        | 94.20                      | 35.09 | 33.50 | 35.38  | 38.80 |
| PACl              | 40.0                          | 6.0           | 0.10                        | 95.61                      | 34.46 | 32.15 | 45.57  | 54.11 |
| FeCl <sub>3</sub> | 80.0                          | 8.0           | 0.30                        | 97.01                      | 39.48 | 49.31 | 47.26  | 59.28 |

ตารางที่ 11 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดด้วยสภาวะที่ 1 2 และ 3 ของแม่น้ำท่าจีน

|                              | Coagulant<br>dose (mg/L) | Flocculant<br>dose<br>(mg/L) | ราคา<br>Coagulant<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์เมตร<br>น้ำดิบ | ราคา<br>Flocculant<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์<br>เมตร น้ำดิบ | ราคารวม<br>บาทต่อ<br>ลูกบาศก์<br>เมตร<br>น้ำดิบ |
|------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| สภาวะที่ 1 Alum              | 60.0                     | 0.10                         | 0.15                                                  | 0.01                                                    | 0.16                                            |
| สภาวะที่ 2 PACl              | 40.0                     | 0.10                         | 0.60                                                  | 0.01                                                    | 0.61                                            |
| สภาวะที่ 3 FeCl <sub>3</sub> | 60.0                     | 0.30                         | 0.30                                                  | 0.04                                                    | 0.34                                            |

หมายเหตุ Alum=2.50 บาทต่อกิโลกรัม

FeCl<sub>3</sub>=5.00 บาทต่อกิโลกรัม

PACl=15.00 บาทต่อกิโลกรัม

Polymer=135.00 บาทต่อกิโลกรัม

#### (5) ความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP

เมื่อนำผลการทดลองมาหาความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์ในรูป TOC กับ THMFP DOC กับ THMFP และ UV-254 กับ THMFP เพื่อยืนยันว่าสารอินทรีย์ทั้งสามรูป เป็นสารตั้งต้นที่จะก่อให้เกิดสาร THMs โดยหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่กล่าวมาแล้ว

พบว่าค่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 0.63 0.65 และ 0.76 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่า TOC กับ THMFP DOC กับ THMFP และ UV-254 กับ THMFP มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดลองนี้การเกิด THMs จึงขึ้นอยู่กับทั้ง TOC DOC และ UV-254 โดยสรุปว่า TOC และ DOC เป็นสารตั้งต้นให้เกิด THMs ส่วน UV-254 เป็นสารตั้งต้นหลักที่ก่อให้เกิดสารประกอบ THMs ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Uyak and Toroz (2007) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง DOC กับค่า THMFP และ UV-254 กับค่า THMFP โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.77 และ 0.80 ตามลำดับ แสดงว่า UV-254 เป็นสารตั้งต้นหลักที่ก่อให้เกิด THMs

#### 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำทั้ง 2 สาย

จากการทดลองนี้เมื่อนำผลการทดลองของทั้งสองแม่น้ำมาเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 12 พบว่าแม่น้ำท่าจีนมีปริมาณสารอินทรีย์และ THMFP มากกว่าแม่น้ำแม่กลอง โดยมีสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิด THMs จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP คือสารอินทรีย์โครงสร้างอะโรมาติก (UV-254) เช่นเดียวกันทั้งสองแม่น้ำ สาร Coagulant ที่เหมาะสมในการบำบัดของทั้งสองแม่น้ำคือ Alum โดยแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีนใช้ปริมาณคือ 40.0 และ 60.0 mg/L ส่วน pH ตั้งต้นของแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีนคือที่ pH 7.0 และ 6.0 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากช่วง pH ดังกล่าว Alum อยู่ในรูปประจุบวกและสารอินทรีย์อยู่ในรูปประจุลบ จึงเกิดการสะเทินประจุและตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ดี ส่วนปริมาณ Anion polymer แม่น้ำท่าจีนใช้ปริมาณน้อยกว่าแม่น้ำแม่กลองคือ 0.10 และ 0.20 mg/L ตามลำดับ เนื่องจากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการสร้างของแม่น้ำท่าจีนมีขนาดใหญ่และความหนาแน่นมากพอที่จะแยกออกจากน้ำได้ดี จึงมีความต้องการ Polymer ซึ่งช่วยในการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้นในปริมาณน้อย เมื่อนำมาใช้จริงในระบบผลิตน้ำประปา พบว่าน้ำจากแม่น้ำท่าจีนต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำต่ำกว่าแม่น้ำแม่กลอง โดยมีค่าใช้จ่ายคือ 0.13 และ 0.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าน้ำจากแม่น้ำแม่กลองมีความเหมาะสมในการผลิตน้ำประปามากกว่าน้ำจากแม่น้ำท่าจีน

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำท่าจีนและแม่น้ำแม่กลอง

|                                                                    | แม่น้ำแม่กลอง               | แม่น้ำท่าจีน                |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. คุณสมบัติของน้ำดิบ                                              |                             |                             |
| 1.1 pH                                                             | 7.48-7.71                   | 7.21-7.83                   |
| 1.2 ความขุ่นเฉลี่ย (NTU)                                           | 12.60-18.50                 | 7.63-33.00                  |
| 1.3 DOC (mg/L)                                                     | 1.39-3.59                   | 2.06-7.92                   |
| 1.4 UV-254 ( $\text{cm}^{-1}$ )                                    | 0.0400-0.2036               | 0.0778-0.2690               |
| 1.5 THMFP ( $\mu\text{g/L}$ )                                      | 86.28                       | 106.53                      |
| 2. ชนิดสารสร้างตะกอนที่เหมาะสม                                     | Alum                        | Alum                        |
| 2.1 ปริมาณ (mg/L)                                                  | 40.0                        | 60.0                        |
| 2.2 pH ตั้งต้น                                                     | 7.0                         | 6.0                         |
| 2.3 ปริมาณ Anion polymer (mg/L)                                    | 0.20                        | 0.10                        |
| 3. ค่าสารเคมี                                                      | 0.13 บาท<br>ต่อลูกบาศก์เมตร | 0.16 บาท<br>ต่อลูกบาศก์เมตร |
| 4. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ<br>สารอินทรีย์และค่า THMFP (ค่า r) |                             |                             |
| 4.1 TOC กับ THMFP                                                  | 0.58                        | 0.63                        |
| 4.2 DOC กับ THMFP                                                  | 0.59                        | 0.65                        |
| 4.3 UV-254 กับ THMFP                                               | 0.63                        | 0.76                        |

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

เนื่องจาก THMs ในน้ำประปาเกิดจากสารอินทรีย์ในน้ำทำปฏิกิริยากับคลอรีน ดังนั้นการบำบัดเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์จึงสามารถลดการเกิดสาร THMs ได้ด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อให้สามารถบำบัดของแข็งแขวนลอยและสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิด THMs (THMs precursor) โดยเลือกแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีนเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากเป็นแหล่งน้ำดิบเพื่อการประปาในพื้นที่ภาคตะวันตกซึ่งเป็นที่ตั้งของมหาวิทยาลัย พารามิเตอร์ที่บ่งชี้ประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ความขุ่นและสารอินทรีย์ในรูป TOC DOC UV-254 และ THMFP

ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

(1) ปริมาณของสารสร้างตะกอนมีผลต่อการบำบัดความขุ่น สารอินทรีย์และ THMFP โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนมีผลให้ร้อยละการบำบัด ความขุ่น สารอินทรีย์และ THMFP เพิ่มขึ้น

(2) pH ตั้งต้นของน้ำมีผลต่อรูปของสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวของสารสร้างตะกอน ดังนั้นการใช้สารสร้างตะกอนแต่ละชนิดควรใช้ pH ตั้งต้นให้เหมาะสม

(3) เมื่อใช้ Anion polymer เพิ่มขึ้นมีผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ต่ำลง

#### 5.1 สรุปผลการทดลองของแม่น้ำแม่กลอง

(1) การทดลองเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  ต่อการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในน้ำ พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของสารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ 40.0 40.0 และ 80.0 mg/L ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าสารอินทรีย์ โดยจากการทดลองต้องใช้ปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  มากกว่า Alum และ PACl ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์

(2) การทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี พบว่า pH ตั้งต้นที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ของ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  คือ pH 7.0 6.5 และ 8.0 ตามลำดับ ดังนั้นใน

กระบวนการบำบัดเพื่อลดปริมาณความขุ่นและสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดควรปรับ pH ตั้งต้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังกล่าว

(3) การทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมต่อการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี พบว่าปริมาณ Anion polymer เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการความขุ่นบำบัดสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากสาร Polymer ที่ใช้เป็นชนิด Anion polymer จึงไม่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ โดยจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าการบำบัดสารอินทรีย์ ปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมสำหรับการรวมตะกอนด้วย Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  คือ 0.20 0.20 และ 0.30 mg/L ตามลำดับ

(4) ค่า THMFP ของน้ำที่บำบัดด้วยสภาวะที่ทำการทดลองมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น THMs ในมาตรฐานของ WHO และ US-EPA กำหนด สรุปได้ว่าสภาวะการบำบัดตามการทดลองนี้สามารถบำบัดน้ำให้ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคในแง่ของการเกิด THMs

(5) เมื่อคัดเลือกสภาวะจากการทดลองทั้ง 3 สภาวะของแม่น้ำแม่กลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับระบบประปา พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงกัน แต่การบำบัดสารอินทรีย์และค่า THMFP จากสภาวะการทดลองสามารถบำบัดได้ดีกว่าระบบประปาอย่างมีนัยสำคัญ

(6) เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการใช้งานและค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี สภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประยุกต์ในระบบประปา คือ สภาวะที่ 1 เนื่องจาก Alum เป็นสารที่ระบบประปาใช้จริงในปัจจุบันและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าสภาวะอื่น ๆ

(7) ผลการทดลองพบว่าศักยภาพการเกิด THMFP แปรผันตามค่า TOC DOC และ UV-254 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP ขึ้นอยู่กับ UV-254 มากที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่าสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างอะโรมาติกเป็นสารตั้งต้นหลักในการก่อให้เกิด THMs

## 5.2 สรุปผลการทดลองของแม่น้ำท่าจีน

(1) จากการทดลองเพื่อหาปริมาณสารสร้างตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  ต่อการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ในน้ำ พบว่าปริมาณที่เหมาะสมของสารทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ 60.0 40.0 และ 80.0 mg/L ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารสร้างตะกอนทั้ง 3 ชนิดทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงกว่าสารอินทรีย์ โดยจากการทดลองต้องใช้ปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  มากกว่า Alum และ PACl ในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์

(2) การทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี พบว่า pH ตั้งต้นที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ของ Alum และ PACl คือ pH 6.0 ส่วน pH ตั้งต้นที่เหมาะสมในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์ของ  $\text{FeCl}_3$  คือ pH 8.0 ดังนั้นในกระบวนการบำบัดเพื่อลดปริมาณความขุ่นและสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพที่สุดควรปรับ pH ตั้งต้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมดังกล่าว

(3) การทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมในการบำบัดสารอินทรีย์ ด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมี พบว่าปริมาณ Anion polymer ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นสูงขึ้น ซึ่งตรงข้ามกับการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำลง เนื่องจากสาร Polymer ที่ใช้เป็นชนิด Anion polymer จึงไม่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ โดยจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นได้ดีกว่าสารอินทรีย์ ปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมสำหรับการรวมตะกอนด้วย Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  คือ 0.10 0.10 mg/L และ 0.30 mg/L ตามลำดับ

(4) ค่า THMFP ของน้ำที่บำบัดด้วยสภาวะที่ทำการทดลองมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้น THMs ในมาตรฐานของ WHO และ US-EPA กำหนด สรุปได้ว่าสภาวะการบำบัดตามการทดลองนี้สามารถบำบัดน้ำให้ปลอดภัยต่อการอุปโภคบริโภคในแง่ของการเกิด THMs

(5) เมื่อคัดเลือกสภาวะจากการทดลองทั้ง 3 สภาวะของแม่น้ำท่าจีนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดกับระบบประปา พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นใกล้เคียงกัน แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และค่า THMFP จากสภาวะการทดลองสามารถบำบัดได้ดีกว่าระบบประปาอย่างมีนัยสำคัญ

(6) เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการใช้งานและค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี สภาวะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประยุกต์ในระบบประปาคือ สภาวะที่ 1 เนื่องจาก Alum เป็นสารที่ระบบประปาใช้จริงในปัจจุบันและค่าใช้จ่ายต่ำกว่าสภาวะอื่น ๆ

(7) ผลการทดลองพบว่าศักยภาพการเกิด THMFP แปรผันตามค่า TOC DOC และ UV-254 โดยความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP ขึ้นอยู่กับ UV-254 มากที่สุด ดังนั้นสรุปได้ว่าสารอินทรีย์มีโครงสร้างอะโรมาติกเป็นสารตั้งต้นหลักในการก่อให้เกิด THMs

### 5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองของแม่น้ำทั้ง 2 สาย

เมื่อนำผลการทดลองของทั้งสองแม่น้ำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP คือ สารอินทรีย์โครงสร้างอะโรมาติก (UV-254) เมื่อเปรียบเทียบการนำมาใช้จริงในระบบผลิตน้ำประปา พบว่าน้ำจากแม่น้ำแม่กลองมีความเหมาะสมในการผลิตน้ำประปามากกว่าน้ำจากแม่น้ำท่าจีน เนื่องจากน้ำดิบจากแม่น้ำแม่กลองมีความขุ่นสารอินทรีย์ และค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดต่ำกว่าแม่น้ำท่าจีน

#### 5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการใช้ปริมาณ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  เพื่อบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์รูปต่าง ๆ พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นและสารอินทรีย์เกิดได้เป็นอย่างดี ดังนั้นควรทดลองเพิ่มเติมโดยการปรับปริมาณ Alum PACl และ  $\text{FeCl}_3$  ให้มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ประสิทธิภาพเกิดได้ดียิ่งขึ้นและประหยัดต้นทุนการผลิตน้ำประปา

2. ควรใช้ Cation polymer แทนการใช้ Anion polymer เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ ซึ่งเป็น THM precursors

### บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. 2553. สารสนเทศคุณภาพน้ำจากสถานีอัตโนมัติกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. [Online] . Available : <http://58.137.231.37/wqm/GGW/>, วันที่สืบค้น 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2553
- กรมชลประทาน. 2553. โครงการศึกษาเพื่อทำแผนหลักรองรับการพัฒนาแหล่งน้ำและปรับปรุงโครงการชลประทาน. [Online]. Available: <http://kromchol.rid.go.th/lproject/2010/index.php/th/2010-07-28-03-20-07/79--25-/224-14->, วันที่สืบค้น 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554
- กฤษฎา ชูติมา. 2536. หลักเคมีทั่วไป เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 10 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- การประปานครหลวง. 2553 . คลอรีน (Chlorine). [Online]. Available : <http://www.mwa.co.th/download/etc01/chlorine.pdf> , วันที่สืบค้น 30 สิงหาคม พ.ศ. 2553
- ปิยรัตน์ สารวงษ์. 2545. การกำจัดกรดอิมิกในน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปา โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโคโคแซนและเบนโทไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. 2550. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกกูเลชัน (Flocculation). [Online]. Available:[http://www.mwa.co.th/download/prd01/water\\_technology/pdf\\_water\\_treatment\\_plant/coagulation.pdf](http://www.mwa.co.th/download/prd01/water_technology/pdf_water_treatment_plant/coagulation.pdf), วันที่สืบค้น 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2550
- มันสิน ดันทุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1 . โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร.
- มันสิน ดันทุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.
- มัลลิกา ปัญญาอะโป . 2551. การจัดการของเสียอันตราย. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. บริษัท จรัสสินทวงศ์การพิมพ์ จำกัด พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม.
- มัลลิกา ปัญญาอะโป . 2549. การฆ่าเชื้อโรค ในเอกสารประกอบการสอนรายวิชา 516450 การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.

- มัลลิกา ปัญญาอะโป และผ่องศรี เผ่าภูรี. 2550. การกำจัดการอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารประกอบไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนกรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลอง ในแบบเสนอโครงการวิจัยทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.
- วิมลีน แก้วทอง. 2539. การลดปริมาณการเกิดไตรฮาโลมีเทนด้วยสารโพลีอะลูมินัมคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- สุรพงษ์ วัฒนะจิระ, จรงค์พันธ์ มุสิกวงษ์, อรทัย เพิ่มสุข และ ประเสริฐ ภูวสันต์. 2547. การกำจัดตัวแทน ของสารอินทรีย์ธรรมชาติและความเป็นพิษในการพบสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปาที่ผลิตจากการประปาขนาดเล็กในจังหวัดเชียงใหม่. วารสารสงขลานครินทร์ วิทยาศาสตร์. 26 (ฉบับพิเศษ 1): 25-35.
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 5. 2553. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม 2552. [Online]. Available: <http://www.reo05monre.com/download.php>, วันที่สืบค้น 30 มกราคม พ.ศ. 2554
- สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 8. 2553. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม 2552. [Online]. Available: [http://www.envwest.com/present/report\\_soc%202552.pdf](http://www.envwest.com/present/report_soc%202552.pdf), วันที่สืบค้น 30 มกราคม พ.ศ. 2554
- อนรรฆยา พรหมวงศ์. 2546. การกำจัดการตั้งต้นของไตรฮาโลมีเทนในน้ำประปา โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและเบนโทไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Abdullah, M. P., Yew, C.H and Ramli, M. S., 2003. Water Research. Foramation, Modelling and Validation of Trihalomethanes (THM) in Malaysian Drinking Water : a Case Study in the District of Tampin, Negeri Sembilan and Sabak Bernam, Selangor, Malaysia. Water Research. 37: 4637-4644.
- Abbas, H. S., Abdul-Fattah, M. A., Saadi K. A-N. 2009. Natural organic matter removal from Tigris River water in Baghdad, Iraq. Desalination 245 : 155-168.
- Amuda, O.S. and Amoo, I.A. 2006. Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater. Desalination 196: 22-31.
- APHA., AWWA., WPCF. 2005. Collection and preservation of samples. In Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater , 19<sup>th</sup> ed. Edited by M.A.H. Franson. American Public Health Association, Washington, D.C.

- Faust, S. D. and Aly. O. M., 1997 Chemistry of Water Treatment. Ann Arbor Press, 2<sup>nd</sup> edition, Chelsea.
- Duong, H.A., Berg M., Pha H.V., Gallard H., Giger W. and Gunten U. 2003. Trihalomethanes formation by chlorination of ammonium and bromide-containing groundwater in water supplies of Hanoi, Vietnam. *Water Research*. 37: 3242-3252.
- Gregor, J. E., Nokes, C. J. and Fenton, E. 1997. Optimising Natural Organic Matter Removal from low Turbidity Waters By Controlled pH Adjustment of aluminium Coagulation. Institute of Environmental Science and Research Limited, Christchurch, New Zealand, 2949-2957.
- Ghosh A., Eduardo, S.A. and Wendell E. 2006. Effect of pH, competitive anions and NOM on the leaching of arsenic from solid residuals. *Science of the Total Environment* 363: 46-59.
- Goslan, E.H., Filiz G., Jenny B and Simon A. P. 2006. An investigation into reservoir NOM reduction by UV photolysis and advanced oxidation processes. *Chemosphere* 65:1113-1119.
- Iriarte-Velasco, U., Jon I. A. and Juan R. G. 2005. Enhanced coagulation under changing alkalinity-hardness condition and its implication on trihalomethane precursors removal and relationship with UV absorbance. Department of Chemical Engineering, Faculty of Science and Technology, University of The Basque Country, P.O. Box 644, E-48080 Bilbao, Spain.
- Jinfeng L., Tao Z., Jun M. and Zhonglin C. 2009. Evaluation of disinfection by-products formation during chlorination and chloramination of dissolved natural organic matter fractions isolated from a filtered river water. *Journal of Hazardous Materials* 162: 140-145.
- Jinming D. and John G. 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science* 100-102: 475-502.
- Joo, D.J., Won S. S., Jeong-Hak, C., Sang J. C., Myung-Chul, K., Myung Ho, H., Tae, W. H. and Young-Hun, K. 2007. Decolorization of reactive dyes using inorganic coagulants and synthetic polymer. *Dyes and Pigments* 73: 59-64.
- Kabsch-Korbutowicz, M. 2005. Application of ultrafiltration integrated with coagulation for improved NOM removal. *Desalination* 174: 13-22.

- Kabsch-Korbutowicz, M. 2005. Effect of Al coagulant type on natural organic matter removal efficiency in coagulation/ultrafiltration process. *Desalination* 185: 327-333.
- Kabsch-Korbutowicz, M. 2006. Impact of pre-coagulation on ultrafiltration process performance. *Desalination* 194: 232-238.
- Kim H. and Yu M. 2005. Characterization of Natural Organic Matter in Conventional Water Treatment Processes for Selection of Treatment Processes Focused on DBPs Control. *Water Research*, 39: 4779-4789.
- Kulkarni, P. and Chellam S. 2010. Disinfection by-product formation following chlorination of drinking water: Artificial neural network models and changes in speciation with treatment. *Science of the Total Environment* 408: 4202-4210.
- Musikavong, C., Suraphong W., Tana F. M. and Prasert P. 2005. Reduction of organic matter and trihalomethane formation potential in reclaimed water from treated industrial estate wastewater by coagulation. *Journal of Hazardous Materials B127*: 48-57.
- Ottawa, Ontario. 2006, Trihalomethanes, Guidelines for Canadian Drinking Water Quality: Guideline Technical Document. Federal-Provincial-Territorial Committee on health and the Environment, Health Canada.
- Qin, J., Maung H. O., Kiran A. K., Frans K, and Peter M. 2006. Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water. *Separation and Purification Technology* 49: 295-298.
- Qin, J., Maung H. O., Kiran A. K., Frans K, and Peter M. 2006. Reservoir water treatment using hybrid coagulation-ultrafiltration. *Desalination* 193: 344-349.
- Rizzo, L., Belgiorno, V., Gallo, M. and Meric, S. 2005. Removal of THM Precursors from a High-alkaline Surface Water by Enhanced Coagulation and Behavior of THMFP toxicity on *D. magna*. *Desalination*. 176: 177-188.
- Roccaro, P., Mancini, G. and Vagliasindi F., 2005. Water intended for human consumption-Part I : Compliance with European water quality standards. *Desalination*. 176: 1-11.
- Rodriguez, M. J., Serodes, J. and Levallois, P., 2004. Behavior of trihalomethanes and haloacetic acids in a drinking water distribution System. *Water Research*. 38: 4367-4382.

- Selcuk, H., Rizzo L., Anastasia N. N., Sureya M., Vincenzo B. and Miray B. 2005. DBPs formation and toxicity monitoring in different origin water treated by ozone and alum/PAC coagulation.
- Sharp, E.L., Jarvis P., Parsons S.A. and Jefferson B. 2006. Impact of fractional character on the coagulation of NOM. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 286: 104-111.
- Sharp, E.L., Simon A., Parsons S.A. and Bruce J. 2006. Seasonal variations in natural organic matter and its impact on coagulation in water treatment. *Science of the Total Environment* 363: 183-194.
- Sharp, E.L., Simon A., Parsons S.A. and Bruce J. 2006. The impact of seasonal variations in DOC arising from a moorland peat catchment on coagulation with iron and aluminium-salts. *Environmental Pollution* 140: 436-443.
- Stevena, A.A., Slocum, C.R., Swwger, D.R., and Robeck, G.G. 1976. Chlorination of organic in drinking water. *J.AWWA*. 615-620.
- Tokmak B., Capar G., Dilek F.B. and Yetis U. 2003. Trihalomethanes and associated potential cancer risks in the water supply in Ankara, Turkey. *Environmental Research*. 96: 345-352.
- Wang G.S., Deng Y.C. and Lin T.F. 2007. Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water. *Science of The total Environment*. 387: 86-95.
- US-EPA. (1999). EPA Guidance Manual, Alternative Disinfectants and Oxidants. April 1999.
- Uyak, V. and Ismail T. 2007. Disinfection by-product precursors reduction by various coagulation techniques in Istanbul water supplies. *Journal of Hazardous Materials* 141: 320-328.
- Van, J., Daly R. and Holmes M. 2005. Modeling the treatment of drinking water to maximize dissolved organic matter removal and minimize disinfection by-product formation. *Desalination* 176: 81-89.
- Sun, Y-X., Wu, Q-Y., Hu, H-Y. and Tian, J. 2009. Effect of bromide on the formation of disinfection by-products during wastewater chlorination. *Water Research* 43: 2391-2398.
- Zularisam, A.W., Ismail A .F. and Razman S. 2006. Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment-areview. *Desalination* 194: 211-231.

Zhonglian, Y., Baoyu, G. and Qinyan, Y. 2010. Coagulation performance and residual aluminum speciation of  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment. Chemical Engineering Journal 165: 122-132.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
ผลการทดลอง

### ตอนที่ ก-1 ผลการทดลองของแม่น้ำแม่กลอง

#### (1) การรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate, Alum)

ตารางที่ 13 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสม

| Alum dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|           |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ    | $16.50 \pm 0.85$         | $2.57 \pm 0.14$     | $0.1214 \pm 0.0134$                  | -           | -     | -      |
| 10.0      | $2.45 \pm 0.14$          | $2.27 \pm 0.13$     | $0.1098 \pm 0.0042$                  | 85.15       | 11.64 | 9.56   |
| 20.0      | $1.69 \pm 0.20$          | $2.13 \pm 0.20$     | $0.0870 \pm 0.0035$                  | 89.76       | 17.20 | 28.34  |
| 40.0      | $1.35 \pm 0.13$          | $1.61 \pm 0.10$     | $0.1053 \pm 0.0042$                  | 91.82       | 37.19 | 13.26  |
| 60.0      | $0.47 \pm 0.03$          | $1.80 \pm 0.18$     | $0.0534 \pm 0.0095$                  | 97.15       | 29.99 | 56.01  |
| 80.0      | $0.42 \pm 0.01$          | $1.84 \pm 0.07$     | $0.0921 \pm 0.0014$                  | 97.45       | 28.41 | 24.14  |
| 100.0     | $0.38 \pm 0.36$          | $2.05 \pm 0.06$     | $0.0661 \pm 0.0042$                  | 97.70       | 20.01 | 45.55  |

หมายเหตุ ควบคุม pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 14 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ Alum

| Initial pH | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|            |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ     | $18.10 \pm 0.42$         | $3.56 \pm 0.99$     | $0.1292 \pm 0.0086$                  | -           | -     | -      |
| 4.0        | $6.30 \pm 0.40$          | $3.00 \pm 0.21$     | $0.1237 \pm 0.0042$                  | 65.19       | 15.63 | 4.26   |
| 5.0        | $1.46 \pm 0.14$          | $2.92 \pm 0.04$     | $0.0541 \pm 0.0059$                  | 91.93       | 17.94 | 58.13  |
| 6.0        | $2.33 \pm 0.20$          | $2.71 \pm 0.08$     | $0.0460 \pm 0.0113$                  | 87.13       | 23.91 | 64.40  |
| 7.0        | $1.81 \pm 0.18$          | $2.21 \pm 0.11$     | $0.0332 \pm 0.0028$                  | 90.00       | 37.99 | 74.30  |
| 8.0        | $1.85 \pm 0.04$          | $2.59 \pm 0.04$     | $0.0625 \pm 0.0038$                  | 89.78       | 27.37 | 51.63  |
| 9.0        | $2.02 \pm 0.08$          | $2.75 \pm 0.01$     | $0.0866 \pm 0.0016$                  | 88.84       | 32.97 | 22.84  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ Alum=50.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 15 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ Alum

| Polymer dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|              |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ       | $18.10 \pm 0.42$         | $2.71 \pm 0.08$     | $0.0625 \pm 0.0040$                  | -           | -     | -      |
| 0.05         | $2.38 \pm 0.13$          | $2.46 \pm 0.06$     | $0.0878 \pm 0.0035$                  | 86.85       | 9.11  | 16.46  |
| 0.10         | $1.70 \pm 0.24$          | $2.04 \pm 0.11$     | $0.0625 \pm 0.0098$                  | 90.61       | 22.30 | 40.53  |
| 0.15         | $1.17 \pm 0.14$          | $2.18 \pm 0.04$     | $0.0317 \pm 0.0017$                  | 93.54       | 24.80 | 69.84  |
| 0.20         | $1.42 \pm 0.01$          | $2.04 \pm 0.13$     | $0.0265 \pm 0.0014$                  | 92.15       | 31.75 | 74.79  |
| 0.25         | $1.30 \pm 0.01$          | $2.10 \pm 0.03$     | $0.0480 \pm 0.0007$                  | 92.82       | 19.47 | 54.33  |
| 0.30         | $0.80 \pm 0.03$          | $1.85 \pm 0.03$     | $0.0475 \pm 0.0014$                  | 95.58       | 24.49 | 54.80  |

หมายเหตุ: ควบคุมปริมาณ Alum=50.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=7.0

ตารางที่ 16 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ Alum

| Initial pH | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | TOC $\pm$ SD (mg/L) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | THMFP $\pm$ SD ( $\mu\text{g/L}$ ) |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| น้ำดิบ     | $17.60 \pm 0.07$         | $2.74 \pm 0.17$     | $1.81 \pm 0.04$     | $0.0631 \pm 0.0109$                  | $83.78 \pm 1.23$                   |
| 6.0        | $1.92 \pm 0.06$          | $2.01 \pm 0.06$     | $1.65 \pm 0.03$     | $0.0621 \pm 0.0003$                  | $56.27 \pm 0.41$                   |
| 6.5        | $1.62 \pm 0.14$          | $1.40 \pm 0.10$     | $1.52 \pm 0.06$     | $0.0564 \pm 0.0021$                  | $51.06 \pm 0.04$                   |
| 7.0        | $1.21 \pm 0.07$          | $1.38 \pm 0.21$     | $1.12 \pm 0.23$     | $0.0547 \pm 0.0098$                  | $49.17 \pm 0.04$                   |
| 7.5        | $1.43 \pm 0.06$          | $2.04 \pm 0.24$     | $1.29 \pm 0.14$     | $0.0400 \pm 0.0075$                  | $51.71 \pm 1.13$                   |
| 8.0        | $1.55 \pm 0.03$          | $2.23 \pm 0.16$     | $1.39 \pm 0.16$     | $0.0579 \pm 0.0025$                  | $51.33 \pm 0.14$                   |
| 8.5        | $1.87 \pm 0.07$          | $2.20 \pm 0.18$     | $1.71 \pm 0.35$     | $0.0624 \pm 0.0042$                  | $56.04 \pm 0.08$                   |

หมายเหตุ: ควบคุมปริมาณ Alum=50.0 mg/L และ Anion polymer=0.20 mg/L

ตารางที่ 17 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อกำหนดค่า pH ตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย Alum

| Initial<br>pH | (%Removal) |       |       |        |       |
|---------------|------------|-------|-------|--------|-------|
|               | Turbidity  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 6.0           | 89.09      | 26.63 | 9.06  | 1.58   | 32.84 |
| 6.5           | 90.80      | 49.00 | 16.21 | 10.62  | 39.05 |
| 7.0           | 93.13      | 49.56 | 38.03 | 13.31  | 41.31 |
| 7.5           | 91.88      | 25.31 | 28.83 | 36.61  | 38.28 |
| 8.0           | 91.19      | 18.69 | 23.23 | 8.24   | 38.73 |
| 8.5           | 89.38      | 19.55 | 5.43  | 1.11   | 33.11 |

หมายเหตุ: ความเข้มข้น Alum=50.0 mg/L และ Anion polymer=0.20 mg/L

## (2)การรวมตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACl)

ตารางที่ 18 ผลการทดลองเพื่อกำหนดปริมาณ PACl ที่เหมาะสม

| PACl<br>dose | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|--------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|              |                             |                        |                                        | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ       | 12.60 $\pm$ 0.23            | 5.83 $\pm$ 0.07        | 0.0971 $\pm$ 0.0109                    | -           | -     | -      |
| 10.0         | 1.03 $\pm$ 0.14             | 5.39 $\pm$ 0.01        | 0.0582 $\pm$ 0.0010                    | 91.83       | 7.47  | 40.06  |
| 20.0         | 1.08 $\pm$ 0.06             | 5.11 $\pm$ 0.14        | 0.0543 $\pm$ 0.0014                    | 94.29       | 12.33 | 44.08  |
| 40.0         | 0.72 $\pm$ 0.01             | 3.80 $\pm$ 0.08        | 0.0535 $\pm$ 0.0054                    | 91.43       | 34.81 | 44.90  |
| 60.0         | 2.32 $\pm$ 0.03             | 5.14 $\pm$ 0.07        | 0.0623 $\pm$ 0.0054                    | 81.59       | 11.71 | 35.84  |
| 80.0         | 2.58 $\pm$ 0.03             | 4.86 $\pm$ 0.07        | 0.0671 $\pm$ 0.0014                    | 79.52       | 16.61 | 30.89  |
| 100.0        | 1.32 $\pm$ 0.01             | 4.06 $\pm$ 0.04        | 0.0638 $\pm$ 0.0010                    | 89.52       | 30.37 | 34.29  |

หมายเหตุ: ความเข้มข้น pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 19 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ PACl

| Initial<br>pH | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|---------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|               |                             |                        |                                        | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ        | 18.50 $\pm$ 0.28            | 2.58 $\pm$ 0.01        | 0.0798 $\pm$ 0.0042                    | -           | -     | -      |
| 4.0           | 8.68 $\pm$ 0.04             | 2.24 $\pm$ 0.03        | 0.0635 $\pm$ 0.0025                    | 53.08       | 12.86 | 20.43  |
| 5.0           | 7.53 $\pm$ 0.06             | 1.85 $\pm$ 0.10        | 0.0581 $\pm$ 0.0007                    | 59.30       | 28.01 | 27.19  |
| 6.0           | 0.66 $\pm$ 0.04             | 1.70 $\pm$ 0.01        | 0.0461 $\pm$ 0.0089                    | 96.43       | 33.88 | 42.23  |
| 7.0           | 0.93 $\pm$ 0.01             | 2.06 $\pm$ 0.01        | 0.0627 $\pm$ 0.0014                    | 88.97       | 20.25 | 21.43  |
| 8.0           | 0.79 $\pm$ 0.01             | 2.15 $\pm$ 0.04        | 0.0475 $\pm$ 0.0027                    | 95.73       | 16.41 | 40.48  |
| 9.0           | 2.04 $\pm$ 0.03             | 2.44 $\pm$ 0.14        | 0.0768 $\pm$ 0.0018                    | 94.97       | 5.26  | 3.76   |

หมายเหตุ: ความคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10mg/L

ตารางที่ 20 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ PACl

| Polymer<br>dose | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|                 |                             |                        |                                        | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ          | 18.50 $\pm$ 0.28            | 2.59 $\pm$ 0.04        | 0.0834 $\pm$ 0.0038                    | -           | -     | -      |
| 0.05            | 3.54 $\pm$ 0.03             | 1.97 $\pm$ 0.01        | 0.0740 $\pm$ 0.0049                    | 80.87       | 24.05 | 11.27  |
| 0.10            | 3.22 $\pm$ 0.14             | 1.63 $\pm$ 0.03        | 0.0694 $\pm$ 0.0057                    | 82.60       | 37.58 | 16.79  |
| 0.15            | 1.41 $\pm$ 0.04             | 1.74 $\pm$ 0.13        | 0.0719 $\pm$ 0.0018                    | 92.38       | 32.80 | 13.79  |
| 0.20            | 0.98 $\pm$ 0.01             | 1.40 $\pm$ 0.08        | 0.0526 $\pm$ 0.0028                    | 94.70       | 46.08 | 36.90  |
| 0.25            | 3.54 $\pm$ 0.16             | 1.59 $\pm$ 0.23        | 0.0635 $\pm$ 0.0028                    | 80.87       | 38.68 | 23.86  |
| 0.30            | 2.39 $\pm$ 0.03             | 1.64 $\pm$ 0.13        | 0.0641 $\pm$ 0.0014                    | 87.08       | 36.55 | 23.14  |

หมายเหตุ: ความคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0

ตารางที่ 21 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ PACl

| Initial<br>pH | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | TOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | THMFP $\pm$ SD<br>( $\mu$ g/L) |
|---------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| น้ำดิบ        | 17.60 $\pm$ 0.42            | 2.83 $\pm$ 0.14        | 1.99 $\pm$ 0.18        | 0.0765 $\pm$ 0.0018                    | 83.78 $\pm$ 1.23               |
| 5.0           | 1.72 $\pm$ 0.13             | 1.53 $\pm$ 0.25        | 1.66 $\pm$ 0.04        | 0.0635 $\pm$ 0.0006                    | 50.19 $\pm$ 0.52               |
| 5.5           | 1.58 $\pm$ 0.16             | 1.32 $\pm$ 0.01        | 1.31 $\pm$ 0.03        | 0.0450 $\pm$ 0.0031                    | 48.68 $\pm$ 1.00               |
| 6.0           | 1.45 $\pm$ 0.11             | 1.27 $\pm$ 0.06        | 1.29 $\pm$ 0.01        | 0.0626 $\pm$ 0.0013                    | 49.95 $\pm$ 0.23               |
| 6.5           | 0.96 $\pm$ 0.01             | 1.23 $\pm$ 0.06        | 1.01 $\pm$ 0.06        | 0.0442 $\pm$ 0.0030                    | 43.45 $\pm$ 0.24               |
| 7.0           | 1.12 $\pm$ 0.04             | 1.58 $\pm$ 0.04        | 1.39 $\pm$ 0.04        | 0.0506 $\pm$ 0.0068                    | 48.25 $\pm$ 1.56               |
| 7.5           | 1.25 $\pm$ 0.03             | 1.62 $\pm$ 0.03        | 1.95 $\pm$ 0.01        | 0.0661 $\pm$ 0.0042                    | 52.15 $\pm$ 0.11               |

หมายเหตุ: ความเข้มข้น PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.20 mg/L

ตารางที่ 22 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย PACl

| Initial<br>pH | (%Removal) |       |       |        |       |
|---------------|------------|-------|-------|--------|-------|
|               | Turbidity  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 5.0           | 90.23      | 45.91 | 16.64 | 16.99  | 40.09 |
| 5.5           | 91.02      | 53.29 | 34.12 | 41.18  | 41.90 |
| 6.0           | 91.76      | 55.15 | 34.98 | 18.17  | 40.38 |
| 6.5           | 94.55      | 56.36 | 49.15 | 42.22  | 48.14 |
| 7.0           | 93.64      | 44.10 | 29.86 | 33.86  | 42.41 |
| 7.5           | 92.90      | 42.58 | 1.62  | 13.59  | 37.75 |

หมายเหตุ: ความเข้มข้น PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.20 mg/L

(1) การรวมตะกอนด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride,  $\text{FeCl}_3$ )

ตารางที่ 23 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ที่เหมาะสม

| FeCl <sub>3</sub><br>dose | Turbidity ± SD<br>(NTU) | DOC ± SD<br>(mg/L) | UV-254 ± SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|---------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------|-------------|-------|--------|
|                           |                         |                    |                                    | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ                    | 18.50 ± 0.28            | 2.68 ± 0.20        | 0.1034 ± 0.0004                    | -           | -     | -      |
| 10.0                      | 5.33 ± 0.07             | 2.37 ± 0.04        | 0.1031 ± 0.0004                    | 71.19       | 11.34 | 0.29   |
| 20.0                      | 4.68 ± 0.17             | 2.38 ± 0.08        | 0.0995 ± 0.0042                    | 74.70       | 11.20 | 3.77   |
| 40.0                      | 2.36 ± 0.03             | 1.50 ± 0.04        | 0.0918 ± 0.0021                    | 87.24       | 43.89 | 11.22  |
| 60.0                      | 0.86 ± 0.04             | 1.21 ± 0.03        | 0.0851 ± 0.0003                    | 95.35       | 54.92 | 17.70  |
| 80.0                      | 1.02 ± 0.07             | 1.33 ± 0.07        | 0.0885 ± 0.0013                    | 94.49       | 50.24 | 14.41  |
| 100.0                     | 2.02 ± 0.11             | 1.65 ± 0.06        | 0.0905 ± 0.0023                    | 89.08       | 38.30 | 12.48  |

หมายเหตุ ควบคุม pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 24 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Initial<br>pH | Turbidity ± SD<br>(NTU) | DOC ± SD<br>(mg/L) | UV-254 ± SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|---------------|-------------------------|--------------------|------------------------------------|-------------|-------|--------|
|               |                         |                    |                                    | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ        | 18.50 ± 0.28            | 2.29 ± 0.06        | 0.5812 ± 0.0033                    | -           | -     | -      |
| 4.0           | 3.83 ± 0.07             | 2.26 ± 0.07        | 0.1037 ± 0.0086                    | 79.30       | 1.67  | 82.16  |
| 5.0           | 3.78 ± 0.16             | 2.17 ± 0.06        | 0.0837 ± 0.0007                    | 79.57       | 5.33  | 85.60  |
| 6.0           | 2.98 ± 0.03             | 2.21 ± 0.16        | 0.2036 ± 0.0054                    | 83.89       | 3.50  | 64.97  |
| 7.0           | 1.75 ± 0.03             | 1.77 ± 0.03        | 0.0755 ± 0.0030                    | 90.54       | 22.72 | 87.01  |
| 8.0           | 0.85 ± 0.03             | 1.69 ± 0.06        | 0.0453 ± 0.0017                    | 95.41       | 26.50 | 92.21  |
| 9.0           | 1.59 ± 0.06             | 1.74 ± 0.03        | 0.0744 ± 0.0013                    | 91.41       | 24.24 | 87.20  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3$ =80.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 25 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Polymer dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|              |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ       | $17.90 \pm 0.42$         | $3.60 \pm 0.10$     | $0.1306 \pm 0.0014$                  | -           | -     | -      |
| 0.05         | $3.64 \pm 0.01$          | $3.30 \pm 0.17$     | $0.0654 \pm 0.0079$                  | 79.67       | 8.27  | 49.92  |
| 0.10         | $2.17 \pm 0.06$          | $3.30 \pm 0.08$     | $0.0713 \pm 0.0034$                  | 87.88       | 8.17  | 45.41  |
| 0.15         | $1.54 \pm 0.04$          | $3.20 \pm 0.11$     | $0.0613 \pm 0.0023$                  | 91.40       | 10.92 | 53.06  |
| 0.20         | $1.08 \pm 0.07$          | $3.02 \pm 0.13$     | $0.0520 \pm 0.0011$                  | 93.97       | 16.02 | 60.18  |
| 0.25         | $1.02 \pm 0.07$          | $2.90 \pm 0.04$     | $0.0485 \pm 0.0024$                  | 94.30       | 19.46 | 62.86  |
| 0.30         | $0.65 \pm 0.13$          | $2.47 \pm 0.16$     | $0.0364 \pm 0.0033$                  | 96.37       | 31.25 | 72.13  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0$  mg/L และ pH ตั้งต้น=8.0

ตารางที่ 26 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Initial pH | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | TOC $\pm$ SD (mg/L) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | THMFP $\pm$ SD ( $\mu\text{g/L}$ ) |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| น้ำดิบ     | $17.80 \pm 0.14$         | $1.98 \pm 0.42$     | $2.13 \pm 0.07$     | $0.0726 \pm 0.0047$                  | $83.78 \pm 1.23$                   |
| 7.0        | $1.22 \pm 0.06$          | $1.39 \pm 0.10$     | $1.53 \pm 0.01$     | $0.0542 \pm 0.0035$                  | $51.47 \pm 0.72$                   |
| 7.5        | $1.05 \pm 0.10$          | $1.08 \pm 0.04$     | $1.32 \pm 0.07$     | $0.0520 \pm 0.0011$                  | $46.80 \pm 0.52$                   |
| 8.0        | $0.75 \pm 0.10$          | $0.92 \pm 0.06$     | $1.17 \pm 0.11$     | $0.0402 \pm 0.0017$                  | $42.69 \pm 0.82$                   |
| 8.5        | $0.55 \pm 0.03$          | $1.15 \pm 0.25$     | $1.23 \pm 0.07$     | $0.0414 \pm 0.0024$                  | $42.93 \pm 0.28$                   |
| 9.0        | $0.63 \pm 0.03$          | $1.32 \pm 0.03$     | $1.58 \pm 0.14$     | $0.0585 \pm 0.0008$                  | $44.48 \pm 0.14$                   |
| 9.5        | $0.58 \pm 0.03$          | $1.35 \pm 0.10$     | $1.62 \pm 0.03$     | $0.0681 \pm 0.0040$                  | $45.80 \pm 1.44$                   |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0$  mg/L และ Anion polymer=0.30 mg/L

ตารางที่ 27 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย  $\text{FeCl}_3$

| Initial<br>pH | %Removal  |       |       |        |       |
|---------------|-----------|-------|-------|--------|-------|
|               | Turbidity | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 7.0           | 93.15     | 30.03 | 28.12 | 25.34  | 44.14 |
| 7.5           | 94.10     | 45.29 | 37.92 | 28.37  | 45.33 |
| 8.0           | 95.79     | 53.78 | 45.10 | 44.36  | 49.05 |
| 8.5           | 96.91     | 42.22 | 42.00 | 42.98  | 48.76 |
| 9.0           | 96.46     | 33.49 | 25.71 | 19.42  | 46.91 |
| 9.5           | 96.74     | 31.95 | 23.69 | 6.20   | 38.57 |

หมายเหตุ: ความคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ Anion polymer=0.30 mg/L

## ตอนที่ ก-2 ผลการทดลองของแม่น้ำท่าจีน

### (1)การรวมตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminium sulfate: Alum)

ตารางที่ 28 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Alum ที่เหมาะสม

| Alum dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|           |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ    | 33.00 $\pm$ 0.42         | 7.92 $\pm$ 0.24     | 0.2257 $\pm$ 0.0025                  | -           | -     | -      |
| 10.0      | 2.91 $\pm$ 0.04          | 7.44 $\pm$ 0.15     | 0.2018 $\pm$ 0.0005                  | 91.18       | 5.97  | 10.59  |
| 20.0      | 1.62 $\pm$ 0.00          | 6.96 $\pm$ 0.11     | 0.1547 $\pm$ 0.0001                  | 95.09       | 12.03 | 31.46  |
| 40.0      | 0.69 $\pm$ 0.06          | 6.17 $\pm$ 0.16     | 0.1144 $\pm$ 0.0003                  | 97.91       | 22.03 | 49.31  |
| 60.0      | 0.39 $\pm$ 0.06          | 5.13 $\pm$ 0.04     | 0.0851 $\pm$ 0.0001                  | 98.82       | 32.27 | 62.30  |
| 80.0      | 0.57 $\pm$ 0.11          | 5.36 $\pm$ 0.06     | 0.1487 $\pm$ 0.0001                  | 98.27       | 35.24 | 34.12  |
| 100.0     | 1.24 $\pm$ 0.07          | 4.53 $\pm$ 0.11     | 0.1782 $\pm$ 0.0001                  | 96.24       | 42.81 | 21.05  |

หมายเหตุ ควบคุม pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 29 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ Alum

| Initial pH | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|            |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ     | 18.30 $\pm$ 0.03         | 7.06 $\pm$ 0.22     | 0.2690 $\pm$ 0.0050                  | -           | -     | -      |
| 4.0        | 5.28 $\pm$ 0.02          | 6.47 $\pm$ 0.03     | 0.2019 $\pm$ 0.0080                  | 71.15       | 8.28  | 24.96  |
| 5.0        | 3.47 $\pm$ 0.03          | 5.91 $\pm$ 0.11     | 0.1669 $\pm$ 0.0022                  | 81.04       | 16.22 | 37.96  |
| 6.0        | 1.94 $\pm$ 0.05          | 5.04 $\pm$ 0.11     | 0.1555 $\pm$ 0.0042                  | 89.40       | 28.64 | 42.19  |
| 7.0        | 0.83 $\pm$ 0.02          | 6.03 $\pm$ 0.27     | 0.1579 $\pm$ 0.0006                  | 95.46       | 14.51 | 41.30  |
| 8.0        | 1.76 $\pm$ 0.04          | 5.58 $\pm$ 0.16     | 0.1831 $\pm$ 0.0080                  | 90.38       | 20.91 | 31.95  |
| 9.0        | 0.85 $\pm$ 0.03          | 6.46 $\pm$ 0.07     | 0.1965 $\pm$ 0.0025                  | 95.36       | 8.48  | 26.97  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ Alum=60.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 30 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ Alum

| Poly-<br>mer<br>dose | Turbidity ±<br>SD<br>(NTU) | DOC ± SD<br>(mg/L) | UV-254 ± SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|----------------------|----------------------------|--------------------|------------------------------------|-------------|-------|--------|
|                      |                            |                    |                                    | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ               | 18.20 ± 0.29               | 7.63 ± 0.07        | 0.2201 ± 0.0021                    | -           | -     | -      |
| 0.05                 | 0.54 ± 0.01                | 5.12 ± 0.20        | 0.1438 ± 0.0068                    | 97.03       | 32.95 | 34.67  |
| 0.10                 | 0.50 ± 0.03                | 4.41 ± 0.11        | 0.1355 ± 0.0004                    | 97.25       | 42.20 | 47.65  |
| 0.15                 | 0.66 ± 0.01                | 4.69 ± 0.43        | 0.1268 ± 0.0001                    | 96.37       | 38.49 | 42.38  |
| 0.20                 | 0.47 ± 0.02                | 5.14 ± 0.01        | 0.1263 ± 0.0015                    | 97.42       | 32.60 | 42.63  |
| 0.25                 | 0.48 ± 0.01                | 4.73 ± 0.14        | 0.1152 ± 0.0008                    | 97.36       | 37.98 | 38.42  |
| 0.30                 | 0.42 ± 0.03                | 5.02 ± 0.18        | 0.1370 ± 0.0043                    | 97.69       | 34.28 | 37.74  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ Alum=60.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0

ตารางที่ 31 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ Alum

| Initial<br>pH | Turbidity ± SD<br>(NTU) | TOC ± SD<br>(mg/L) | DOC ± SD<br>(mg/L) | UV-254 ± SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | THMFP ± SD<br>(µg/L) |
|---------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|----------------------|
| น้ำดิบ        | 15.70 ± 0.03            | 6.04 ± 0.08        | 6.11 ± 0.23        | 0.2055 ± 0.0006                    | 106.53 ± 0.37        |
| 5.0           | 2.74 ± 0.03             | 5.50 ± 0.02        | 5.96 ± 0.03        | 0.1529 ± 0.0026                    | 70.24 ± 0.06         |
| 5.5           | 1.33 ± 0.04             | 4.08 ± 0.07        | 4.34 ± 0.06        | 0.1346 ± 0.0053                    | 65.75 ± 1.07         |
| 6.0           | 0.92 ± 0.04             | 4.01 ± 0.06        | 4.43 ± 0.10        | 0.1328 ± 0.0035                    | 65.20 ± 0.45         |
| 6.5           | 0.91 ± 0.04             | 4.10 ± 0.04        | 4.15 ± 0.04        | 0.1437 ± 0.0017                    | 67.20 ± 0.28         |
| 7.0           | 0.99 ± 0.14             | 4.63 ± 0.15        | 4.63 ± 0.04        | 0.1494 ± 0.0038                    | 72.05 ± 0.28         |
| 7.5           | 1.00 ± 0.14             | 4.70 ± 0.01        | 4.69 ± 0.01        | 0.1573 ± 0.0020                    | 73.06 ± 0.28         |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ Alum=60.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 32 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อกำหนดค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมด้วย Alum

| Initial pH | (%Removal) |       |       |        |       |
|------------|------------|-------|-------|--------|-------|
|            | Turbidity  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 5.0        | 82.55      | 9.47  | 2.48  | 25.62  | 34.07 |
| 5.5        | 91.53      | 34.02 | 30.17 | 34.53  | 38.28 |
| 6.0        | 94.14      | 35.09 | 28.77 | 35.38  | 38.80 |
| 6.5        | 94.20      | 33.63 | 33.50 | 30.07  | 36.92 |
| 7.0        | 93.69      | 24.52 | 25.25 | 27.30  | 32.37 |
| 7.5        | 93.63      | 23.24 | 24.18 | 23.48  | 31.42 |

หมายเหตุ: ควบคุมปริมาณ Alum=60.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

(2) การรวมตะกอนด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride: PACl)

ตารางที่ 33 ผลการทดลองเพื่อกำหนดปริมาณ PACl ที่เหมาะสม

| PACl dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|           |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ    | 7.63 $\pm$ 0.04          | 7.92 $\pm$ 0.23     | 0.2043 $\pm$ 0.0004                  | -           | -     | -      |
| 10.0      | 1.18 $\pm$ 0.14          | 6.96 $\pm$ 0.06     | 0.1856 $\pm$ 0.0011                  | 84.54       | 12.09 | 9.15   |
| 20.0      | 0.96 $\pm$ 0.16          | 6.19 $\pm$ 0.15     | 0.1077 $\pm$ 0.0011                  | 87.42       | 21.75 | 47.28  |
| 40.0      | 0.50 $\pm$ 0.07          | 4.82 $\pm$ 0.15     | 0.1466 $\pm$ 0.0008                  | 93.45       | 39.14 | 28.24  |
| 60.0      | 0.60 $\pm$ 0.07          | 4.88 $\pm$ 0.09     | 0.0927 $\pm$ 0.0017                  | 92.14       | 38.38 | 54.63  |
| 80.0      | 0.48 $\pm$ 0.07          | 5.43 $\pm$ 0.10     | 0.1023 $\pm$ 0.0006                  | 93.71       | 31.43 | 49.93  |
| 100.0     | 0.63 $\pm$ 0.06          | 5.50 $\pm$ 0.10     | 0.1043 $\pm$ 0.0007                  | 91.74       | 30.55 | 48.95  |

หมายเหตุ: ควบคุม pH เริ่มต้น=7.0 และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 34 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ PACl

| Initial<br>pH | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|---------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|               |                             |                        |                                        | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ        | 18.60 $\pm$ 0.07            | 7.06 $\pm$ 0.22        | 0.2690 $\pm$ 0.0049                    | -           | -     | -      |
| 4.0           | 0.61 $\pm$ 0.03             | 6.82 $\pm$ 0.13        | 0.1700 $\pm$ 0.0045                    | 96.72       | 3.27  | 36.82  |
| 5.0           | 0.95 $\pm$ 0.02             | 5.35 $\pm$ 0.04        | 0.1531 $\pm$ 0.0023                    | 94.89       | 24.16 | 43.10  |
| 6.0           | 0.51 $\pm$ 0.03             | 5.39 $\pm$ 0.10        | 0.1362 $\pm$ 0.0015                    | 97.26       | 23.62 | 49.39  |
| 7.0           | 1.73 $\pm$ 0.04             | 5.85 $\pm$ 0.04        | 0.1664 $\pm$ 0.0020                    | 90.70       | 17.05 | 38.16  |
| 8.0           | 3.87 $\pm$ 0.03             | 6.39 $\pm$ 0.16        | 0.2110 $\pm$ 0.0056                    | 79.19       | 9.42  | 21.58  |
| 9.0           | 1.81 $\pm$ 0.04             | 6.60 $\pm$ 0.01        | 0.2174 $\pm$ 0.0008                    | 90.27       | 6.43  | 19.18  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 35 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ PACl

| Polymer<br>dose | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | (% Removal) |       |        |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|                 |                             |                        |                                        | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ          | 17.20 $\pm$ 0.14            | 7.63 $\pm$ 0.07        | 0.2201 $\pm$ 0.0021                    | -           | -     | -      |
| 0.05            | 1.36 $\pm$ 0.06             | 5.80 $\pm$ 0.08        | 0.1354 $\pm$ 0.0001                    | 92.09       | 24.03 | 32.17  |
| 0.10            | 0.79 $\pm$ 0.04             | 6.01 $\pm$ 0.04        | 0.1493 $\pm$ 0.0077                    | 95.41       | 21.23 | 38.49  |
| 0.15            | 0.82 $\pm$ 0.04             | 5.86 $\pm$ 0.04        | 0.1674 $\pm$ 0.0062                    | 95.23       | 23.24 | 23.95  |
| 0.20            | 0.80 $\pm$ 0.03             | 5.52 $\pm$ 0.11        | 0.1856 $\pm$ 0.0001                    | 95.35       | 27.60 | 15.66  |
| 0.25            | 0.82 $\pm$ 0.03             | 5.53 $\pm$ 0.09        | 0.1592 $\pm$ 0.0011                    | 95.12       | 27.55 | 27.68  |
| 0.30            | 0.84 $\pm$ 0.03             | 5.25 $\pm$ 0.04        | 0.1596 $\pm$ 0.0004                    | 95.23       | 31.26 | 27.47  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ pH ตั้งต้น=6.0

ตารางที่ 36 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ PACl

| Initial<br>pH | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | TOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>(cm <sup>-1</sup> ) | THMFP $\pm$<br>( $\mu$ g/L) |
|---------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| น้ำดิบ        | 20.50 $\pm$ 0.24            | 6.70 $\pm$ 0.17        | 6.88 $\pm$ 0.00        | 0.2065 $\pm$ 0.0004                    | 106.53 $\pm$ 0.37           |
| 5.0           | 1.03 $\pm$ 0.51             | 4.68 $\pm$ 0.10        | 4.68 $\pm$ 0.02        | 0.1158 $\pm$ 0.0018                    | 61.89 $\pm$ 1.63            |
| 5.5           | 1.18 $\pm$ 0.07             | 4.59 $\pm$ 0.02        | 4.94 $\pm$ 0.03        | 0.1124 $\pm$ 0.0003                    | 59.66 $\pm$ 3.11            |
| 6.0           | 0.90 $\pm$ 0.07             | 4.70 $\pm$ 0.15        | 4.66 $\pm$ 0.03        | 0.1145 $\pm$ 0.0009                    | 48.89 $\pm$ 1.63            |
| 6.5           | 1.13 $\pm$ 0.07             | 4.96 $\pm$ 0.04        | 4.85 $\pm$ 0.00        | 0.1311 $\pm$ 0.0046                    | 52.04 $\pm$ 4.64            |
| 7.0           | 1.17 $\pm$ 0.20             | 5.15 $\pm$ 0.12        | 4.98 $\pm$ 0.03        | 0.1365 $\pm$ 0.0038                    | 55.66 $\pm$ 3.58            |
| 7.5           | 1.34 $\pm$ 0.20             | 5.12 $\pm$ 0.12        | 5.31 $\pm$ 0.06        | 0.1584 $\pm$ 0.0071                    | 58.46 $\pm$ 3.08            |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 37 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย PACl

| Initial<br>pH | (%Removal) |       |       |        |       |
|---------------|------------|-------|-------|--------|-------|
|               | Turbidity  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 5.0           | 94.98      | 33.15 | 31.90 | 43.95  | 41.90 |
| 5.5           | 94.24      | 34.46 | 28.17 | 45.57  | 44.00 |
| 6.0           | 95.61      | 32.82 | 32.15 | 44.58  | 54.11 |
| 6.5           | 94.49      | 29.19 | 29.45 | 36.54  | 51.15 |
| 7.0           | 94.29      | 26.36 | 27.62 | 33.90  | 47.75 |
| 7.5           | 93.46      | 26.78 | 22.80 | 23.32  | 45.12 |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ PACl=40.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

### (3) การรวมตะกอนด้วยเฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride : $\text{FeCl}_3$ )

ตารางที่ 38 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ  $\text{FeCl}_3$  ที่เหมาะสม

| $\text{FeCl}_3$<br>dose | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------|--------|
|                         |                             |                        |                                         | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ                  | $15.8 \pm 0.21$             | $2.88 \pm 0.06$        | $0.1197 \pm 0.0011$                     | -           | -     | -      |
| 10.0                    | $1.45 \pm 0.14$             | $2.74 \pm 0.09$        | $0.1008 \pm 0.0002$                     | 90.82       | 4.84  | 15.79  |
| 20.0                    | $1.13 \pm 0.04$             | $2.63 \pm 0.04$        | $0.0915 \pm 0.0021$                     | 92.85       | 8.52  | 23.56  |
| 40.0                    | $0.91 \pm 0.04$             | $2.16 \pm 0.08$        | $0.0887 \pm 0.0011$                     | 94.24       | 24.96 | 25.90  |
| 60.0                    | $0.85 \pm 0.28$             | $2.03 \pm 0.07$        | $0.0879 \pm 0.0006$                     | 94.62       | 29.25 | 26.57  |
| 80.0                    | $0.67 \pm 0.07$             | $1.71 \pm 0.03$        | $0.0663 \pm 0.0006$                     | 95.76       | 40.38 | 44.61  |
| 100.0                   | $0.80 \pm 0.08$             | $1.77 \pm 0.06$        | $0.0850 \pm 0.0007$                     | 94.94       | 38.39 | 28.99  |

หมายเหตุ ควบคุม pH ตั้งต้น=7.0 และ Anion Polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 39 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Initial<br>pH | Turbidity $\pm$ SD<br>(NTU) | DOC $\pm$ SD<br>(mg/L) | UV-254 $\pm$ SD<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | %Removal  |       |        |
|---------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-----------|-------|--------|
|               |                             |                        |                                         | Turbidity | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ        | $19.8 \pm 0.28$             | $3.55 \pm 0.07$        | $0.2146 \pm 0.0009$                     | -         | -     | -      |
| 4.0           | $5.31 \pm 0.04$             | $3.33 \pm 0.06$        | $0.2062 \pm 0.0007$                     | 73.18     | 6.21  | 3.91   |
| 5.0           | $3.40 \pm 0.03$             | $3.19 \pm 0.01$        | $0.1382 \pm 0.0004$                     | 82.83     | 10.25 | 35.60  |
| 6.0           | $1.96 \pm 0.03$             | $2.88 \pm 0.42$        | $0.1442 \pm 0.0003$                     | 90.10     | 18.95 | 32.81  |
| 7.0           | $1.33 \pm 0.04$             | $2.14 \pm 0.31$        | $0.1183 \pm 0.0011$                     | 93.28     | 39.69 | 44.87  |
| 8.0           | $0.76 \pm 0.04$             | $1.96 \pm 0.09$        | $0.0944 \pm 0.0014$                     | 96.16     | 44.77 | 56.01  |
| 9.0           | $0.84 \pm 0.14$             | $2.22 \pm 0.04$        | $0.1001 \pm 0.0007$                     | 95.75     | 37.46 | 53.36  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3$ =80.0 mg/L และ Anion polymer=0.10 mg/L

ตารางที่ 40 ผลการทดลองเพื่อหาปริมาณ Anion polymer ที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Polymer dose | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | (% Removal) |       |        |
|--------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|-------------|-------|--------|
|              |                          |                     |                                      | Turbidity   | DOC   | UV-254 |
| น้ำดิบ       | $19.6 \pm 0.42$          | $4.70 \pm 0.21$     | $0.1007 \pm 0.0063$                  | -           | -     | -      |
| 0.05         | $1.20 \pm 0.07$          | $3.59 \pm 0.14$     | $0.0812 \pm 0.0004$                  | 93.88       | 23.71 | 19.36  |
| 0.10         | $1.14 \pm 0.07$          | $3.22 \pm 0.04$     | $0.0756 \pm 0.0006$                  | 94.18       | 31.41 | 24.93  |
| 0.15         | $1.01 \pm 0.09$          | $3.07 \pm 0.06$     | $0.0616 \pm 0.0019$                  | 94.85       | 34.72 | 38.83  |
| 0.20         | $0.90 \pm 0.10$          | $2.75 \pm 0.07$     | $0.0593 \pm 0.0070$                  | 95.41       | 41.52 | 41.11  |
| 0.25         | $0.76 \pm 0.04$          | $2.80 \pm 0.09$     | $0.0664 \pm 0.0014$                  | 96.12       | 40.38 | 34.06  |
| 0.30         | $0.58 \pm 0.04$          | $2.72 \pm 0.18$     | $0.0520 \pm 0.0067$                  | 97.04       | 42.15 | 48.36  |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ pH ตั้งต้น=8.0

ตารางที่ 41 ผลการทดลองเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมของ  $\text{FeCl}_3$

| Initial pH | Turbidity $\pm$ SD (NTU) | TOC $\pm$ SD (mg/L) | DOC $\pm$ SD (mg/L) | UV-254 $\pm$ SD ( $\text{cm}^{-1}$ ) | THMFP $\pm$ SD ( $\mu\text{g/L}$ ) |
|------------|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| น้ำดิบ     | $19.4 \pm 0.42$          | $1.82 \pm 0.24$     | $2.06 \pm 0.15$     | $0.0778 \pm 0.0033$                  | $106.53 \pm 0.37$                  |
| 7.0        | $1.25 \pm 0.28$          | $1.23 \pm 0.20$     | $1.33 \pm 0.06$     | $0.0490 \pm 0.0061$                  | $59.88 \pm 2.40$                   |
| 7.5        | $0.98 \pm 0.08$          | $1.33 \pm 0.14$     | $1.14 \pm 0.09$     | $0.0544 \pm 0.0045$                  | $49.59 \pm 0.98$                   |
| 8.0        | $0.72 \pm 0.04$          | $1.10 \pm 0.13$     | $1.19 \pm 0.12$     | $0.0469 \pm 0.0099$                  | $43.38 \pm 2.69$                   |
| 8.5        | $0.58 \pm 0.03$          | $1.17 \pm 0.28$     | $1.10 \pm 0.11$     | $0.0457 \pm 0.0083$                  | $44.07 \pm 1.98$                   |
| 9.0        | $0.84 \pm 0.11$          | $1.17 \pm 0.10$     | $1.05 \pm 0.12$     | $0.0477 \pm 0.0055$                  | $50.17 \pm 1.34$                   |
| 9.5        | $1.12 \pm 0.06$          | $1.14 \pm 0.29$     | $1.94 \pm 0.01$     | $0.0561 \pm 0.0013$                  | $49.05 \pm 0.72$                   |

หมายเหตุ ควบคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ Anion polymer=0.30 mg/L

ตารางที่ 42 ผลร้อยละการบำบัดเพื่อหา pH ตั้งต้นที่เหมาะสมด้วย  $\text{FeCl}_3$

| Initial<br>pH | (%Removal) |       |       |        |       |
|---------------|------------|-------|-------|--------|-------|
|               | Turbidity  | TOC   | DOC   | UV-254 | THMFP |
| 7.0           | 93.56      | 32.54 | 35.74 | 37.02  | 43.79 |
| 7.5           | 94.95      | 27.20 | 44.66 | 30.08  | 53.45 |
| 8.0           | 96.29      | 39.48 | 49.31 | 39.72  | 59.28 |
| 8.5           | 97.01      | 36.08 | 42.50 | 47.26  | 58.63 |
| 9.0           | 95.67      | 36.08 | 46.79 | 38.69  | 52.91 |
| 9.5           | 94.23      | 37.34 | 5.93  | 27.89  | 53.96 |

หมายเหตุ ความคุมปริมาณ  $\text{FeCl}_3=80.0 \text{ mg/L}$  และ Anion polymer=0.30 mg/L

ตารางที่ 43 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP ของแม่น้ำแม่กลอง

|       |                     | THMFP     | TOC      | DOC       | UV254     |
|-------|---------------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| THMFP | Pearson Correlation | 1         | 0.583(*) | 0.589(*)  | 0.625(**) |
|       | Sig. (2-tailed)     | .         | 0.011    | 0.010     | 0.006     |
|       | N                   | 18        | 18       | 18        | 18        |
| TOC   | Pearson Correlation | 0.583(*)  | 1        | 0.156     | 0.309     |
|       | Sig. (2-tailed)     | 0.011     | .        | 0.536     | 0.213     |
|       | N                   | 18        | 18       | 18        | 18        |
| DOC   | Pearson Correlation | 0.589(*)  | 0.156    | 1         | 0.736(**) |
|       | Sig. (2-tailed)     | 0.010     | 0.536    | .         | 0.000     |
|       | N                   | 18        | 18       | 18        | 18        |
| UV254 | Pearson Correlation | 0.625(**) | 0.309    | 0.736(**) | 1         |
|       | Sig. (2-tailed)     | .006      | 0.213    | 0.000     | .         |
|       | N                   | 18        | 18       | 18        | 18        |

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

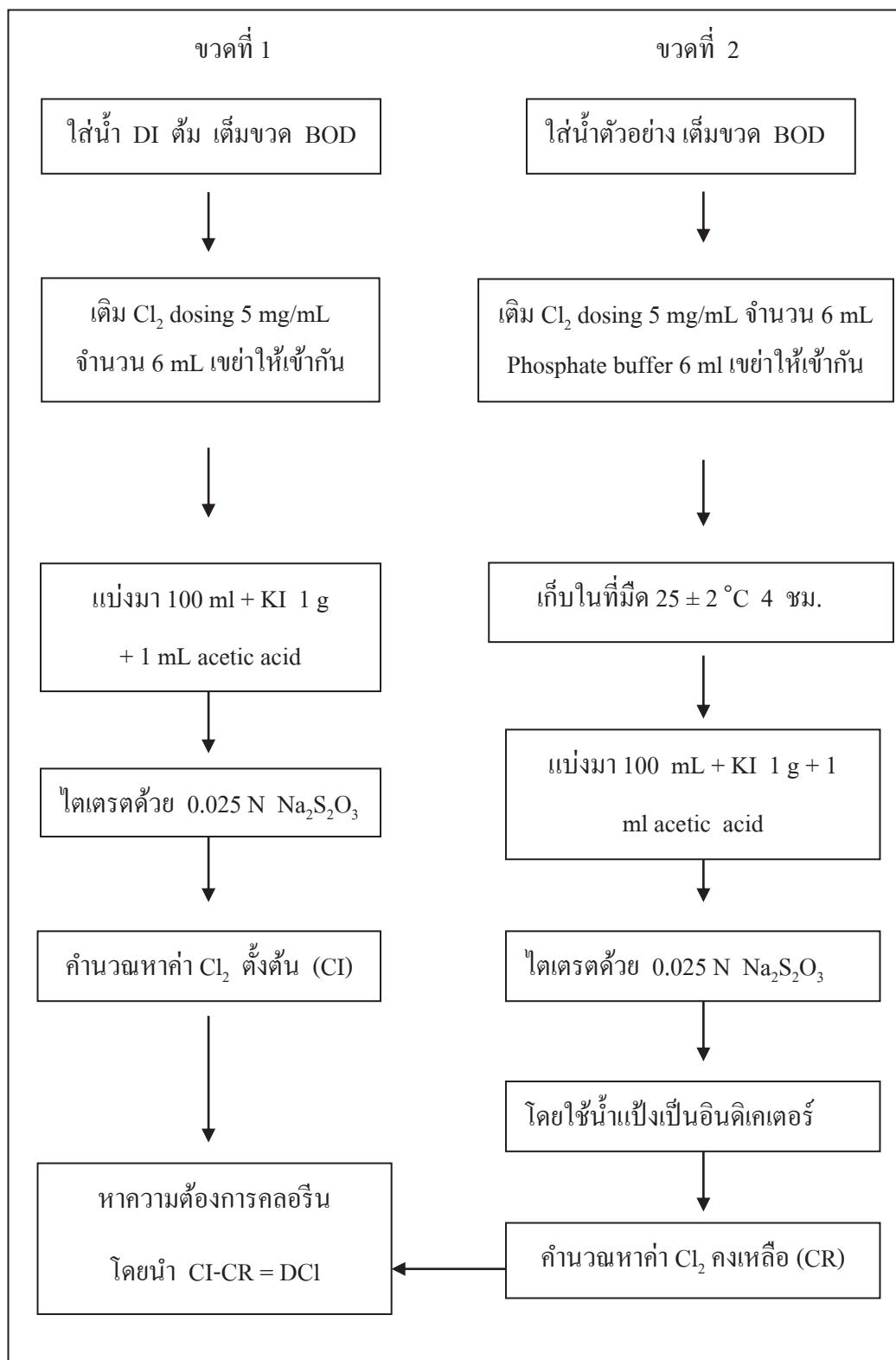
ตารางที่ 44 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างสารอินทรีย์และค่า THMFP ของแม่น้ำท่าจีน

|              |                     | THMFP     | TOC       | DOC       | UV254     |
|--------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>THMFP</b> | Pearson Correlation | 1         | 0.630(**) | 0.651(**) | 0.761(**) |
|              | Sig. (2-tailed)     | .         | 0.005     | 0.003     | 0.000     |
|              | N                   | 18        | 18        | 18        | 18        |
| <b>TOC</b>   | Pearson Correlation | 0.630(**) | 1         | 0.989(**) | 0.949(**) |
|              | Sig. (2-tailed)     | 0.005     | .         | 0.000     | 0.000     |
|              | N                   | 18        | 18        | 18        | 18        |
| <b>DOC</b>   | Pearson Correlation | 0.651(**) | 0.989(**) | 1         | 0.948(**) |
|              | Sig. (2-tailed)     | 0.003     | 0.000     | .         | 0.000     |
|              | N                   | 18        | 18        | 18        | 18        |
| <b>UV254</b> | Pearson Correlation | 0.761(**) | 0.949(**) | 0.948(**) | 1         |
|              | Sig. (2-tailed)     | 0.000     | 0.000     | 0.000     | .         |
|              | N                   | 18        | 18        | 18        | 18        |

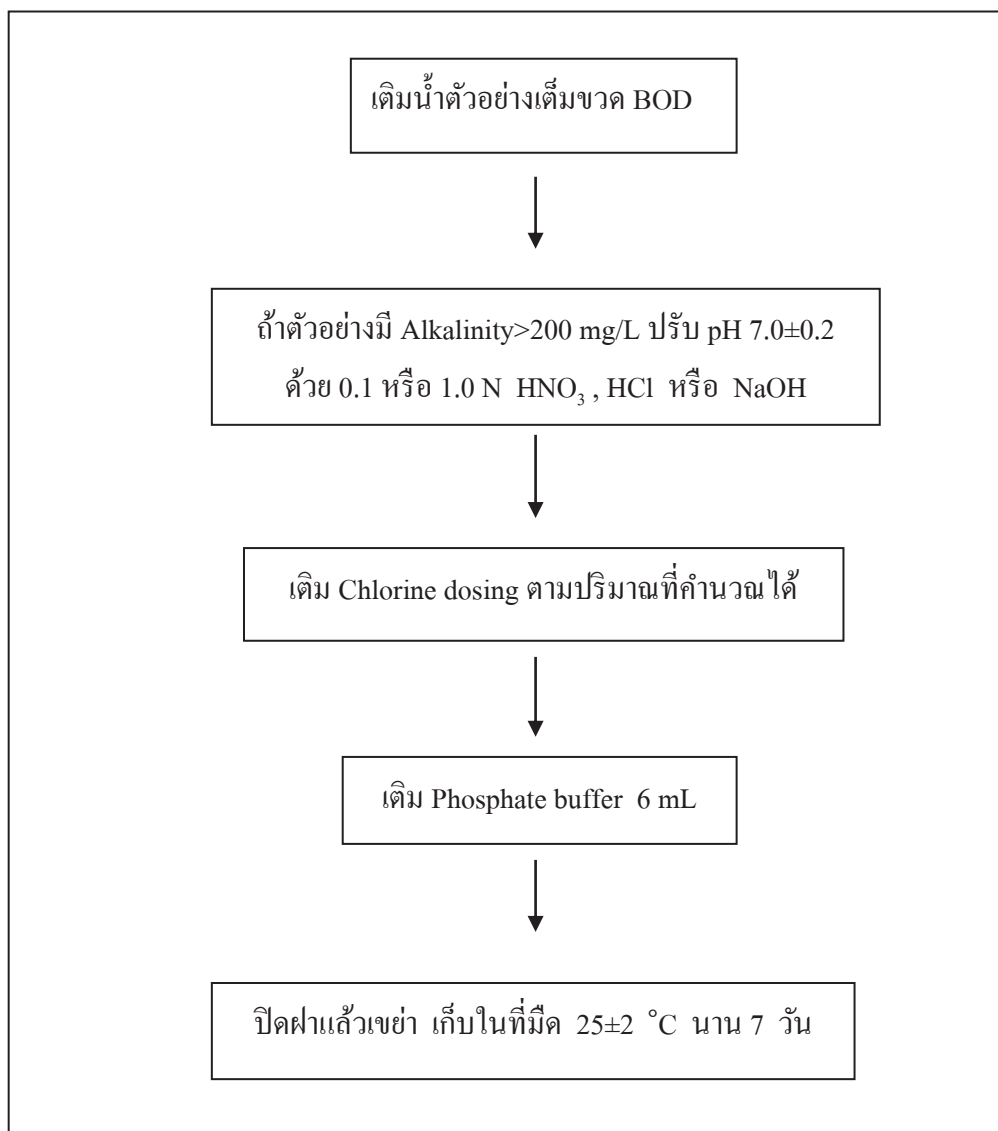
\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

ภาคผนวก ข

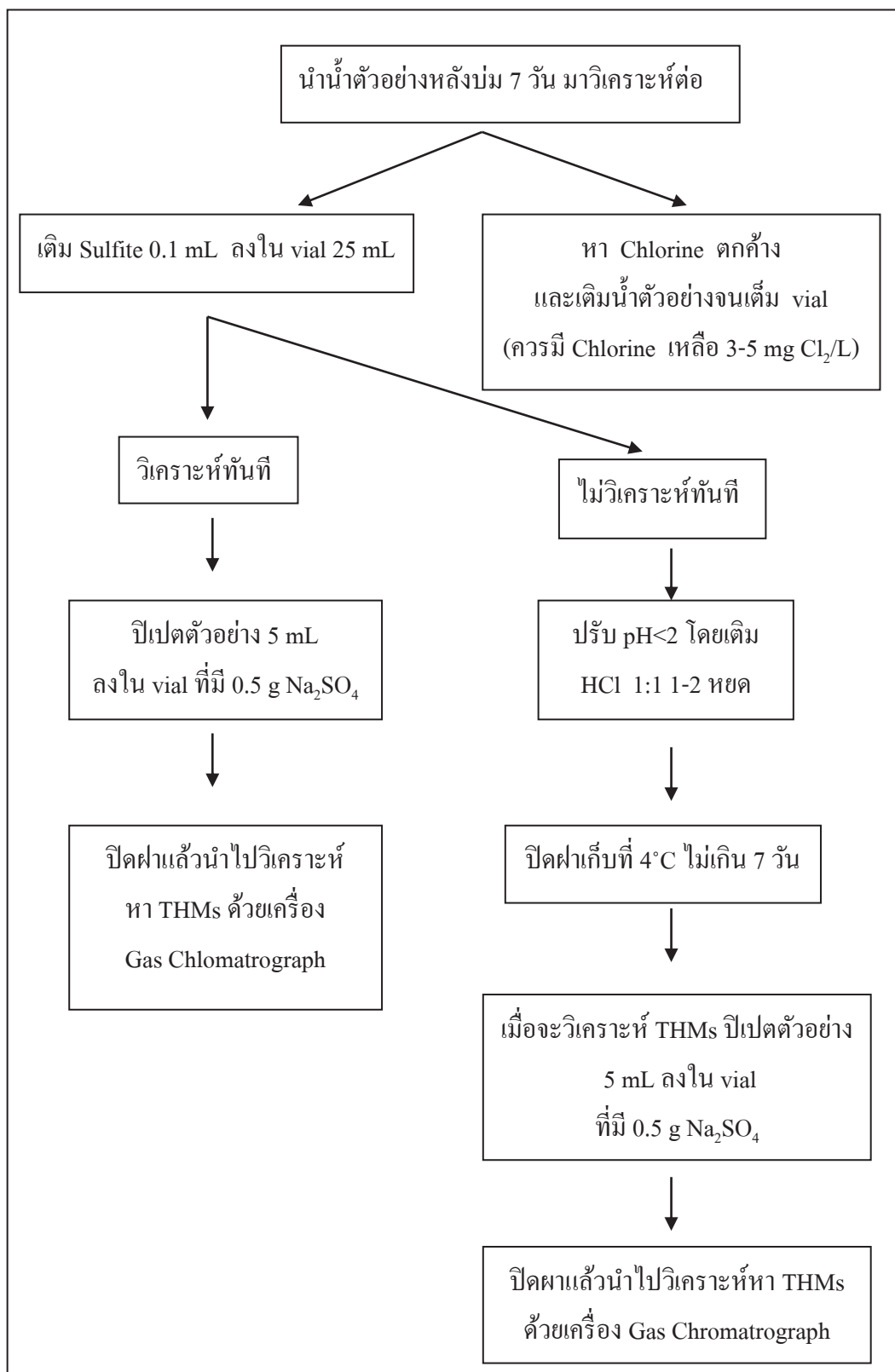
วิธีการวิเคราะห์ศักยภาพในการเกิดสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน  
(Trihalomethane formation potential, THMFP)



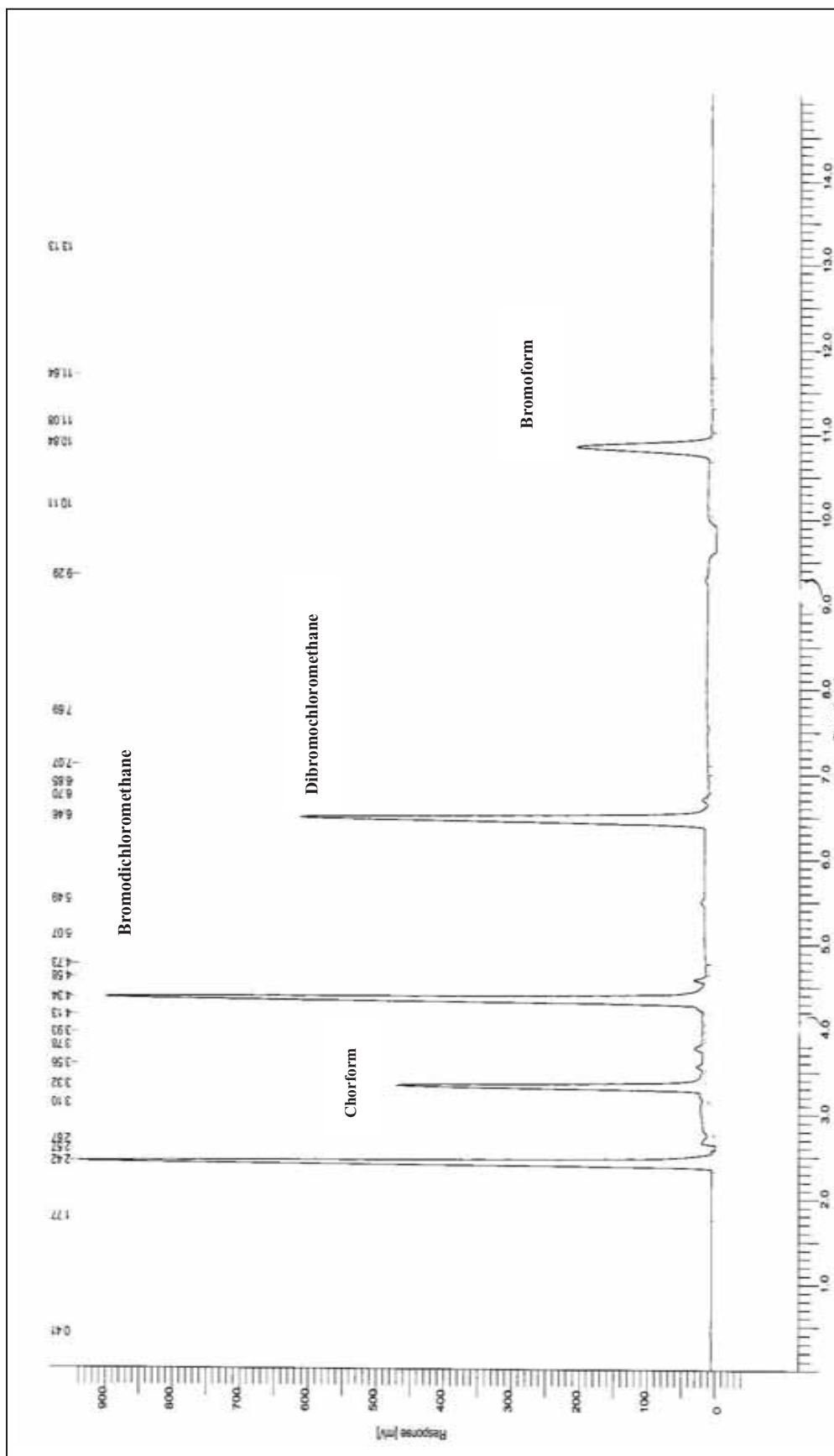
ภาพที่ 50 สรุปวิธีการหาความต้องการคลอรีน (DCI)



ภาพที่ 51 วิธีการหา Sample Chlorination



ภาพที่ 52 วิธีวิเคราะห์หา THMFP



ภาพที่ 53 Chromatogram ของ THMs ที่ความเข้มข้น 20 µg/L

## ประวัติผู้วิจัย

|                |                                                      |
|----------------|------------------------------------------------------|
| ชื่อ-สกุล      | นายกฤษดา ทองนาค                                      |
| ที่อยู่        | 56 หมู่ 6 ตำบลบางนาง อำเภอฟานทอง จังหวัดชลบุรี 20160 |
| โทรศัพท์       | 081-5765042                                          |
| E-mail address | ding_kritsada@yahoo.com                              |

## ประวัติการศึกษา

|           |                                                                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| พ.ศ. 2546 | สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์<br>ทั่วไป เอกเคมี-ชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| พ.ศ. 2549 | ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์<br>สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร                                 |