

การศึกษาการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูงของน้ำ  
เซอร์วิส โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1  
THE STUDY OF HIGH SILT DENSITY INDEX (SDI) IN  
WATER SERVICE TANK AT WATER PURIFICATION  
PROCESS (BLOCK I) NORTH BANGKOK POWER PLANT



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2561  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF HIGH SILT DENSITY INDEX (SDI) IN  
WATER SERVICE TANK AT WATER PURIFICATION  
PROCESS (BLOCK I) NORTH BANGKOK POWER PLANT



A COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL  
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2018




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา การศึกษาการเกิดตะกอนของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูงของน้ำเซอร์วิส โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1  
The Study of High Silt Density Index (SDI) in Water Service Tank at Water Purification Process (Block I) North Bangkok Power Plant

ชื่อนักศึกษา นางสาวโชติรส ว่างบัวทอง รหัสนักศึกษา 58050609  
นางสาวณัฐนันท์ รักษ์บงกชกุล รหัสนักศึกษา 58050612  
นางสาววารภรณ์ ปฏิบัติ รหัสนักศึกษา 58050676

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชา เคมี  
ปีการศึกษา 2561  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กลิน์สุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ	
นางสาววิรัชชานา อรรถรัตน์ กรรมการ	
ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การศึกษาการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูงของน้ำเซอร์วิส โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1
ชื่อนักศึกษา	นางสาวโชติรส วังบัวทอง รหัสนักศึกษา 58050609 นางสาวณัฐนันท์ รักษ์บงกชกุล รหัสนักศึกษา 58050612 นางสาววารภรณ์ ปฏิบัติ รหัสนักศึกษา 58050676
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์

### บทคัดย่อ

รายงานสหกิจศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหาการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมีค่าสูง (Silt Density Index, SDI) ของน้ำในถังเซอร์วิส โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ และฝักประสพการณ์ด้านสหกิจ ณ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผู้วิจัยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลทำให้ SDI เปลี่ยนแปลงไป ได้แก่ 1) อนุภาคของสารแขวนลอยที่เป็นอินทรีย์วัตถุ 2) อนุภาคของสารแขวนลอยที่เป็นอนินทรีย์วัตถุ 3) การเติมแก๊สคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค และ 4) ผลการทดสอบระบบดับเพลิง จากการทดลองพบว่าเมื่อนำน้ำที่เก็บในถังเซอร์วิสเก็บไว้ในสถานะที่ไม่มีแสงสว่างและมีแสงสว่างไม่สามารถสังเกตเห็นการเจริญเติบโตของอินทรีย์วัตถุจำพวกสาหร่ายได้ด้วยตาเปล่า ส่วนการทดสอบอนุภาคของสารแขวนลอยที่เป็นอนินทรีย์วัตถุในรูปการอิมตัวของหินปูน โดยศึกษาจากดัชนีแลงเกลียร์ (LSI) และดัชนีไรนาร์ (RI) พบว่า LSI มีค่าอยู่ในช่วง -0.26 ถึง -0.93 และ RI มีค่าอยู่ในช่วง 8.45 ถึง 9.11 แสดงว่าน้ำตัวอย่างมีฤทธิ์ในการกัดกร่อน และไม่สามารถเกิดการตกตะกอนในรูปของหินปูนได้ ผลของการเติมแก๊สคลอรีนพบว่าปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำเมื่อเติมแก๊สคลอรีนที่อัตรา 25 กรัมต่อชั่วโมงมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีนอย่างมีนัยสำคัญ ( $p=0.05$ ) ซึ่งไอออนของเหล็กทั้งหมดมีศักยภาพสามารถเกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาคของสารแขวนลอย และการตรวจวัด SDI เมื่อมีการทดสอบระบบดับเพลิง พบว่ามีผลต่อ SDI ได้ทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง เมื่อมีการเติมแก๊สคลอรีนในวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิงส่งผลให้ค่า SDI เพิ่มขึ้น ส่วนการฝักประสพการณ์สหกิจศึกษานี้ถือว่าเป็นประสบการณ์ด้านวิชาชีพที่ดี และมีประโยชน์

**คำสำคัญ :** ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ, ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์, สหกิจศึกษา, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	The Study of High Silt Density Index (SDI) in Water Service Tank at Water Purification Process (Block I) North Bangkok Power Plant	
<b>Students</b>	Miss Chotiros Wangbuathong	Student ID 58050609
	Miss Nuttanan Rakbongkodkul	Student ID 58050612
	Miss Waraporn Patibut	Student ID 58050676
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
<b>Department</b>	Chemistry	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2018	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak	

### Abstract

This cooperative education report aimed to study the high Silt Density Index (SDI) problems of water in Service Tank, Water Purification Process, and the cooperative education training at the North Bangkok Power Plant (Block I), Electric Generating Authority of Thailand (EGAT). The factors affecting SDI were determined, such as 1) the particles of organic suspended solids, 2) the particles of inorganic suspended solids, 3) the effect of chlorine adding for disinfection and 4) the activity of fire pump test. The results showed that the water in Service Tank, both conditions (without lighting and with lighting) cannot be observed the growth of organic matter, such as algae. The Saturated Index as limestone were examined as Langelier Saturation Index (LSI) and Ryznar Index (RI) showed that LSI was -0.26 to -0.93 and RI was 8.45 to 9.11. These implied that water samples were corroded and unprecipitated as limestone. The results of chlorine gas feed rate of 25 g/hr indicated that the total Iron ion in water were raised higher than unfeeding at the 0.05 significance level ( $p=0.05$ ). The total Iron have potential to precipitate as particles of SDI. During the fire pump activities were tested, also found that the value of SDI had both increased and decreased. While feeding chlorine gas on the fire pump activities there were affected to high SDI. Furthermore, these cooperative education training induce the best profession experience and very useful.

**Keywords:** Silt Density Index (SDI), The Langelier saturated index and Ryznar index, Cooperative education, Electric Generating Authority of Thailand (EGAT).

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการสหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจากผู้มีพระคุณหลายท่านที่ให้ทั้งคำแนะนำ และให้การช่วยเหลือในหลายๆ ด้านในตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการสหกิจศึกษาจนทำให้โครงการสหกิจศึกษานี้เสร็จได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ ที่ปรึกษาโครงการสหกิจศึกษาเป็นอย่างสูงที่คอยให้คำปรึกษา คำชี้แนะ และคำแนะนำ ทั้งยังมอบความรู้ ตลอดจนความเอาใจใส่ในทุกรายละเอียดในการทำโครงการสหกิจศึกษานี้ พร้อมทั้งชี้จุดที่บกพร่องและปรับปรุงแก้ไขจนทำให้โครงการสหกิจศึกษาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ประธานกรรมการ และคุณวิรัชญา อรรถรัตน์ กรรมการผู้คุมสอบที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเข้าร่วมรับฟังโครงการสหกิจศึกษานี้ พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขโครงการสหกิจศึกษาให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณวิรัชญา อรรถรัตน์ ที่ปรึกษาตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำโครงการสหกิจศึกษาออกสถานที่ และขอขอบพระคุณแผนกเคมีทุกคนที่ให้ความเอาใจใส่ คำแนะนำ และข้อชี้แนะในการทำโครงการสหกิจศึกษา ณ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือ ทั้งยังอำนวยความสะดวกในทุกด้าน เช่น เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และน้ำตัวอย่างที่ใช้สำหรับการศึกษาในการทำโครงการสหกิจศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ คุณสาคร สอนพงษ์ คุณณัฐพล ไกรธรรม และคุณชัชชัย ลัทธิลักษณ์ เจ้าของหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการดำเนินการด้านเอกสาร การจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์ พร้อมทั้งยังจัดหาสารเคมีต่างๆ สำหรับใช้ในการทำโครงการสหกิจศึกษา

ขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวชื่อนี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือ และให้คำแนะนำข้อปฏิบัติต่างๆ พร้อมทั้งให้ความใส่ใจ เป็นกำลังใจที่สำคัญในการทำโครงการสหกิจศึกษาเมื่อปฏิบัติงานอยู่ในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และโรงไฟฟ้าพระนครเหนือทำให้โครงการสหกิจศึกษาเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์

โชติรส วังบัวทอง

ณัฐนันท์ รักษ์บงกชกุล

วารภรณ์ ปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>3</b>
2.1 ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index, SDI).....	3
2.1.1 แหล่งที่มาและความสำคัญของดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ .....	3
2.1.2 หลักการวัดค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ.....	3
2.2 โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1.....	5
2.2.1 กระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์.....	5
2.2.2 คุณภาพของน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์.....	6
2.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>24</b>
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	24
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	24
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.2 วิธีการทดลอง.....	25
3.2.1 จุดเก็บน้ำตัวอย่าง.....	25
3.2.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ .....	26
3.2.3 การตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณสารอนินทรีย์ .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	30
4.1 การเก็บน้ำตัวอย่าง .....	30
4.2 สาเหตุของการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูง .....	30
4.2.1 สารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุ .....	30
4.2.2 สารแขวนลอยประเภทอนินทรีย์วัตถุ .....	32
4.2.3 การทดสอบระบบดับเพลิง (Exercise Fire Pump) .....	33
4.3 ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ .....	35
4.4 อัตราการเติมแก๊สคลอรีน (Feed Chlorine, FCl <sub>2</sub> ) .....	36
4.5 ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ (Total Iron, TFe) .....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	40
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	40
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	40
เอกสารอ้างอิง .....	41
ภาคผนวก .....	44
ภาคผนวก ก .....	45
ภาคผนวก ข .....	47
ภาคผนวก ค .....	59
ภาคผนวก ง .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา .....	6
2.2 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) .....	7
2.3 ค่าคงที่ในการหาดัชนีแลงเกลียร์ .....	14
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดอินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุในน้ำตัวอย่าง .....	25
4.1 ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ของน้ำตัวอย่าง .....	35
ข-1 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2557 .....	47
ข-2 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2558 .....	48
ข-3 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2559 .....	48
ข-4 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2560 .....	49
ข-5 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2561 .....	50
ข-6 ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด .....	51
ข-7 ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด .....	51
ข-8 การไทเทรตหาค่าสภาพต่าง .....	52
ข-9 การไทเทรตหาค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม .....	53
ข-10 การคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และการแปลผลของดัชนีแลงเกลียร์ และดัชนีโรนาร์ .....	54
ข-11 ค่า SDI กรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr .....	55
ข-12 ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง .....	55
ข-13 ผลต่างปริมาณเหล็กในน้ำระหว่างน้ำที่ไหลเข้าและน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank .....	56
ข-14 ปริมาณเหล็กบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI .....	56
ข-15 ผลต่างปริมาณเหล็กบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI ระหว่างน้ำที่ไหลเข้า และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank .....	57
ข-16 ค่า SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง .....	57
ค-1 การไทเทรตและหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก .....	59
ค-2 การไทเทรตและหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายยอดีทีเอ .....	60
ค-3 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่าง .....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การต่ออุปกรณ์ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ.....	4
2.2 น้ำที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำและการใช้ประโยชน์ของน้ำที่เก็บใน Service Tank.....	5
2.3 ผลของ pH และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอโรอินอิสระคงที่ (USDA, 2015).....	16
2.4 pE-pH ของเหล็กเมื่อมีไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	18
2.5 pE-pH ของเหล็กเมื่อมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	19
2.6 อนุพันธ์ของคาร์บอนที่ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำ.....	20
2.7 pE- pH ของเหล็กที่มีคาร์บอนละลายอยู่ในน้ำร่วมกับไฮดรอกไซด์และออกซิเจน.....	20
3.1 แผนภาพของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1.....	25
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ.....	26
3.3 วิธีการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ.....	26
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
4.1 ข้อมูลค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2557-2561.....	30
4.2 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง.....	31
4.3 สีของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ที่เก็บในสถานะที่มีแสงสว่าง.....	32
4.4 สีของกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI.....	33
4.5 ค่า SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง.....	34
4.6 ค่า SDI กรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr.....	36
4.7 ผลต่างปริมาณเฉลี่ยของเหล็กในน้ำ.....	37
4.8 ปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI.....	38
ก-1 กราฟมาตรฐานเหล็ก.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
eq/L	จำนวนสมมูลต่อลิตร
eq/mol	จำนวนสมมูลต่อโมล
FCl <sub>2</sub>	Feed Chlorine คือ อัตราการเติมแก๊สคลอรีน
g/cm <sup>3</sup>	กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/eq	กรัมต่อสมมูล
g/mol	กรัมต่อโมล
g/hr.	หน่วยของอัตราการเติมแก๊สคลอรีน คือ กรัมต่อชั่วโมง
LSI	ดัชนีแลงเกลียร์
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mol/L	โมลต่อลิตร
ND	Not Detected คือ มีค่าต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถวิเคราะห์ได้
pH	ค่าพีเอช หรือค่าความเป็นกรดและด่าง
RI	ดัชนีไรนาร์
SDI	Silt Density Index คือ ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ
Service Tank	ถังบรรจุน้ำที่ไหลออกจาก Treated Tank
SWE	Service Water Effluent หรือ Service Water คือ น้ำที่ไหลออกจาก Service Tank
SWI	Service Water Influent คือ น้ำที่ไหลเข้า Service Tank
TDS	ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด
TFe	Total Iron คือ ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ
Treated Tank	ถังบรรจุน้ำที่ออกจากระบบ Micro Filtration
μmhos/cm	หน่วยของค่าการนำไฟฟ้า คือ ไมโครมห์ต่อเซนติเมตร
μS/cm	ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงไฟฟ้าพระนครเหนือเป็นโรงไฟฟ้าแบบพลังงานความร้อนร่วม ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อนำไปเผาไหม้ให้เกิดเป็นแก๊สร้อน (แก๊สที่มีพลังงานความร้อนและแรงดันสูง) ก่อนส่งไปขับเคลื่อนกังหันแก๊ส (Gas Turbine) ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Generator) และเนื่องจากโรงไฟฟ้าพระนครเหนือเป็นโรงไฟฟ้าแบบพลังงานความร้อนร่วม โดยมีอีกหนึ่งแหล่งพลังงานที่ใช้เป็นต้นกำเนิดในการผลิตกระแสไฟฟ้าคือ ไอน้ำบริสุทธิ์ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าไอน้ำบริสุทธิ์ได้มาจากน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงหรือน้ำที่ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralized water) ที่ผลิตจากโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือไปต้มในหม้อน้ำ (Boiler) จนเกิดเป็นไอน้ำบริสุทธิ์ที่มีพลังงานความร้อนและแรงดันสูงเพียงพอที่จะขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงเป็นการเพิ่มกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่ง

โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 ใช้น้ำประปาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตเป็นน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ภายในโรงไฟฟ้าพระนครเหนือ คือ ใช้เป็นสารละลายป้อน, ใช้ในการต้มในหม้อน้ำเพื่อให้เกิดเป็นไอน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในระบบดับเพลิง โดยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเริ่มจากการกรองความขุ่นด้วยเมมเบรน (Micro Filtration) โดยน้ำที่ผ่านการกรองความขุ่นแล้วมีการเติมแก๊สคลอรีน ( $Cl_2$ ) และเก็บไว้ใน Service Tank ก่อนนำไปเข้าระบบการกรองแร่ธาตุ (Reverse Osmosis, RO) และระบบการกรองประจุ (Mixed Bed) ต่อไปโรงไฟฟ้าพระนครเหนือมีการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index, SDI) ของน้ำที่เก็บใน Service Tank พบว่าค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำค่อนข้างสูง อาจเป็นผลมาจากสารแขวนลอยต่างๆ ทั้งอินทรีย์วัตถุ (Organic Matter) และอนินทรีย์วัตถุ (Inorganic matter) ในน้ำที่ทำให้มีคุณสมบัติไม่เหมาะสม ซึ่งน้ำที่ออกจาก Service Tank จะเข้าระบบการกรองแร่ธาตุ โดยผ่านถุงกรองรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis Bag Filter) และเมมเบรนของระบบการกรองแร่ธาตุ (Reverse Osmosis Membrane) ตามลำดับ คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านเมมเบรน ของระบบการกรองแร่ธาตุตามที่บริษัทผู้จำหน่ายเมมเบรนกำหนด มีค่าควบคุมของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กำหนดไว้คือ ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (SDI), ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH), คลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ (Free Residual Chlorine, FRC), อุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) จากผลการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่ค่อนข้างสูงทำให้คุณสมบัติของน้ำที่เก็บใน Service Tank ไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของน้ำที่ผ่านเมมเบรนของระบบการกรองแร่ธาตุตามที่บริษัทผู้จำหน่ายเมมเบรนกำหนด ส่งผลให้ถุงกรองและเมมเบรนของระบบการกรองแร่ธาตุมีประสิทธิภาพในการกรองลดลง ต้องมีการเปลี่ยนถุงกรองและเมมเบรนบ่อยครั้ง เนื่องจากมีความสกปรกและอุดตันไป

เอกสารด้วยสารแขวนลอยต่างๆ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาหาสาเหตุการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูงของน้ำที่เก็บใน Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำที่เก็บในสภาวะที่ไม่มีแสงสว่างและสภาวะที่มีแสงสว่างเพื่อดูความสามารถในการเกิดอินทรีย์วัตถุในน้ำ, วิเคราะห์ดัชนีแลงเกลียร์ (Langelier Saturation Index, LSI) ดัชนีไรนาร์ (Ryznar Index, RI) เพื่อสังเกตแนวโน้มการเกิดตะกอนและการกัดกร่อนโลหะของน้ำ และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักคือ ไอออนของเหล็กทั้งหมด (Total Iron, TFe) ในกรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง เพื่อสังเกตว่าการเติมแก๊สคลอรีนมีผลต่อปริมาณเหล็กในน้ำและดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ เพื่อให้ทราบสาเหตุของปัญหาการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูง และเพื่อหาแนวทางในการป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสาเหตุการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (SDI) สูงของน้ำที่เก็บใน Service Tank

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาและเปรียบเทียบโอกาสการเกิดอินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ในสภาวะที่ไม่มีแสงสว่างและสภาวะที่มีแสงสว่างของน้ำที่เก็บใน Service Tank
- 2) ศึกษาดัชนีแลงเกลียร์ และดัชนีไรนาร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง คือ ค่าความเป็นกรดและด่าง, อุณหภูมิ, ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด, สภาพต่าง และความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม
- 3) ศึกษาปริมาณโลหะหนักคือ ไอออนของเหล็กทั้งหมดของน้ำที่เก็บใน Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1
- 4) ศึกษาดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำของน้ำที่เก็บใน Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงสาเหตุของการเกิด SDI สูงของน้ำที่เก็บใน Service Tank
- 2) ทราบถึงองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่เกิดขึ้นในการตรวจวัด SDI
- 3) ใช้ประโยชน์ที่ได้มาประยุกต์เป็นแนวทางในการแก้ปัญหากรณีที่มี SDI สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index, SDI)

#### 2.1.1 แหล่งที่มาและความสำคัญของดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

ตะกอนซิลต์ (Silt) ในที่นี้หมายถึงอนุภาคแขวนลอยทุกชนิดที่สะสมอยู่บนผิวหน้าของเมมเบรนซึ่งแหล่งที่มาของตะกอนซิลต์มาจากสารแขวนลอยที่เป็นได้ทั้งอินทรีย์วัตถุ เช่น สาหร่าย แบคทีเรีย อนินทรีย์วัตถุ เช่น ตะกอนของเหล็กออกไซด์ ตะกอนของแมงกานีสออกไซด์ และอนุภาคตะกอนที่ละเอียดขนาด 0.02-0.002 มิลลิเมตร ในการทดสอบด้วยวิธีดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index, SDI) เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางเหมาะสำหรับการประเมินหาอัตราของสารแขวนลอยและอนุภาคของตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตน้ำบริสุทธิ์ โดยเฉพาะการใช้เมมเบรนของกระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

การตรวจวัด SDI เป็นการวัดความสามารถในการเกิดตะกอนของแข็งแขวนลอยซึ่งไม่ใช่การวัดปริมาณของอนุภาคของสารแขวนลอยเหมือนกับค่าความขุ่นดังนั้นขนาดและรูปร่างที่ปรากฏมีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยทั้งค่าความขุ่นและดัชนีของสารแขวนลอยไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างไร โดยตรงเนื่องจากคุณสมบัติของทั้งสองพารามิเตอร์มีความแตกต่างกัน ในทางปฏิบัติเมมเบรนที่ใช้ในการกรองอนุภาคต่างๆ เกิดอนุภาคของสารแขวนลอยในปริมาณเพียงเล็กน้อย เมื่อเติมน้ำเข้าไปในระบบค่าความขุ่นที่ตรวจวัดได้มีค่าน้อยกว่า 1 NTU และในเมมเบรนยังสามารถเกิดอนุภาคของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำได้ต่ำมาก ซึ่งสามารถตรวจค่า SDI ได้น้อยกว่า 5

SDI เป็นการตรวจวัดการเกิดอนุภาคของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของคุณสมบัติระบบรีเวอร์สออสโมซิสสามารถทำให้เมมเบรนมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีประสิทธิภาพในการกรองน้ำ ซึ่งอีกชื่อหนึ่งที่ใช้คือ ดัชนีของสารคอลลอยด์ (The Kolloid Index, KI) หรือดัชนีของสารแขวนลอย (The Fouling Index, FI) โดยการทดสอบนี้เป็นวิธีมาตรฐาน ASTM D4189 ที่ได้รับการรับรองจาก The American Standard for Testing Material (Lenntech, 2018)

#### 2.1.2 หลักการวัดค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

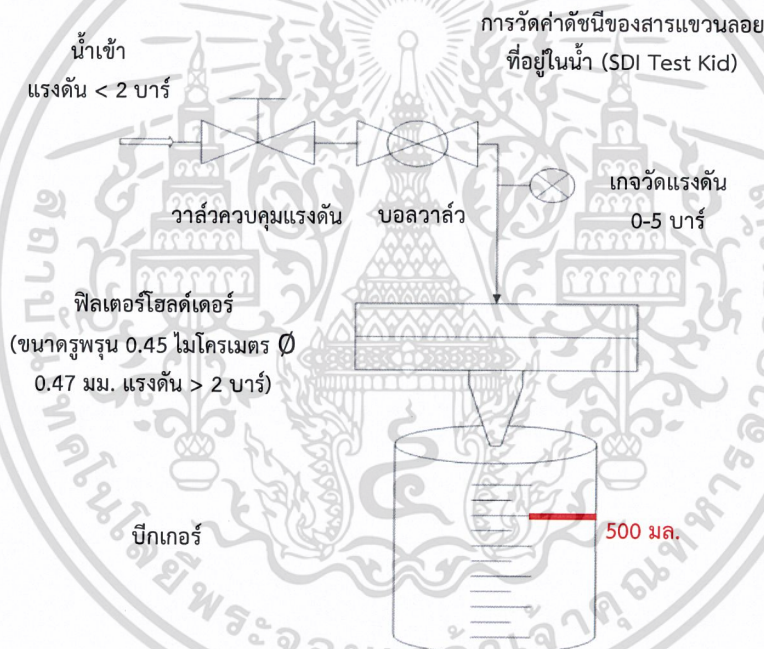
ในการตรวจวัดค่า SDI เป็นการวัดช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งโดยทำการจับเวลาและเก็บข้อมูล ณ นาทีที่ 0, 5, 10 และ 15 นาที และในการจับเวลาแต่ละครั้งได้มีการกำหนดปริมาณน้ำที่แน่นอนโดยปริมาณน้ำที่ได้เกิดจากการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่มีขนาด 0.45 ไมโครเมตร เป็นขนาดที่มีการรับรองมาตรฐานและความดันคงที่ที่ทำการทดลองมีค่า 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Pound per square inch, psi) หรือ 2.07 บาร์ ความแตกต่างระหว่างเวลาเริ่มต้นและเวลาของการวัดในแต่ละครั้งซึ่งมีเวลาสุดท้ายที่ทำการจับเวลาคือ หลังจากได้ถึงนาทีที่ 15 หรือหลังจากที่เกิดอนุภาคแขวนลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นในเมมเบรนโดยเวลาที่สามารถนำมาคำนวณในสูตรหาค่า SDI คือ เวลาเริ่มต้น ( $T_0$ ) และเวลาสุดท้าย ( $T_{15}$ ) ของการทำการทดลอง

### 2.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

การต่ออุปกรณ์ในการตรวจวัด SDI สามารถต่ออุปกรณ์ได้ในลักษณะดังรูปที่ 2.1 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดได้แก่ บอลวาล์ว ขนาด  $\frac{1}{4}$  นิ้ว วาล์วควบคุมแรงดัน เกจวัดแรงดัน 0-5 บาร์ ฟิตเตอร์ไฮลด์เตอร์ ขนาด 47 มิลลิเมตร กระจดาขกรอง 0.45 ไมโครเมตร กระจบอกลง 500 มิลลิลิตร เทอร์โมมิเตอร์ คีมหนีบ (Forceps) และนาฬิกาจับเวลา ในการเติมน้ำเข้าระบบต้องมีการปรับความดันให้ได้ 2 บาร์ ด้วยวาล์วควบคุมแรงดันและอ่านค่าแรงดันจากเกจวัดแรงดัน โดยมีบอลวาล์วใช้ในการควบคุมการเปิดปิด ฟิตเตอร์ไฮลด์เตอร์ด้านในมีกระจดาขกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ในการวัดค่า SDI มีแนวโน้มในการอุดตันจากสารแขวนลอยมากกว่าอนุภาคตะกอนที่หนัก เช่น ทรายหรือสะเก็ด



รูปที่ 2.1 การต่ออุปกรณ์ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Lenntech, 2018)

จากรูปที่ 2.1 อุปกรณ์นี้สามารถวัดระยะเวลาในแต่ละช่วงได้จากการเติมน้ำลงในกระจบอกลงจนกระทั่งได้ปริมาตรน้ำ 500 มิลลิลิตร โดยเริ่มทำการจับเวลาทันทีที่ 0 (เวลาเริ่มต้น) พร้อมกับเติมน้ำลงในกระจบอกลงและทำเช่นเดียวกับนาฬิกาที่ 0 เมื่อเวลาเดินมาถึงนาฬิกาที่ 5, 10, และ 15 (เวลาสุดท้าย) โดยน้ำที่ทำการทดลองตลอดระยะเวลา 15 นาที จะไหลผ่านกระจดาขกรองอย่างต่อเนื่องที่ความดัน 2 บาร์ ในการนำค่าของช่วงเวลาในนาฬิกาที่ 15 มาคำนวณหาค่า SDI ได้รับการรับรองจากวิธีมาตรฐาน ASTM ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กำหนดมาอย่างถูกต้องและเป็นการทดสอบที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน แม้จะมีการวัด SDI ณ นาฬิกาที่ 5 และ 10 นาที แต่เวลาที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณคือ นาฬิกาที่ 15 เท่านั้น (Lenntech, 2018)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.2 การหาค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$SDI = \frac{1-(T_0 \div T_{15})}{15} \times 100 \quad (2.1)$$

$T_0$  คือ นาทีที่ 0 ที่เติมน้ำลงในกระบอกตวงจนกระทั่งน้ำไหลครบ 500 มิลลิลิตร (เวลาเริ่มต้น, วินาที)  
 $T_{15}$  คือ นาทีที่ 15 ที่เติมน้ำลงในกระบอกตวงจนกระทั่งไหลครบ 500 มิลลิลิตร (เวลาสุดท้าย, วินาที)  
 15 คือ นาทีสุดท้ายที่ใช้ในการทดลอง

### 2.1.2.3 การแปลผลค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

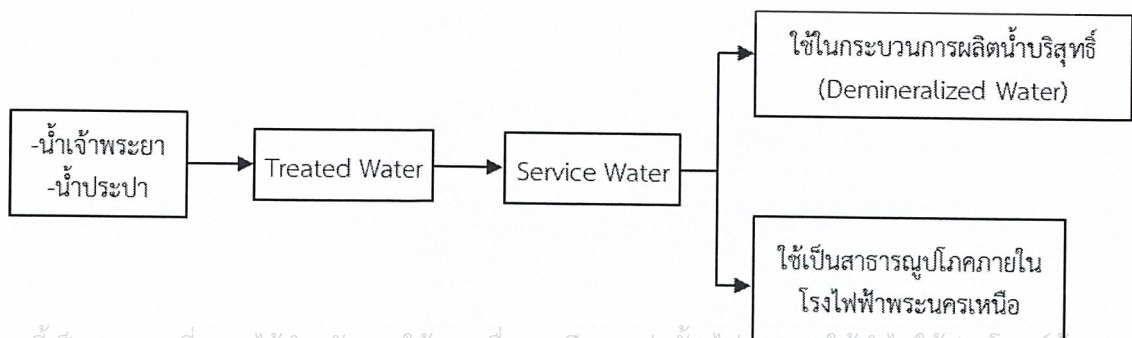
ถ้า SDI มีค่าที่ตรวจวัดสูง (>3) แสดงว่าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งช่วงเวลาในการไหลของน้ำจนปริมาตรครบ 500 มิลลิลิตร จะใช้เวลานานขึ้นเมื่อทำการจับเวลาในนาทีที่ 5, 10 และ 15 เนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านกระดาษกรองสามารถไหลได้ช้า

ถ้า SDI มีค่าที่ตรวจวัดต่ำ (<3) แสดงว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดของน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งช่วงเวลาในการไหลของน้ำจนปริมาตรครบ 500 มิลลิลิตร จะใช้เวลาน้อยเมื่อทำการจับเวลาในนาทีที่ 5, 10 และ 15 เนื่องจากน้ำที่ไหลผ่านกระดาษกรองสามารถไหลได้อย่างเร็ว

## 2.2 โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1

### 2.2.1 กระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์

โรงไฟฟ้าพระนครเหนือเป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าแบบพลังงานความร้อนร่วม (Combined Cycle System) ซึ่งมีเชื้อเพลิงคือ แก๊สธรรมชาติมาใช้ในการเผาไหม้ (Combustion) เพื่อทำให้เกิดความร้อนและความดันที่สูงขึ้นสามารถนำความร้อนมาขับเคลื่อนกังหันแก๊สเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และนำความร้อนที่เหลือจากการเผาไหม้ซึ่งเป็นความร้อนที่ไม่สามารถนำมาขับเคลื่อนกังหันแก๊สหรือความร้อนที่ผ่านการขับเคลื่อนกังหันแก๊สมาใช้ในการต้มน้ำในหม้อน้ำโดยนำไอน้ำที่ปราศจากความชื้น (Stream) มาขับเคลื่อนไอน้ำซึ่งเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกหนึ่งทาง ดังนั้นน้ำที่นำมาต้มในหม้อน้ำต้องเป็นที่น้ำบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนและแร่ธาตุต่างๆ เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ทางโรงไฟฟ้าพระนครเหนือจึงจัดตั้งโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Water Purification Process) 2 ชุด ได้แก่ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 และโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 2 เพื่อใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากสิ่งเจือปนและแร่ธาตุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 รูปที่ 2.2 น้ำที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำและการใช้ประโยชน์ของน้ำที่เก็บใน Service Tank ไปใช้

จากรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าน้ำดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์คือ น้ำประปาและได้มีการผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำในขั้นแรก โดยการกรองความขุ่นด้วยระบบไมโครฟิวเตชัน น้ำที่ได้เป็นน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (Service Water Influent, SWI) ซึ่งลักษณะทางกายภาพของน้ำเป็นน้ำใสและเก็บน้ำใน Treated Tank จากนั้นน้ำที่ไหลเข้า Service Tank ที่ได้มีการเติมแก๊สคลอรีนเข้าไปเพื่อฆ่าเชื้อโรคและนำไปเก็บไว้ที่ Service Tank ซึ่งน้ำที่เก็บใน Service Tank หรือน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (Service Water Effluent, SWE) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ตามรูปที่ 2.2 ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น โดยน้ำที่เก็บใน Service Tank ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไอน้ำบริสุทธิ์นั้นต้องผ่านเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิสต่อไปเพื่อเป็นการกรองอนุภาคต่างๆ ออกจากน้ำและนำไปเก็บที่ Reverse Osmosis Permeate Tank ซึ่งเป็นน้ำที่ยังคงมีไอออนต่างๆ เหลืออยู่จึงนำน้ำผ่านเข้าระบบมิกซ์เบจเพื่อทำการแลกเปลี่ยนประจุ เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 สามารถทำให้น้ำที่ผลิตได้เป็นน้ำที่บริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปนและแร่ธาตุต่างๆ (Demineralization) อย่างสมบูรณ์

## 2.2.2 คุณภาพของน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์

### 2.2.2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา

มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดน้ำประปา เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่ดีและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์หรือใช้ในทางสาธารณสุขภาคในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ซึ่งมาตรฐานคุณภาพของน้ำประปาแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ
<b>1.คุณลักษณะทางกายภาพ</b>		
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	pH at 25°C	6.5-8.5
สี (Color)	Pt-CO unit	15
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	1.0
รส (Taste)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
กลิ่น (Odor)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
<b>2.คุณลักษณะทางเคมี</b>		
คลอรีนอิสระที่หลงเหลือ (Free Residual Chlorine, FRC)	mg/L	0.2-2.0
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Total Dissolved Solid, TDS)	mg/L	1,000
คลอไรด์ (Chloride)	mg/L	250
ซัลเฟต (Sulfate)	mg/L	250
ไซยาไนด์ (Cyanide)	mg/L	0.07
ฟลูออไรด์ (Fluoride)	mg/L	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำ
<b>3. โลหะหนัก</b>		
เหล็ก (Iron)	mg/L	0.3
แมงกานีส (Manganese)	mg/L	0.1
ทองแดง (Copper)	mg/L	2.0
สังกะสี (Zinc)	mg/L	3.0
ตะกั่ว (Lead)	mg/L	0.01
โครเมียม (Chromium)	mg/L	0.05
แคดเมียม (Cadmium)	mg/L	0.003
สารหนู (Arsenic)	mg/L	0.01
ปรอท (Mercury)	mg/L	0.006

ที่มา : การประปานครหลวง, 2018

#### 2.2.2.2 คุณสมบัติของน้ำก่อนเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิสของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือ

ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์น้ำที่เก็บใน Service Tank ต้องผ่านระบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อทำการกรองอนุภาคต่างๆ เช่น อนุภาคที่ทำให้เกิดความกระด้าง สารอินทรีย์ โลหะหนักชนิดที่เป็นพิษ จุลินทรีย์ ฯลฯ โดยน้ำผ่านถุงกรองเป็นอันดับแรกเพื่อกรองอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ถัดจากนั้นจึงผ่านเมมเบรนของระบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อทำการกรองอนุภาคละเอียดหรืออนุภาคขนาดเล็กซึ่งทางโรงไฟฟ้าพระนครเหนือ มีการจัดหาเมมเบรนของระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์เพื่อมาใช้งานในระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 โดยการใช้งานเมมเบรนระบบรีเวอร์สออสโมซิสมีการกำหนดคุณสมบัติของน้ำ (Operating Condition) ก่อนเข้าระบบ และน้ำที่ออกจากระบบดังตารางที่ 2.2 ซึ่งจากตารางยังสามารถทำการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานของเมมเบรนของระบบรีเวอร์สออสโมซิสได้จากน้ำที่ออกจากระบบเพื่อให้ น้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพดีและส่งผลทำให้ระบบมีกัมมันต์ที่ทำหน้าที่ในการแลกเปลี่ยนประจุหรือไอออนต่างๆ ในน้ำสามารถผลิตน้ำได้ดีขึ้น และมีการใช้งานได้ยาวนานขึ้น

#### ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำที่ผ่านระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO)

พารามิเตอร์	ค่าควบคุม	หน่วย
<b>1. น้ำที่เข้าระบบ (Feed Water Quality)</b>		
ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (SDI)	<3	-
ค่าความเป็นและด่าง (pH)	2-11	-
คลอรีนอิสระที่หลงเหลือ (FRC)	<0.1	ppm
อุณหภูมิ (Temperature)	<40	C°
<b>2. ความดันที่เข้าระบบ (Feed Pressure)</b>		
	110-300	psi
<b>3. น้ำที่ออกจากระบบ (Final Effluent)</b>		
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	<10	µs/cm

ที่มา : North Bangkok Power Plant, n.d.

### 2.2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

จากกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 มีมาตรฐานคุณภาพน้ำประปาซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำสำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านสาธารณสุขภาคภายในโรงไฟฟ้า และคุณสมบัติของน้ำสำหรับเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรนให้สามารถเกิดการอุดตันได้น้อยที่สุด โดยการทดลองได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สามารถทำนายการเกิดตะกอนหรือการเกิดอนุภาคของสารแขวนลอย ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

#### 2.2.3.1 ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงความเป็นกรดและด่างของสารละลาย โดยมีค่าที่ใช้เรียกความเป็นกรดและด่างคือ พีเอช (pH) ซึ่งตัวพี (p) คือพาวเวอร์ (power) หรือกำลัง มีความหมายในเชิงยกกำลังและตัวเอช (H) หมายถึงความเข้มข้นของโปรตอน ช่วงของค่าพีเอชจะมีตั้งแต่ 0-14 โดยในแต่ละช่วงของพีเอชสามารถแสดงความเป็นกรดและด่างได้ต่างกันคือ ค่าพีเอชที่มีค่าเท่ากับ 0-6 เป็นช่วงที่บ่งชี้ว่ามีความเป็นกรด ค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 7 เป็นค่าบ่งชี้ว่ามีความเป็นกลาง และค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 8-14 เป็นช่วงที่บ่งชี้ว่ามีความเป็นด่างซึ่งค่าพีเอชสามารถบอกความรุนแรงของกรดและด่างได้จากการคำนวณดังสมการที่ 2.2

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] \quad (2.2)$$

โดยโปรตอน  $[\text{H}^+]$  สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลเคมีในกรณีที่เป็นสารละลาย ดังนี้



น้ำในธรรมชาติมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับ 7 ส่วนน้ำผิวดินมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7.5 และน้ำใต้ดินมีความเป็นกรดหรือต่ำกว่า 6 เนื่องจากมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ในน้ำใต้ดินปริมาณสูง ถ้าเป็นน้ำที่เก็บอยู่ในอ่างเก็บน้ำและมีสาหร่ายสีเขียวเจริญอยู่มักมีค่าพีเอชมากกว่า 9 ดังนั้นค่าพีเอชมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตน้ำประปาตั้งแต่การตกตะกอนจนถึงการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนควรมีค่าไม่เกิน 8 อย่างไรก็ตามหากน้ำมีค่าพีเอชต่ำมักมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเมื่อน้ำเข้าสู่ระบบเส้นท่อควรควบคุมค่าพีเอชเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนในระบบเส้นท่อน้อยที่สุดซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมและควรรักษาระดับไว้คือ 6.5-8.5 ค่าพีเอชแม้ว่าไม่มีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคโดยตรงแต่อาจมีผลต่อการเจริญของแบคทีเรียหรือเชื้อโรคเนื่องจากพีเอชที่มีค่าต่ำกว่า 3 และสูงกว่า 11 ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรียและพีเอชยังมีผลต่อการละลายของโลหะและสารพิษในน้ำด้วยถ้าหากมีค่าพีเอชต่ำ (นฤมล, 2561)

#### 2.2.3.2 การนำไฟฟ้า (Conductivity)

การนำไฟฟ้า (Conductivity) เป็นวิธีวัดความสามารถของน้ำในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดจากสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอนไอออนของคลอไรด์ ( $\text{Cl}^-$ ) ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) หรือแคทไอออนของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) เหล็ก

( $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) และอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic Matter) เช่น น้ำมัน ฟีนอล แอลกอฮอล์ และน้ำตาล ซึ่งสารอินทรีย์มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่าสารอนินทรีย์เมื่อละลายอยู่ในน้ำ การนำไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงทำให้การนำไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีรายงานผลค่าการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

หน่วยพื้นฐานที่ใช้ในกาวัดการนำไฟฟ้า คือ โมห์ (mho) หรือ ซีเมนต์ (siemens) ค่าการนำไฟฟ้าวัดเป็นไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร ( $\mu\text{mhos/cm}$ ) หรือ ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ( $\mu\text{s/cm}$ ) ซึ่งน้ำกลั่นมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5 – 3  $\mu\text{mhos/cm}$  (การประปานครหลวง, 2557)

### 2.2.3.3 ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolve Solid, TDS)

ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolve Solid, TDS) เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณของสารอินทรีย์ (Organic) และอนินทรีย์ (Inorganic) ทั้งหมดที่สามารถละลายอยู่ในน้ำหรือพวกแร่ธาตุ โลหะและเกลือ อีกทั้งยังเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงความอุดมสมบูรณ์ของน้ำ โดย TDS เกิดมาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น หินหรือแร่ธาตุต่างๆ ที่ละลายในน้ำหรือสารเคมีที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น เคมีภัณฑ์ที่บรรจุสารอินทรีย์ระเหยง่ายโดยส่วนใหญ่องค์ประกอบของ TDS ที่พบเป็นพวกแร่ธาตุ เนื่องจากธรรมชาติของน้ำมีความเป็นกรดเล็กน้อยในขณะที่น้ำไหลผ่านหินที่อยู่ในดินอาจทำให้หินเกิดการกัดกร่อนและละลายลงสู่น้ำในรูปของเหลวซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้รวมถึงแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) และซิลิกา ( $SiO_2$ )

ปริมาณ TDS ยังขึ้นอยู่กับค่าความนำไฟฟ้าโดยค่า TDS สามารถบอกได้ว่าน้ำตัวอย่างมีความสามารถนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าในน้ำซึ่งพวกอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุไฟฟ้าทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นและการวัดค่าการนำไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นวิธีการประมาณค่าของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำได้ใกล้เคียงความจริงมากโดยค่า TDS สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.4

$$\text{ปริมาณ TDS (mg/L)} = \text{สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม. ที่ } 25^{\circ}\text{C)} \times \text{ค่าคงที่} \quad (2.4)$$

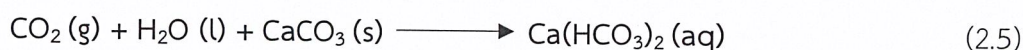
$$\text{ค่าคงที่} = 0.55 - 0.7$$

จากสมการที่ 2.4 ค่าคงที่ที่ได้มาจากอัตราส่วนระหว่างค่า TDS ซึ่งมาจากการคำนวณต่อค่าการนำไฟฟ้า ในกรณีใช้อัตราส่วนได้น้อยกว่า 0.55 แสดงว่ามีไอออนรวมต่ำสามารถเกิดได้จากแอมโมเนียม ( $NH_4^+$ ) และไนเตรต ( $NO_3^-$ ) ละลายอยู่ในน้ำและในกรณีใช้อัตราส่วนมีค่ามากกว่า 0.7 แสดงว่ามีไอออนรวมสูงซึ่งสามารถเกิดจากการแตกตัวของแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) และซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ ) ได้น้อย ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดมีหน่วยที่ใช้ คือหนึ่งในล้านส่วนหรือ พีพีเอ็ม (ppm) ถ้าเทียบกับความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $g/cm^3$ ) หน่วยที่ได้คือ มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมาตรฐานของน้ำประปាកำหนดค่าของแข็งทั้งหมดน้อยกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และ U.S. Public Health Service อนุโลมให้มีมากที่สุดไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรองแก้ว, 2559)

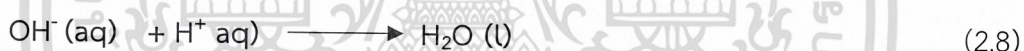
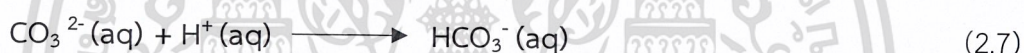
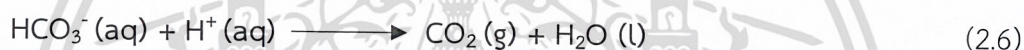
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.3.4 สภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่าง (Alkalinity) เป็นการวิเคราะห์หาความสามารถของสารละลายในการเปลี่ยนสภาพกรดให้เข้าสู่จุดสะเทินหรือความสามารถของสารละลายในการรับโปรตอนซึ่งสภาพด่างของน้ำสามารถเกิดมาจากเกลือของกรดอ่อน เช่น คาร์บอเนต ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) หรือไบคาร์บอเนต ( $\text{HCO}_3^-$ ) บอเรต ( $\text{B}_2\text{O}_7^{2-}$ ) ฟอสเฟส ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) และซิลิเกต ( $\text{SiO}_2$ ) ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีเกลือของกรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดฮิวมิก ฯลฯ โดยทั่วไปสภาพด่างเกิดจากไบคาร์บอเนตซึ่งมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.5



ในการผลิตน้ำต้องรู้สภาพด่างของน้ำเพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไป ถ้า น้ำที่มีค่าอัลคาไลน์สูงค่าพีเอชที่ได้จะมีค่าสูงและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำสูงเช่นเดียวกัน น้ำที่นำไปใช้ในหม้อน้ำจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะของพารามิเตอร์ชนิดนี้อย่างยิ่งซึ่งสภาพด่างทำหน้าที่ คล้ายบัฟเฟอร์และเป็นแหล่งของคาร์บอนอนินทรีย์ที่กำหนดความสามารถของแหล่งน้ำซึ่งสามารถช่วยในการเจริญเติบโตของสาหร่ายและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ จึงใช้เป็นตัววัดความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ ด้วยอนุภาคพื้นฐานในน้ำธรรมชาติที่ทำหน้าที่รับไฮโดรเจนไอออนดังสมการที่ 2.6-2.8



สภาพด่างโดยปกตินิยมแสดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ) ในน้ำธรรมชาติมีค่าอัลคาไลน์ที่  $1.00 \times 10^{-3}$  สมมูลต่อลิตรซึ่งอนุภาคที่พบนั้นขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในขณะเดียวกันนักเคมีนิยมแสดงหน่วยอัลคาไลน์ในรูปสมมูลต่อลิตร (Equivalents/L, eq/L) หรือจำนวนโมลของโปรตอนที่สะเทินกับอัลคาไลน์ต่อสารละลาย 1 ลิตร และต้องคำนึงน้ำหนักสมมูลของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของน้ำหนักสูตรเมื่อต้องการแปลงหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการคำนวณค่าอัลคาไลน์ที่สามารถหาได้จากการไทเทรตสารตัวอย่างกับสารละลายกรดที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน โดยทั่วไปนิยมใช้กรดซัลฟิวริก 0.02 นอร์มอล ในการไทเทรตจุดยุติที่พีเอชมีค่าเท่ากับ 8.3 สังเกตได้จากสีของอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) ซึ่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสีและการไทเทรตที่จุดยุติในขั้นที่สองมีพีเอชเท่ากับ 4.6 สังเกตได้จากสีของอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ เมธิลเรด (Methyl Red) ซึ่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีชมพูอ่อน สภาพด่างสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9-2.10

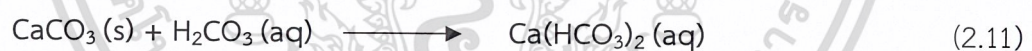
$$[P\text{-alk}] = \frac{T_P \times [N_a] \times 50000}{V} \quad (2.9)$$

$$[M\text{-alk}] = \frac{T_T \times [N_a] \times 50000}{V} \quad (2.10)$$

เมื่อ [P-alk] = ฟีนอล์ฟทาลิน อัลคาไลนิตี้ (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)  
 [M-alk] = อัลคาไลนิตี้ทั้งหมดหรือ [T-alk] (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)  
 T<sub>P</sub>, T<sub>T</sub> = ปริมาตรของกรดใช้ในการไทเทรตช่วงฟีนอล์ฟทาลิน และปริมาตรที่ใช้ทั้งหมดตามลำดับ  
 N<sub>a</sub> = ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ (Normal) (กรองแก้ว, 2559)

### 2.2.3.5 ความกระด้าง (Hardness)

ความกระด้าง (Hardness) คือน้ำที่มีส่วนผสมของธาตุโลหะที่อยู่ในสภาพไอออนที่มีประจุบวกโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพไอออนที่มีประจุ +2 สามารถทำให้น้ำมีแรงตึงผิวมากและเกิดฟองกับสารซักฟอกได้ยากซึ่งไอออนของโลหะที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง เช่น แคลเซียมไอออน (Ca<sup>2+</sup>), แมกนีเซียมไอออน (Mg<sup>2+</sup>) และธาตุอื่นๆ เล็กน้อย เช่น เหล็ก (II) ไอออน (Fe<sup>2+</sup>), แมงกานีส (II) ไอออน (Mn<sup>2+</sup>) และสตรอนเชียมไอออน (Sr<sup>2+</sup>) โดยทั่วไปสามารถใช้ปริมาณเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นตัวชี้วัดความกระด้างของน้ำ ในน้ำบาดาลมักมีความกระด้างสูงกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากในน้ำบาดาลมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่จึงค่อนข้างมีสภาพเป็นกรด (จาก H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เมื่อน้ำไหลซึมผ่านชั้นดินหรือหินสามารถเกิดการชะล้างหินปูน (CaSO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>) ละลายลงในน้ำได้ดังสมการที่ 2.11 - 2.12

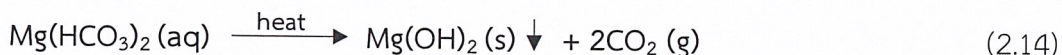


น้ำที่มีความกระด้างมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจทำให้เกิดคราบในกระบวนการผลิตน้ำ เช่น คราบที่เกิดในระบบเส้นท่อและถังเก็บน้ำ เป็นต้น ในด้านสาธารณสุขโรคภัยทำให้เปลืองสบู่ในการทำความสะอาดหรือการซักล้างรวมทั้งทำให้เกิดไขสบู่ และในการต้มน้ำถ้ามีความกระด้างมากสามารถทำให้เกิดคราบหินปูน (CaCO<sub>3</sub>) ในกรณีที่น้ำมีความกระด้างน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือน้ำอ่อน (Soft Water) อาจก่อให้เกิดผลเสียในระบบเส้นท่อซึ่งมีโอกาสทำให้เกิดการกัดกร่อนในระบบท่อน้ำประปา

ความกระด้างของน้ำแบ่งเป็น 2 ประเภท คือความกระด้างชั่วคราวและความกระด้างถาวร ดังนี้

1. ความกระด้างชั่วคราว (Temporary Hardness หรือ Carbonate Hardness) เกิดจากเกลือไฮโดรเจนคาร์บอเนตของแคลเซียม หรือแมกนีเซียมสามารถกำจัดได้โดยการต้มดังสมการที่ 2.13-2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขของลิขสิทธิ์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. ความกระด้างถาวร (Permanent Hardness หรือ Non-carbonate Hardness) เป็นความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมหรือแมกนีเซียมจับกับไอออนลบอื่นๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอเนต เช่น  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$

ความกระด้างของน้ำไม่ได้เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคแต่มีความจำเป็นในการควบคุมระดับความกระด้างของน้ำบริโภคไม่ให้เกิน 500 มิลลิกรัม เพื่อป้องกันหรือลดการอุดตันท่อน้ำเย็นหรือท่อน้ำร้อน ลดการอุดตันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ และลดการสิ้นเปลืองสบู่ บางกรณีอาจพบโซเดียมไอออนซึ่งเป็นสาเหตุของการขัดขวางการเกิดฟองสบู่และน้ำมีรสกร่อย แต่ไม่มีผลในการเกิดตะกอนเนื่องจากละลายน้ำได้ดี จึงเรียกว่าความกระด้างเทียม (Pseudo Hardness)

ในการหาค่าความกระด้างโดยการไทเทรตด้วยวิธี EDTA Titrimetric Method หรือเอนด์ที่ใช้คือ EDTA (Ethylenediaminetetraacetic, EDTA) และอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ เอริโอโครม แบลคที (EriochromeBlack T, EBT) เปลี่ยนจากสีม่วงแดงเป็นสีน้ำเงินและถ้าหาค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม สีที่จุดยุติที่ปรากฏเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีม่วง ในการไทเทรตหาความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม มีสีของจุดยุติที่ต่างกันเนื่องจากชนิดของบัฟเฟอร์ที่ใช้ต่างกันและอินดิเคเตอร์ที่ใช้คือ เมอร์เรกไซด์ (Murexide Indicator) ซึ่งทั้งบัฟเฟอร์และอินดิเคเตอร์มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมสำหรับการคำนวณค่าความกระด้างสามารถหาได้จากสมการที่ 2.15

$$\text{Hardness (mg/L) as CaCO}_3 = \frac{A \times B}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่ใช้ (mL)}} \quad (2.15)$$

โดย A = ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

B = ความเข้มข้นของสารละลาย EDTA (mg/L as  $\text{CaCO}_3$ ) (กรองแก้ว และฟิสมาย, 2559)

### 2.2.3.6 ดัชนีแลงเกลียร์ (Langelier Saturation Index, LSI)

ดัชนีแลงเกลียร์ (Langelier Saturation Index, LSI) เป็นการทำนายโอกาสการเกิดตะกอนของหินปูนในระบบหรือการกัดกร่อนโลหะ โดยคำนวณได้จากค่าพีเอชอิ่มตัวด้วยหินปูน (Saturation pH,  $\text{pH}_s$ ) ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เริ่มพบการตกตะกอนของหินปูนในระบบ โดยพิจารณาจากปริมาณความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมในน้ำ พีเอชของน้ำ ค่าอัลคาไลนิตี้ทั้งหมดในน้ำ ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำและอุณหภูมิของน้ำ (Temperature) ซึ่งสามารถคำนวณค่าพีเอชอิ่มตัวด้วยหินปูน ( $\text{pH}_s$ ) ได้จากสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (2.16)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.3 สามารถนำมาแทนค่าในตัวแปรได้ โดย

A = ค่าที่หาได้จากตารางความสัมพันธ์ของค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำหรือได้จากสมการที่ 2.17

$$A = \frac{\text{Log}_{10}[\text{TDS}]-1}{10} \quad (2.17)$$

B = ค่าที่หาได้จากตารางความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ หรือได้จากสมการที่ 2.18

$$B = -13.12 \times \text{Log}_{10} (^{\circ}\text{C}+273) + 34.55 \quad (2.18)$$

C = ค่าที่หาได้จากตารางความสัมพันธ์ของปริมาณความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมหรือได้จากสมการที่ 2.19

$$C = \text{Log}_{10} [\text{Ca}^{2+} \text{ as CaCO}_3] - 0.4 \quad (2.19)$$

D = ค่าที่หาได้จากตารางความสัมพันธ์ของปริมาณอัลคาไลนิต้ทั้งหมดหรือได้จากสมการที่ 2.20

$$D = \text{Log}_{10} [\text{Alkalinity as CaCO}_3] \quad (2.20)$$

เมื่อคำนวณค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูนได้แล้ว สามารถหาค่าดัชนีแลงเกลียร์ได้จากสมการที่ 2.21

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (2.21)$$

โดย pH คือ ค่าพีเอชของน้ำที่แท้จริง และ  $\text{pH}_s$  คือ ค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูนซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างความกระด้าง, สภาพด่าง, ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ และอุณหภูมิ สามารถหาได้จากตารางที่ 2.3

หากพบว่าค่าพีเอชน้อยกว่าค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูน หรือดัชนีแลงเกลียร์มีค่าติดลบแสดงว่าไม่มีโอกาสในการเกิดการตกตะกอนด้วยหินปูน แต่หากพบว่าค่าพีเอชมากกว่าค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูน หรือดัชนีแลงเกลียร์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าตะกอนของหินปูนมีโอกาสตกตะกอนในน้ำ และอาจพบการเกิดตะกอนในระบบหล่อเย็น นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าดัชนีแลงเกลียร์ไปใช้ในการพิจารณาในการยับยั้งการกัดกร่อนและการเติมสารเคมีที่ใช้ป้องกันการเกิดตะกอนหินปูนในระบบหล่อเย็น (รินทวีวัฒน์, 2560)

#### 2.2.3.7 ดัชนีไรนาร์ (Ryznar Index, RI)

ดัชนีไรนาร์ (Ryznar Index; RI) เป็นดัชนีที่ใช้ในการทำนายโอกาสการเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนต และการกัดกร่อนของโลหะซึ่งดัชนีไรนาร์ใช้ทำนายควบคู่ไปกับดัชนีแลงเกลียร์ เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างของน้ำจากสองแหล่งที่มีค่าดัชนีแลงเกลียร์เท่ากันซึ่งเป็นไปได้ทั้งน้ำที่มีค่าความกระด้างต่ำ และน้ำที่มีค่าความกระด้างสูงโดยสามารถหาค่าของดัชนีไรนาร์จากค่าพีเอชและค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูนซึ่งค่าที่ได้มาจากดัชนีแลงเกลียร์ ในการคำนวณหาค่าดัชนีไรนาร์สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.22 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$RI = 2pH_s - pH \quad (2.22)$$

หากพบว่าค่าดัชนีโรนาร์มีค่า 4 – 6 แสดงว่าอาจเกิดตะกอนได้ หรือถ้าค่าดัชนีโรนาร์มีค่า 6-7 แสดงว่าเกิดตะกอนหรือกัดกร่อนโลหะเล็กน้อย และถ้าพบว่าค่าดัชนีโรนาร์มีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าสามารถเกิดการกัดกร่อนโลหะได้ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2561)

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ในการหาดัชนีแลงเกลียร์

Total dissolved solid (mg/L)	A	Calcium Hardness (mg/L of CaCO <sub>3</sub> )	C	M Alkalinity (mg/L of CaCO <sub>3</sub> )	D
50 - 300	0.1				
400 - 1000	0.2	10 - 11	0.6	10 - 11	1.0
Temperature °C	B	12 - 13	0.7	12 - 13	1.1
		14 - 17	0.8	14 - 17	1.2
		18 - 22	0.9	18 - 22	1.3
		23 - 27	1.0	23 - 27	1.4
		28 - 34	1.1	28 - 35	1.5
0 - 1.1	2.6	35 - 43	1.2	36 - 44	1.6
2.2 - 5.5	2.5	44 - 45	1.3	44 - 45	1.7
6.7 - 8.9	2.4	56 - 69	1.4	56 - 69	1.8
10.0 - 13.3	2.3	70 - 87	1.5	70 - 88	1.9
14.4 - 16.7	2.2	88 - 110	1.6	89 - 110	2.0
17.8 - 21.1	2.1	111 - 138	1.7	111 - 139	2.1
22.2 - 26.7	2.1	139 - 174	1.8	140 - 176	2.2
27.8 - 31.1	1.9	175 - 220	1.9	177 - 220	2.3
37.8 - 43.3	1.7	280 - 340	2.1	280 - 350	2.5
44.4 - 50.0	1.6	350 - 430	2.2	360 - 440	2.6
51.1 - 55.6	1.5	440 - 550	2.3	450 - 550	2.7
56.7 - 63.3	1.4	560 - 690	2.4	560 - 690	2.8
64.4 - 71.1	1.3	700 - 870	2.5	700 - 880	2.9
72.2 - 81.1	1.2	800 - 1000	2.6	890 - 1000	3.0

ที่มา : กรองแก้ว และพิสมัย, 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.8 คลอรีน (Chlorine, Cl<sub>2</sub>)

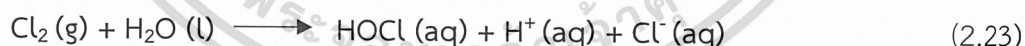
คลอรีน (Chlorine, Cl<sub>2</sub>) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มฮาโลเจนหรือหมู่ 7 ในตารางธาตุซึ่งมีลักษณะเป็นก๊าซสีเหลืองแกมเขียว มีกลิ่นฉุนและไม่พบในธรรมชาติ โดยทั่วไปคลอรีนอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ ความดันปกติและมีลักษณะของก๊าซเป็นสีเขียวตองอ่อน ในสภาวะภายใต้ความดันปกติสีของคลอรีน เปลี่ยนเป็นของเหลวสีอำพันและไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีความชื้น ถ้าหากคลอรีนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นอยู่สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง และช่วยให้เกิดการติดไฟเหมือนก๊าซออกซิเจนได้แต่ไม่สามารถทำให้เกิดระเบิดซึ่งคุณสมบัติของคลอรีน สามารถเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงเมื่อละลายน้ำคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดการแตกตัวให้ออกซิเจนของคลอรีนโดยออกซิเจนของคลอรีนที่แตกตัวสามารถทำลายเชื้อโรค เชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำ ทำลายสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสี รสชาติ กลิ่นในน้ำและช่วยตกตะกอนกำจัดพวก แอมโมเนีย เหล็ก แมงกานีส และซิลิเกตได้

คลอรีนที่อยู่ในภาชนะบรรจุเป็นคลอรีนแห้งและมีสถานะเป็นของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้ความดันสูงโดยความดันสูงสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามอุณหภูมิและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนที่เป็นของเหลวบริเวณ ด้านล่างของภาชนะบรรจุสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซ ดังนั้นควรเก็บภาชนะบรรจุคลอรีนในที่ร่ม และมีอากาศถ่ายเทสะดวก

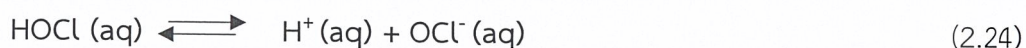
#### 1) คลอรีนอิสระที่หลงเหลือ (Free Residual Chlorine, FRC)

คลอรีนอิสระที่หลงเหลือเกิดจากปฏิกิริยาการเติมคลอรีนลงไป在水里เรียกว่ากระบวนการคลอรีเนชัน (Chlorination) ส่วนมากสามารถพบได้ทั้งในน้ำประปา น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งน้ำจากสระว่ายน้ำ ซึ่งต้องมีการควบคุมปริมาณของคลอรีนอิสระที่หลงเหลือให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเนื่องจากถ้ามีการเติมคลอรีนในปริมาณที่เกินมาตรฐานสามารถทำให้เกิดอันตรายได้ โดยกระบวนการคลอรีเนชันสามารถเกิดจากการเติมแก๊สคลอรีน สารละลายคลอรีน หรือคลอรีนผง

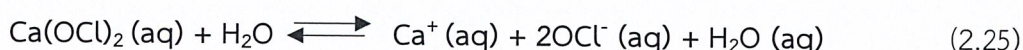
แก๊สคลอรีนเมื่อละลายน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ให้กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ดังสมการที่ 2.23



กรดไฮโปคลอรัสแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออนและไฮโปคลอไรต์ไอออนดังสมการที่ 2.24



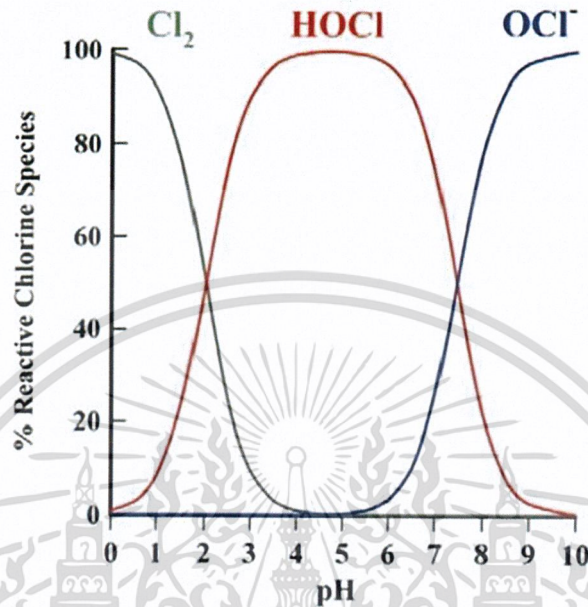
ในกรณีที่เติมแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ [Ca(OCl)<sub>2</sub>] ลงในน้ำการละลายเกิดขึ้นดังสมการที่ 2.25



จากสมการที่ 2.23 – 2.25 คลอรีน, ไฮโปคลอรัส และไฮโปคลอไรต์ไอออน คือคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ปริมาณของคลอรีนอิสระที่หลงเหลือชนิดใดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ดังรูปที่ 2.3 ค่าพีเอชของน้ำต่ำกว่า 1.0 คลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในรูปของแก๊สคลอรีนทั้งหมด

และระเหยสู่บรรยากาศ ค่าพีเอชเท่ากับ 1.0 – 3.5 คลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในรูปของแก๊สคลอรีน ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไฮโปคลอไรต์ ค่าพีเอชเท่ากับ 3.5 – 5.5 คลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในรูปไฮโปคลอไรต์ทั้งหมด ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 – 9.0 อยู่ในรูปของไฮโปคลอไรต์และไฮโปคลอไรต์ไอออนและพีเอชที่มีค่าตั้งแต่ 9.0 ขึ้นไปอยู่ในรูปไฮโปคลอไรต์ไอออน



รูปที่ 2.3 ผลของ pH และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระคงที่ (USDA, 2015)

คลอรีนอิสระในรูปไฮโปคลอไรต์มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าคลอรีนในรูปไฮโปคลอไรต์ไอออน ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงควรมีคลอรีนในรูปของไฮโปคลอไรต์เหลืออยู่ในน้ำ ปริมาณคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องมีไม่ต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่ค่าพีเอชของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU (การประปา นครหลวง, 2561)

การเติมแก๊สคลอรีนในน้ำดิบตั้งแต่ยังไม่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อช่วยในการลดกลิ่นสี รสชาติ เกิดการตกตะกอนสารอินทรีย์แขวนลอยและป้องกันการเกิดสาหร่ายในชั้นกรอง ปริมาณแก๊สคลอรีนที่เติมในน้ำดิบควรเพียงพอที่ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สคลอรีนเหลือค้างอยู่ในถังกรองประมาณ 0.1-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และการเติมแก๊สคลอรีนภายหลังกระบวนการผลิตน้ำประปา ควรเติมแก๊สคลอรีนลงในถังเก็บกักน้ำประปาก่อนใช้งานโดยต้องแน่ใจว่ามีระยะเวลาที่ให้คลอรีนทำปฏิกิริยากับน้ำประปาอย่างน้อย 30 นาที โดยเติมแก๊สคลอรีนประมาณ 0.25 ถึง 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ได้คลอรีนที่หลงเหลือค้างอยู่ประมาณ 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำประปา เมื่อส่งน้ำออกจากโรงผลิตน้ำประปา (เกรียงศักดิ์, 2550)

## 2) การวิเคราะห์คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)

การวิเคราะห์คลอรีนอิสระสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี ดังนี้

- วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method) ใช้ในกรณีที่น้ำทิ้งมีสารอินทรีย์ปนอยู่มากและมีปริมาณคลอรีนมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีนี้เหมาะสำหรับค่าพีเอชประมาณ 3 – 4 แต่มีตัวรบกวนคือ เฟอร์ริก [Iron (III), Fe<sup>3+</sup>], แมงกานีส [Manganese (IV), Mn<sup>4+</sup>] และไนไตรต์ไอออน

- วิธีออร์ทอโทลิดีน (Orthotolidine Method) ใช้ในการหาคลอรินที่มีปริมาณไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตรซึ่งวิธีนี้ให้ผลถูกต้องได้ดีถ้าไม่มีตัวรบกวนพวกเฟอร์ริก [Iron (III),  $Fe^{3+}$ ], แมงกานีส [Manganese;  $Mn^{4+}$ ], สารประกอบไนไตรต์, ลิกโนเซลลูโลสและพวกแอลจี ในปัจจุบันไม่มีการใช้วิธีนี้เนื่องจากให้ผลไม่แม่นยำและผิดพลาดมาก

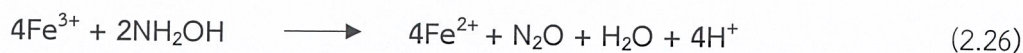
- วิธีออร์ทอโทลิดีน – อาร์เซไนต์ (Orthotolidine- Arsenite Method) เป็นวิธีที่ใช้ได้ดีแม้ว่ามีเหล็กและแมงกานีสปะปนอยู่ในน้ำทั้งถ้ามีออร์แกนิกไนโตรเจนอยู่ในปริมาณน้อยสามารถใช้วิธีนี้ได้

- วิธีการทำให้เกิดสี (Colourmetric Method) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการวัดปริมาณคลอรินอิสระที่หลงเหลืออยู่มากที่สุดโดยสารมาตรฐานที่ทำให้เกิดสีและใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ดีพีดี (N,N- diethyl-p-phenylene diamine, DPD) ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้เป็นอินดิเคเตอร์ในการวัดปริมาณคลอริน ทั้งวิธีการไทเทรตด้วย DPD การเทียบสีด้วย DPD โดยการทดสอบด้วยชุดทดสอบ Test Kit DPD เป็นวิธีที่ได้รับมาตรฐาน USEPA (United States Environmental Protection Agency, USEPA) เนื่องจาก DPD เมื่อทำปฏิกิริยากับคลอรินในน้ำสีที่ปรากฏคือ สีแดงและวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 515 นาโนเมตร การวัดปริมาณคลอรินด้วยวิธี DPD มีช่วงการวัดที่จำกัดอยู่ที่ 0.7–56.0 ไมโครกรัมต่อลิตร

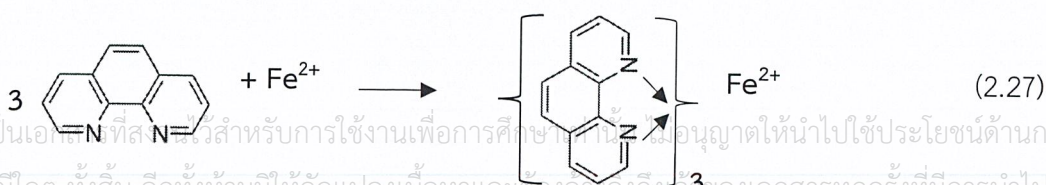
เนื่องจากวิธีการเทียบด้วยการใช้ชุดทดสอบ Test kit DPD โดยมี DPD เป็นสารมาตรฐานสามารถเกิดสีได้อย่างรวดเร็ว มีความไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงและมีการใช้อย่างแพร่หลายกว่าสารชนิดอื่นจึงเป็นวิธีที่เลือกใช้ในการทดลองเพื่อตรวจวัดปริมาณคลอรินอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ

### 2.2.3.9 ไอออนของเหล็กทั้งหมด (Total Iron, TFe)

เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำก่อให้เกิดคราบสีน้ำตาลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันในน้ำใต้ดินมักมีเฟอร์รัสไอออน [Iron (II),  $Fe^{2+}$ ] ละลายน้ำอยู่เมื่อเฟอร์รัสสัมผัสกับออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์ริกทำให้เห็นเป็นคราบสนิมสีน้ำตาล เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำยังคงมีทั้งในรูปออกไซด์และรูปรีดิวซ์ซึ่งสามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุได้ดีในการหาปริมาณของเหล็กไอออนนิยมใช้วิธีที่ทำให้เกิดสี (Colorimetric Method) และใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่สามารถให้กำเนิดแสงช่วงที่มองเห็นได้ (Visible Spectrum) สารที่นิยมใช้เพื่อให้เกิดไอออนเชิงซ้อนของเหล็กคือ ฟิแนนโทรลีน (Phenanthroline) ในขั้นแรกจำเป็นต้องให้เหล็กอยู่ในรูปเฟอร์รัสโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกกับไฮดรอกซีลามีน ดังสมการที่ 2.26



เมื่อเติมฟิแนนโทรลีน (1,10-phenanthroline) เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเฟอร์รัสได้สีส้มของสารประกอบเชิงซ้อน ดังสมการที่ 2.27 และสามารถวัดปริมาณเหล็กที่ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

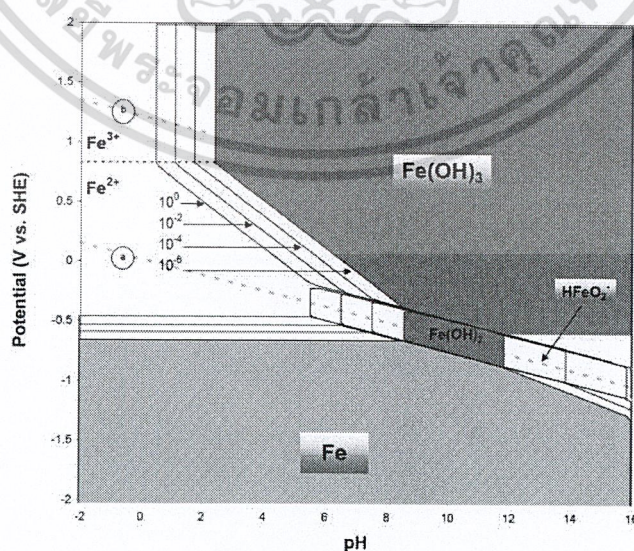
นอกจากนี้เฟอร์รัสออกไซด์ซึ่งแบคทีเรีย (Iron Oxidizing Bacteria) สามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนให้เป็นเฟอร์ริกไอออนและออกซิไดซ์ชีวมวลหรือเซลล์แบคทีเรียเกิดน้ำที่มีกลิ่น รส ที่ไม่พึงประสงค์ (กรองแก้ว, 2559)

ในกรณีที่เหล็กมีปริมาณน้อยมากส่วนใหญ่นิยมนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณวิเคราะห์และยังเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว มีความเที่ยง มีความแม่นยำ มีสภาพไวสูงและเป็นเทคนิคที่เฉพาะดีมากสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนน้อยๆในน้ำเสียได้และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ความสามารถของเทคนิคนี้มีสูงมากเพราะสามารถใช้วิธีวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ถึง 67 ธาตุทำให้การใช้งานเป็นไปได้เป็นอย่างดี (ชนัญชิตา, 2561)

จากการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมดสามารถทำนายไอออนของเหล็กได้เนื่องจากเหล็กที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนของถังที่ทำด้วยโลหะหนักโดยมีเหล็กเป็นสารประกอบ เมื่อมีการเติมคลอรีนลงในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรคและเก็บน้ำอยู่ใน Service Tank ในระยะเวลาพอสมควรสามารถทำให้น้ำเกิดการกัดกร่อนถัง และเกิดการตกตะกอนเป็นสนิมของเหล็กหรือสารแขวนลอยในน้ำโดยเหล็กที่เกิดจากการกัดกร่อนละลายน้ำอยู่ในรูปไอออนสองบวกและไอออนสามบวก เมื่อมีตัวรีดิวซ์ละลายอยู่ในน้ำสามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนหรือสนิมคราบสีน้ำตาลที่เกิดจากสารประกอบของเหล็กซึ่งสามารถทำนายรูปของตะกอนเหล็กได้ดังนี้

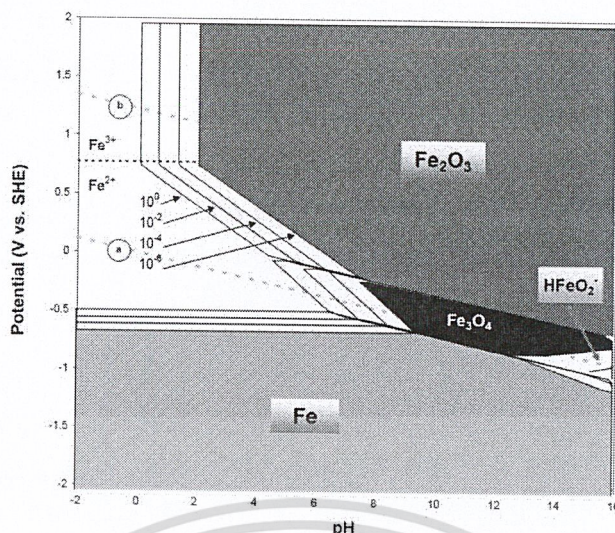
### 1) ไฮดรอกไซด์หรือออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ

เมื่อมีไฮดรอกไซด์หรือออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำสามารถรวมตัวกับเฟอร์รัสไอออนเกิดเป็นตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์หรือตะกอนเหล็กออกไซด์  $[Fe(OH)_2, Fe(OH)_3, Fe_2O_3]$  จากรูปที่ 2.4-2.5 สามารถพิจารณาสารประกอบของเหล็กได้เมื่อทราบค่าพีเอชของน้ำและมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.28-2.29



เอกสารรูปที่ 2.4 pE-pH ของเหล็กเมื่อมีไฮดรอกไซด์ละลายอยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ไม่ว่ากรณีใด (Corrosion Doctors, n.d.) ลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

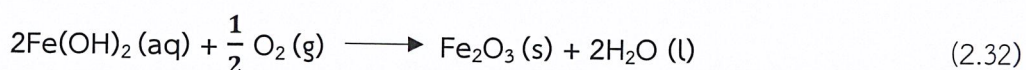
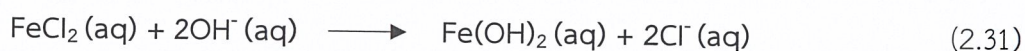
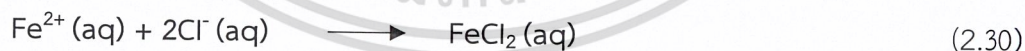


รูปที่ 2.5 pE-pH ของเหล็กเมื่อมีออกซิเจนละลายอยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Corrosion Doctors, n.d.)



## 2) คลอรีนที่ละลายอยู่ในน้ำ

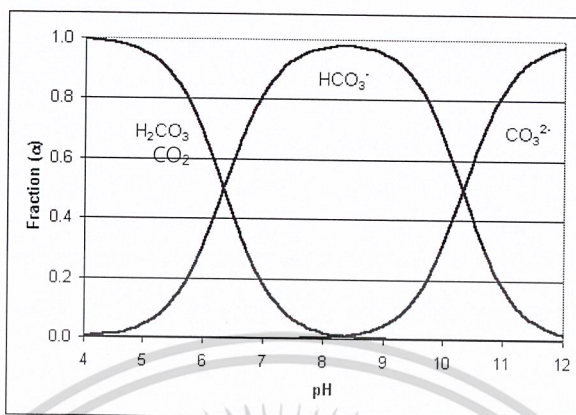
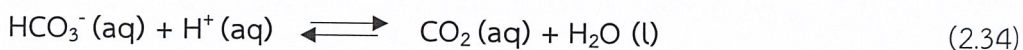
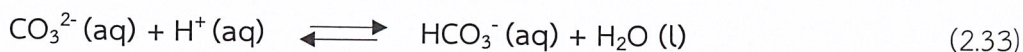
เมื่อมีการเติมแก๊สคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กได้ดีขึ้น เนื่องจากคลอรีนที่เติมลงในน้ำเกิดการแตกตัวเป็นไฮโปคลอไรต์ โดยไฮโปคลอไรต์เป็นตัวเร่งกระบวนการกัดกร่อนให้เกิดเร็วขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาสมการเคมีที่เกิดจากการแตกตัวของคลอรีนได้ดังรูปที่ 2.3 และเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของคลอรีนดังสมการที่ 2.23-2.24 จากสมการเคมีการแตกตัวของคลอรีนได้คลอไรต์ไอออนซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนเกิดผลิตภัณฑ์ได้เฟอร์รัส(II)คลอไรด์ ( $\text{FeCl}_2$ ) และเฟอร์รัส(II) คลอไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นตะกอนของเหล็กดังสมการที่ 2.30-2.32



## 3) น้ำมีความกระด้าง

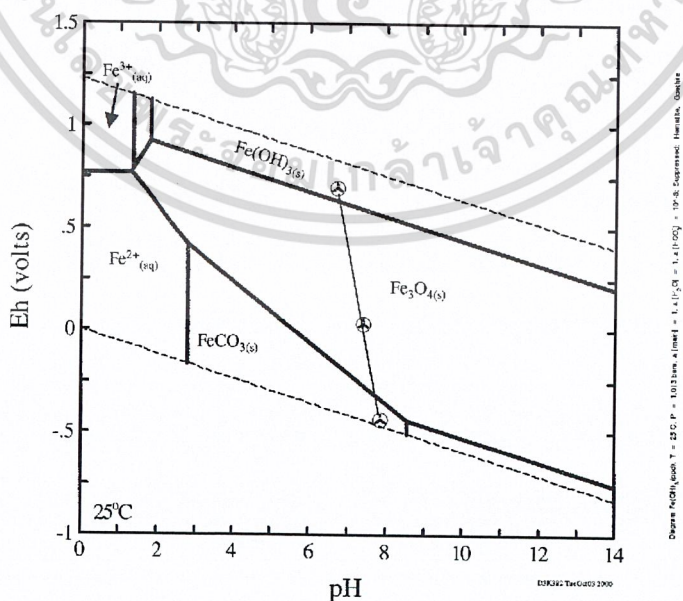
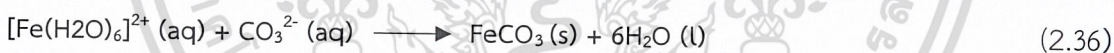
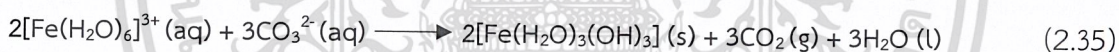
เมื่อน้ำมีความกระด้างซึ่งเกิดจากอนุพันธ์ของคาร์บอเนตสามารถทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนทำให้เกิดการตกตะกอนเหล็กคาร์บอเนตโดยอนุพันธ์ของคาร์บอเนตเมื่อละลายน้ำสามารถเกิดการแตกตัวได้ดังสมการที่ 2.33-2.34 หรือพิจารณาตามค่าพีเอชของน้ำได้จากรูปที่ 2.6 ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารเป็นอีกสิ่งหนึ่งซึ่งมีผลต่อค่าพีเอชของน้ำได้จากรูปที่ 2.6 ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 อนุพันธ์ของคาร์บอเนตที่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ (ม.ป.ป.)

จากสมการการแตกตัวของอนุพันธ์ของคาร์บอเนตข้างต้นทำให้น้ำมีค่าพีเอชลดลงได้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงสภาพค่าพีเอชของน้ำให้มีความเป็นกรดได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดการกัดกร่อนโลหะและเกิดสารเชิงซ้อนของเหล็กได้ดีขึ้น ในกรณีนี้น้ำมีความเป็นกรดมากพอและน้ำมีความเป็นกลางหรือกรดอ่อนสามารถเกิดการตกตะกอนกับไอออนของเหล็กได้ดังสมการที่ 2.35 และ 2.36 ตามลำดับ และสามารถพิจารณาสารประกอบของเหล็กได้ดังรูปที่ 2.7



เอกสารรูปที่ 2.7 pE- pH ของเหล็กที่มีคาร์บอเนตละลายอยู่ในน้ำร่วมกับไฮดรอกไซด์และออกซิเจน ไม่ว่าจะกรณีใด ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส (Zachara John M. and Kukkadapu Ravi K., 2017)

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**2.3.1 ศุภรักษ์และคณะ (2559)** ศึกษาการจำลองปริมาณคลอรีนอิสระที่หลงเหลือในระบบท่อจ่ายน้ำประปา โดยพื้นที่ศึกษาอยู่ในพื้นที่รับผิดชอบของสำนักงานประปาสาขาลาดพร้าว การประปานครหลวง และได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระที่หลงเหลือที่สถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าวกับจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ฝ้าระวาง ผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่ปริมาณคลอรีนอิสระที่หลงเหลือในการเดินทางจากสถานีสูบน้ำจ่ายน้ำลาดพร้าวไปถึงจุดจ่ายน้ำเข้าพื้นที่ศึกษาประมาณ 30 นาที 2) การศึกษาการกระจายตัวของคลอรีนในระบบท่อจ่ายน้ำในพื้นที่ฝ้าระวางถึงระดับจุดผู้ใช้น้ำ พบว่าโปรแกรม EPANET มีข้อจำกัดในเรื่องการคำนวณอายุน้ำ คือ ค่าอายุน้ำในแต่ละเส้นท่อต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที จึงทำให้ต้องมีการรวมเส้นท่อที่อายุน้ำไม่ผ่านเกณฑ์เข้าด้วยกันก่อนวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่าอายุน้ำกับอัตราการไหลของน้ำเข้าพื้นที่ฝ้าระวางมีความสัมพันธ์แบบผกผันกันอย่างชัดเจน รวมทั้งพบว่าปริมาณคลอรีนที่จุดจ่ายน้ำเข้าอยู่ในช่วง 0.20-1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สลายตัวและคงเหลือ ณ จุดวัดไกลสุดอยู่ในช่วง 0.05-0.60 มิลลิกรัมต่อลิตร

**2.3.2 Amandine Mosset (2008)** คุณลักษณะของน้ำโดยทั่วไปจะสนใจเกี่ยวกับการปรับสภาพของน้ำเพื่อใช้ในระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งพารามิเตอร์พื้นฐานไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากในการวิเคราะห์ที่มีขีดจำกัดและความว่องไวในการตอบสนองของพารามิเตอร์เหล่านี้มีน้อยมากเมื่อเทียบกับพฤติกรรมของความแปรปรวนของน้ำที่วัดได้จากโรงผลิตน้ำอย่างเต็มรูปแบบในการประเมินค่าของศักยภาพของการตกตะกอนในน้ำอาจเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถตอบสนองได้อย่างว่องไวมากกว่าพารามิเตอร์พื้นฐานซึ่งเป็นการส่งเสริมเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยแท้จริงเพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง

ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของศักยภาพการตกตะกอนของน้ำโดยเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบและการทำงานของกระบวนการเมมเบรน RO ซึ่งเกณฑ์ในการวิเคราะห์ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ เป็นมาตรฐานในหน่วยงาน ASTM D4189-95 (ได้รับการรับรอง 2002) วิธีการนี้เป็นการประเมินปริมาณของสารแขวนลอยในน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับความเปลี่ยนแปลงของตะกอนในเมมเบรนขนาด 0.45 ไมโครเมตร ระหว่างที่มีการกรอง โดยดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมักใช้กับน้ำที่ศักยภาพการตกตะกอนต่ำ เช่น มีการปรับสภาพน้ำในการเติมเข้าระบบรีเวอร์สออสโมซิสหรือนาโนฟิวเทชั่น (SDI ณ วินาทีที่  $15 < 5$ ) ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสามารถเป็นพารามิเตอร์ที่ดีในการหาศักยภาพการตกตะกอนของน้ำที่มีค่าความขุ่นต่ำและของแข็งแขวนลอย อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีความเสี่ยงสูงสำหรับความแน่นอนของผลการทดลองจึงเป็นผลทำให้พารามิเตอร์นี้ต้องมีการทดลองให้เกิดความแม่นยำได้อย่างชัดเจนมาก

วิธีการต่างๆในการประเมินหาแนวโน้มการตกตะกอนของน้ำที่แสดงขึ้นโดยพื้นฐาน ซึ่งวิธีการต่างๆจะขึ้นอยู่กับวิธีมาตรฐานของ ASTM D 4189-95 โดยวิธีมาตรฐานของดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสามารถตรวจสอบได้จากการทำซ้ำและความแม่นยำโดยคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนที่สามารถเกิดขึ้นได้จากการสังเกตในพื้นที่นั้น ข้อความของ ASTM ระบุถึงขีดจำกัดของดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำโดยเฉพาะสำหรับค่า SDI สูง จากปัจจัยที่แตกต่างสามารถเป็นตัวแทรกแซงหรือตัวรบกวน

ผลของ SDI ได้อย่างละเอียด (คุณภาพของเมมเบรนขนาด 0.45 ไมโครเมตร, %การอุดตัน) ผลของการเปรียบเทียบแสดงข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากการศึกษาและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องโดยการเรียนรู้ขอบเขตของการใช้งานและขีดจำกัดของ SDI-ASTM วิธีการนี้ยังช่วยขยายความสามารถในการศึกษาแนวโน้มการตกตะกอนของน้ำที่มีค่าสูงได้ โดยขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การอุดตันที่ 75% ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับคุณลักษณะของผิวหน้าน้ำทะเล น้ำกร่อย และผลการเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์อื่นๆทั่วไป เช่น ความขุ่น ของแข็งแขวนลอย

**2.3.3 Alhadidi (2011)** ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมีการนำไปใช้ทั่วโลกมานานหลายทศวรรษ เพื่อตรวจสอบความปนเปื้อนของน้ำที่จะเข้าระบบ Reverse Osmosis และเพื่อเป็นการประเมินศักยภาพในการทำงานของระบบ Microfiltration และ Ultrafiltration ในปัจจุบันดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมีการนำไปใช้โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและแรงดันในระบบการกรองของเมมเบรน นอกจากนี้ SDI ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความสกปรกต่างๆที่มองเห็น เพื่อเป็นการบ่งบอกโอกาสในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดคราบสกปรก ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและแรงดันที่ใช้ในระบบการกรองของเมมเบรนต่อ SDI การเปลี่ยนแปลงของค่า SDI อย่างมีนัยสำคัญ สืบเกิดได้จากการคำนวณผลที่แตกต่างของอุณหภูมิและแรงดันในระบบการกรองของเมมเบรนในน้ำที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน SDI มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเมื่อมีการนำแรงดันมาใช้ในระบบ อุณหภูมิที่สูงมีผลต่อ SDI ดังนั้นจึงไม่แนะนำให้เปรียบเทียบค่าของดัชนี SDI ที่วัดได้จากที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และ SDI จะมีค่าต่ำลงเมื่อเมมเบรนมีความต้านทานสูงหมายถึงเมมเบรนนั้นสามารถกรองสิ่งสกปรกได้ดี เพื่อให้ SDI มีความถูกต้อง และเชื่อถือได้มากขึ้นจึงควรใช้เมมเบรนแบบมาตรฐานมีคุณสมบัติที่คงที่

**2.3.4 Donghoon, Suhan et al. (2012)** ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index) ใช้เป็นดัชนีความสกปรกที่นิยมมากที่สุดสำหรับน้ำป้อนกลับ (Reverse Osmosis, RO) เพื่อใช้เป็นตัวเลือกในการปรับสภาพที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ แต่อย่างไรก็ตามค่า SDI ขาดความบกพร่องถึงการพิจารณาพื้นฐานของเมมเบรน RO เนื่องจากค่า SDI ควรจะมีความไวต่ออนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.45 ไมโครเมตร ขณะที่อนุภาคขนาดเล็ก (ที่สามารถผ่านตัวกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตรได้) และสารอินทรีย์ที่ละลายแล้วจะเป็นตะกอนที่มีผลต่อกระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ การศึกษานี้เริ่มจากเอกสารข้อมูลของค่า SDI ต่างๆที่ถูกเก็บรวบรวม ซึ่งวิเคราะห์ด้วยความขุ่นและคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลาย ผลการศึกษาพบว่าค่า SDI สามารถแสดงถึงปริมาณของอนุภาคและสารอินทรีย์ที่เปราะเปื้อน อีกทั้งสามารถอธิบายได้ว่าค่า SDI จะเพิ่มขึ้นหากมีความขุ่นหรือคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า SDI สามารถวัดศักยภาพของการเปราะเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

**2.3.5 Muddasar Habib (2013)** ปัญหาการอุดตันของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ Reverse Osmosis (RO) เป็นปัญหาที่สำคัญเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเมมเบรน ทำให้ความสามารถในการกรองของเมมเบรนลดลงโดยแหล่งกำเนิดของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำประกอบไปด้วยแบคทีเรีย ซิลิกา อนุภาคดินเหนียว และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อน ในการศึกษาครั้งนี้จะบำบัดสารแขวนลอยที่อุดตันเมมเบรนด้วยวิธีทางเคมี โดยจะใช้สารเคมีที่ช่วยให้อนุภาคสารแขวนลอยละเอียดจับตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นที่สามารถกำจัดได้ง่าย แต่ในทางกลับกันสารเคมีที่ใช้

ในการบำบัดมีคุณสมบัติที่ไม่สามารถทำให้การจับตัวของอนุภาคสารแขวนลอยมารวมตัวกันได้สารเคมีนั้นจะกลายมาเป็นแหล่งกำเนิดของการอุดตันในเมมเบรนได้เช่นกัน

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (Silt Density Index, SDI) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับกระบวนการบำบัดน้ำ RO โดยผ่านเมมเบรนซึ่งผลของการใช้ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำทำนายแนวโน้มการอุดตันของสารแขวนลอย จากความแตกต่างขนาดรูของเมมเบรนพบว่าค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่ได้มีค่าสูงประมาณ 12 ที่มีขนาดรูของเมมเบรนใหญ่ (2,3,5,10  $\mu\text{m}$ ) และค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่มีค่าต่ำสุดจะมีค่าประมาณ 6 โดยจะมีขนาดรูของเมมเบรนใกล้เคียงกับขนาด 0.45 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดเล็ก ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดรู และประเภทของเมมเบรนที่ใช้ในการกรอง

2.3.6 G. Kastla (2017) การกำจัดอินทรีย์วัตถุในธรรมชาติมีความสำคัญอย่างมากในการผลิตและการจัดจำหน่ายน้ำดื่มที่ต้องมีความสอดคล้องต่อสุขภาพและความงาม ผลกระทบของการปรับปรุงคุณภาพมักถูกตรวจสอบโดยใช้ความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำและศักยภาพในการเกิดเป็นสารไตรฮาโลมีเทน กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำของเพอร์ริกและตะกอนสารส้มโดยไม่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโอโซนและเปอร์แมงกาเนตซึ่งเป็นตัวพิจารณาความสามารถในการปรับปรุงวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบที่มาจากแหล่งน้ำดิบที่สกปรกมาก ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการปรับปรุงคุณภาพโดยมีความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ การสลายตัวของคลอรีน และการทดสอบการก่อตัวของไตรฮาโลมีเทนจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ที่สำคัญในทางปฏิบัติ การใช้ความเข้มข้นของอินทรีย์คาร์บอนสูงในการกำจัด (>8.0%) ทำได้ดีในทุกการปรับปรุงคุณภาพ อัตราการสลายตัวของคลอรีนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และผลผลิตของไตรฮาโลมีเทนก่อนการออกซิเดชันใช้โอโซนเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตรและตกตะกอนด้วยเพอร์ริกซัลเฟต 45 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้น้ำคลอรีนมีเสถียรภาพมากที่สุด รองลงมาคือน้ำที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเพอร์ริกซัลเฟต 80 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดสอบการสลายตัวของคลอรีนพบว่าเป็นตัวบ่งชี้ที่มีความตอบสนองมากกว่าอินทรีย์คาร์บอนที่ละลายน้ำ การเพิ่มประสิทธิภาพของปริมาณโอโซนมีแนวโน้มที่จะพบคุณภาพน้ำที่ดีที่สุดและการรวมตัวกันทางเคมีซึ่งไม่น่าจะเกิดได้จากการจับตัวเป็นก้อนเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

#### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต 0.02 N ยี่ห้อ Merck (AR)
2. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 N ยี่ห้อ Colo Erba (AR)
3. สารละลายมาตรฐานปรอทคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ ยี่ห้อ Merck (AR)
4. สารละลายมาตรฐานเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก 0.01 M ยี่ห้อ Merck (AR)
5. สารละลายมาตรฐานเหล็ก 1000 ppm (AR)
6. สารละลายแคลเซียมบัพเฟอร์ ยี่ห้อ Merck (AR)
7. อินดิเคเตอร์ บรอมครีซอลกรีนเมทิลเรด (BGMR Indicator) ยี่ห้อ Merck
8. อินดิเคเตอร์ เมอร์เรกไซด์ (Murexide Indicator) ยี่ห้อ Merck
9. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.  $H_2SO_4$ ) ยี่ห้อ SDFCL sd fine – chem Limited (AR)
10. กรดไนตริก 65% ยี่ห้อ Carlo Erba (AR)
11. กรดไนตริก 1% ยี่ห้อ Carlo Erba (AR)

#### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AA-200
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seven Compact
3. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น Seven Compact
4. เครื่องวัดอุณหภูมิเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
5. อุปกรณ์วิเคราะห์ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (SDI)
6. แผ่นกรองทดสอบดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ (SDI) ขนาด 0.45 ไมครอน
7. ตู้อบความร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF110
8. ตู้ดูดควัน ยี่ห้อ PROLAB รุ่น FH120/2014 SE-PP
9. เครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน ยี่ห้อ Blue line by IKA รุ่น C-MAG HS 7
10. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Pioneer (PA214C)
11. บีกเกอร์พลาสติก ขนาด 500 มิลลิลิตร
12. ขวดเก็บตัวอย่างชนิด PE (Polyethylene) ขนาด 1000 มิลลิลิตร
13. ขวดพลาสติก PET (Polyethylene Terephthalate) ขนาด 600 มิลลิลิตร
14. ตัวกรองเมมเบรน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน
15. หลอดฉีดยา (Syringe)
16. เครื่องแก้วต่างๆ

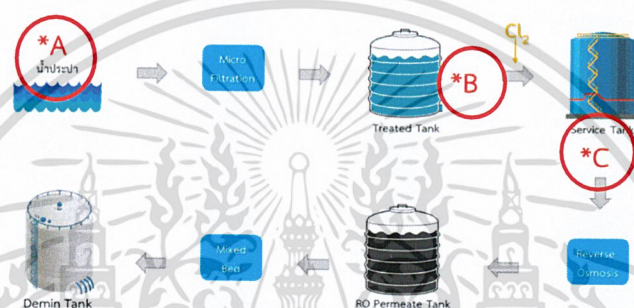
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 จุดเก็บน้ำตัวอย่าง

#### 3.2.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาอินทรีย์วัตถุ

การเก็บน้ำตัวอย่างจะเก็บเมื่อโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 เริ่มทำงาน โดยเก็บใส่ขวดพลาสติกชนิด PET ขนาด 600 มิลลิลิตร เก็บจุดละ 6 ขวด ทั้งหมดจำนวน 3 จุดตามตำแหน่งในแผนภาพ รูปที่ 3.1 และน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ 1 ยี่ห้อ (จุด D) 6 ขวด รวมน้ำตัวอย่างทั้งหมด 4 ชนิด ชนิดละ 6 ขวด โดยจะแบ่งน้ำตัวอย่างแต่ละชนิดออกเป็น 3 ขวดที่เก็บในสถานะที่ไม่มีแสงสว่างและอีก 3 ขวดเก็บในสถานะที่มีแสงสว่าง ทำการเก็บน้ำตัวอย่างเป็นระยะเวลา 7 วัน และนำไปตรวจวัดพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1

จากรูปที่ 3.1 \*A คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์, \*B คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และ \*C คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE)

#### 3.2.1.2 ตัวอย่างที่ใช้ตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาอนินทรีย์วัตถุ

การเก็บน้ำตัวอย่างจะเก็บเมื่อโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 เริ่มทำงาน โดยจะเก็บใส่ขวดเก็บตัวอย่างชนิด PE ขนาด 1000 มิลลิลิตร เก็บจุดละ 1 ขวด ทั้งหมดจำนวน 3 จุดตามตำแหน่งในแผนภาพรูปที่ 3.1 โดยทุกจุดเก็บวันละ 1 ครั้ง เป็นระยะเวลา 7 วัน และนำไปตรวจวัดพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดอินทรีย์วัตถุ และอนินทรีย์วัตถุในน้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
<b>1. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดอินทรีย์วัตถุในน้ำตัวอย่าง</b>	
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH)	Electrometric Measurement
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	Instrumental Measurements
<b>2. พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดอนินทรีย์วัตถุในน้ำตัวอย่าง</b>	
อุณหภูมิ (Temperature)	Thermometer
ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	Instrumental Measurements
สภาพด่าง (Alkalinity)	Titration Method
ความกระด้าง (Calcium Hardness)	EDTA Titrimetric Method
ปริมาณเหล็กในน้ำและบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI	Spectrophotometric Method

ที่มา : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999

### 3.2.2 การวิเคราะห์ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

#### 3.2.2.1 วิธีการตรวจวัดค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

- 1) ต่อสายยางเข้ากับจุดที่ต้องการเก็บน้ำ และเปิดน้ำทิ้งเล็กน้อย
- 2) ปิดน้ำ วางกระดาด مخروطลงบนที่รองกระดาดทรงด้านล่างแล้ววางทับด้วย O-ring กันรั่ว
- 3) นำที่รองกระดาดทรงด้านล่างประกบกับด้านบนที่ต่ออยู่กับสายยางแล้วล็อกด้วยน็อต 3 ตัว
- 4) เปิดน้ำ ปรับแรงดันน้ำให้เท่ากับ 2 บาร์
- 5) เริ่มจับเวลาเมื่อเปิดน้ำลงในบีกเกอร์ และบันทึกค่าเมื่อระดับน้ำถึง 500 mL  $\rightarrow T_0$
- 6) ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 5 เมื่อครบ 5, 10, 15 นาที และบันทึกเป็นค่า  $T_5, T_{10}, T_{15}$  ตามลำดับ
- 7) ปิดน้ำ หมุนน็อตออกจากที่รองกระดาดทรง เก็บกระดาดทรงเพื่อนำไปเป็นผลการทดลอง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ



รูปที่ 3.3 วิธีการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ โดยการจับเวลาเมื่อเปิดน้ำลงในบีกเกอร์พลาสติกจนถึงระดับ 500 มิลลิลิตร ที่ช่วงเวลาต่างๆ คือ 0, 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ และนำเวลาที่บันทึกไปคำนวณค่า SDI ได้ตามสูตรการคำนวณสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2.2 การคำนวณค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ จากสมการที่ 3.1

$$SDI = \frac{1 - (T_0 \div T_{15})}{15} \times 100 \quad (3.1)$$

SDI คือ ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

$T_0$  คือ นาฬิกาที่ 0 ที่เติมน้ำลงในปิเกตอร์จนกระทั่งน้ำไหลครบ 500 มิลลิลิตร (เวลาเริ่มต้น, วินาที)

$T_{15}$  คือ นาฬิกาที่ 15 ที่เติมน้ำลงในปิเกตอร์จนกระทั่งน้ำไหลครบ 500 มิลลิลิตร (เวลาสุดท้าย, วินาที)

15 คือ นาทีสุดท้ายที่ใช้ในการทดลอง

### 3.2.3 การตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณสารอนินทรีย์

#### 3.2.3.1 สภาพด่าง (Alkalinity)

1) การเตรียมอินดิเคเตอร์ บรอมครีซอลกรีนเมทิลเรด (BGMR Indicator) ละลาย Bromocresol green 0.100 กรัม และ Methyl red sodium salt 0.020 กรัม ในน้ำกลั่น 100 mL

2) การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) 0.1 N ปีเปต conc.  $H_2SO_4$  3 mL ลงในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1000 mL

3) การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) 0.02 N ตวงสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.1 N 200 mL แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1000 mL (หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก 0.02 N โดยการทำให้ Standardize กับสารละลายมาตรฐาน  $Na_2CO_3$  0.02 N ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ค ในหัวข้อ ค-1)

4) ตวงน้ำตัวอย่าง 50 mL ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 150 mL และหยด BGMR Indicator ลงในน้ำตัวอย่าง 2-3 หยด นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน ( $H_2SO_4$ ) 0.02 N จนกระทั่งสีของน้ำตัวอย่างเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีชมพูอ่อน บันทึกปริมาตรของ  $H_2SO_4$  ที่ใช้ในการไทเทรต และคำนวณค่าสภาพด่าง ในหน่วย mg/L as  $CaCO_3$  (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ค ในหัวข้อ ค-2)

#### 3.2.3.2 ความกระด้าง (Calcium Hardness)

1) การเตรียมสารละลาย Calcium Buffer ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1000 mL

2) การเตรียมอินดิเคเตอร์ เมอร์เรกไซด์ (Murexide Indicator) ชั่งเมอร์เรกไซด์ 0.23 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 30 mL

3) การเตรียมสารละลายมาตรฐานเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA) 0.01 M ชั่ง EDTA disodium salt 3.723 กรัม ละลายในน้ำกลั่นเล็กน้อย แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 1000 mL (หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก 0.01 M โดยการทำให้ Standardize กับสารละลายมาตรฐานแคลเซียมที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ค ในหัวข้อ ค-3)

4) ตวงตัวอย่างน้ำ 50 mL ใส่ Erlenmeyer flask ขนาด 150 mL แล้วเติม Calcium Buffer 5 mL และ Murexide Indicator 3-4 หยด จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเอทิลีนได

เอมีนเตตระอะซิติกที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (EDTA) 0.01 M จนกระทั่งสีของน้ำตัวอย่างเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีม่วง บันทึกปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต และคำนวณเป็นความเข้มข้นจะได้ความเข้มข้นในหน่วย mg/L as CaCO<sub>3</sub> (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ค ในหัวข้อ ค-4)

### 3.2.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI แล้ว

เตรียมตัวอย่างโดยการย่อยกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI ด้วย 65% HNO<sub>3</sub> 4 mL และ conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3 mL ในบีกเกอร์ขนาด 50 mL แล้วนำไปต้มในตู้ดูดควันจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี หรือสีเหลืองอ่อน (ถ้าสารละลายเหลือน้อยมากต้องเติม 65% HNO<sub>3</sub> และ conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ครึ่งหนึ่งของปริมาณที่เติมในครั้งแรก) และกรองสารละลายที่ได้ผ่านตัวกรองเมมเบรน (Membrane Filter) ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL แล้วปรับปริมาตรด้วย 1% HNO<sub>3</sub> และนำไปตรวจวัดปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 248.33 นาโนเมตร หน่วยที่ตรวจวัดได้เป็น ppm หรือ mg/L

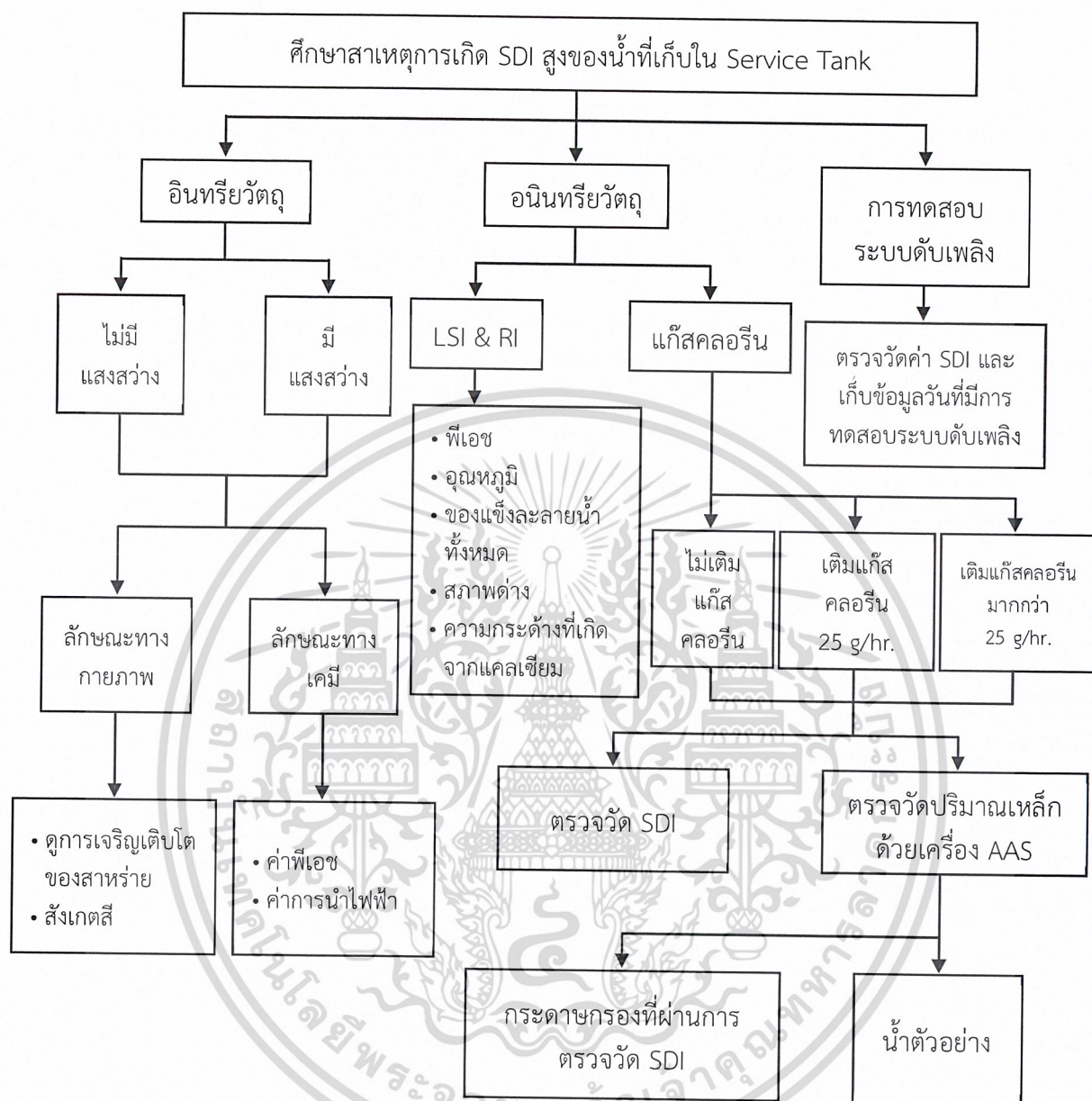
### 3.2.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง

เตรียมตัวอย่างโดยการย่อยน้ำตัวอย่าง 25 mL ในบีกเกอร์ขนาด 150 mL และเติม 65% HNO<sub>3</sub> 4 mL และ conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3 mL จากนั้นต้มในตู้ดูดควันจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสีหรือสีเหลืองอ่อน ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจึงนำไปใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL และปรับปริมาตรด้วย 1% HNO<sub>3</sub> จากนั้นนำไปตรวจวัดปริมาณเหล็กด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 248.33 นาโนเมตร หน่วยที่ตรวจวัดได้เป็น ppm หรือ mg/L

### 3.2.3.5 การประกันคุณภาพในการวิเคราะห์

- 1) ใช้วิธีวิเคราะห์ตาม Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1999
- 2) กรณีที่มีการใช้กราฟมาตรฐาน  $R^2 = 0.9970$
- 3) ตรวจสอบค่านัยสำคัญทางสถิติด้วยวิธี One way Anova และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

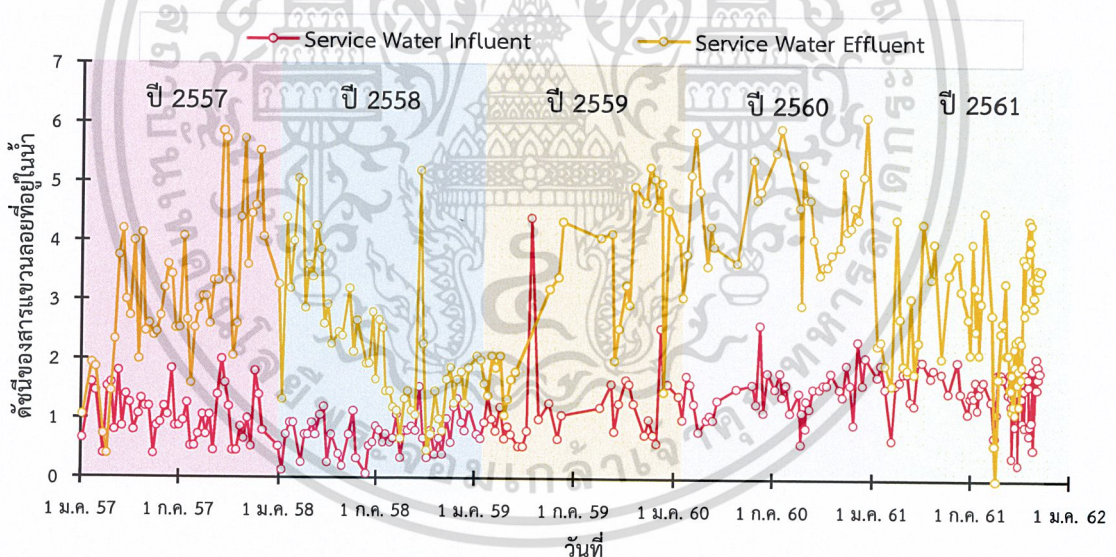
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

# ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 4.1 การเก็บน้ำตัวอย่าง

จากการตรวจวัด SDI พบว่าน้ำที่เก็บใน Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 มีค่า SDI ค่อนข้างสูงดังรูปที่ 4.1 ส่งผลให้น้ำที่เก็บใน Service Tank มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนของระบบรีเวอร์สออสโมซิสตามที่บริษัทผู้จำหน่ายเมมเบรนกำหนด ผู้วิจัยจึงเลือกเก็บน้ำตัวอย่าง 3 จุดคือ จุด A, B และ C (ดังรูปที่ 3.1) เนื่องจากค่า SDI ของน้ำที่เก็บใน Service Tank มีค่าสูง ผู้วิจัยจึงต้องทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่จุดดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างน้ำที่ไหลเข้าและน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด B และ C) และใช้ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำประปาเป็นตัวอ้างอิงทั้งนี้เป็นการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาอินทรีย์วัตถุ แต่การตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาอินทรีย์วัตถุจะเก็บน้ำตัวอย่างเพิ่ม 1 จุดคือ น้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ 1 ยี่ห้อ (จุด D) เพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ทั้งทางกายภาพและทางเคมี โดยผู้วิจัยทำการเก็บน้ำตัวอย่างแบบสุ่ม (Grab Sampling)



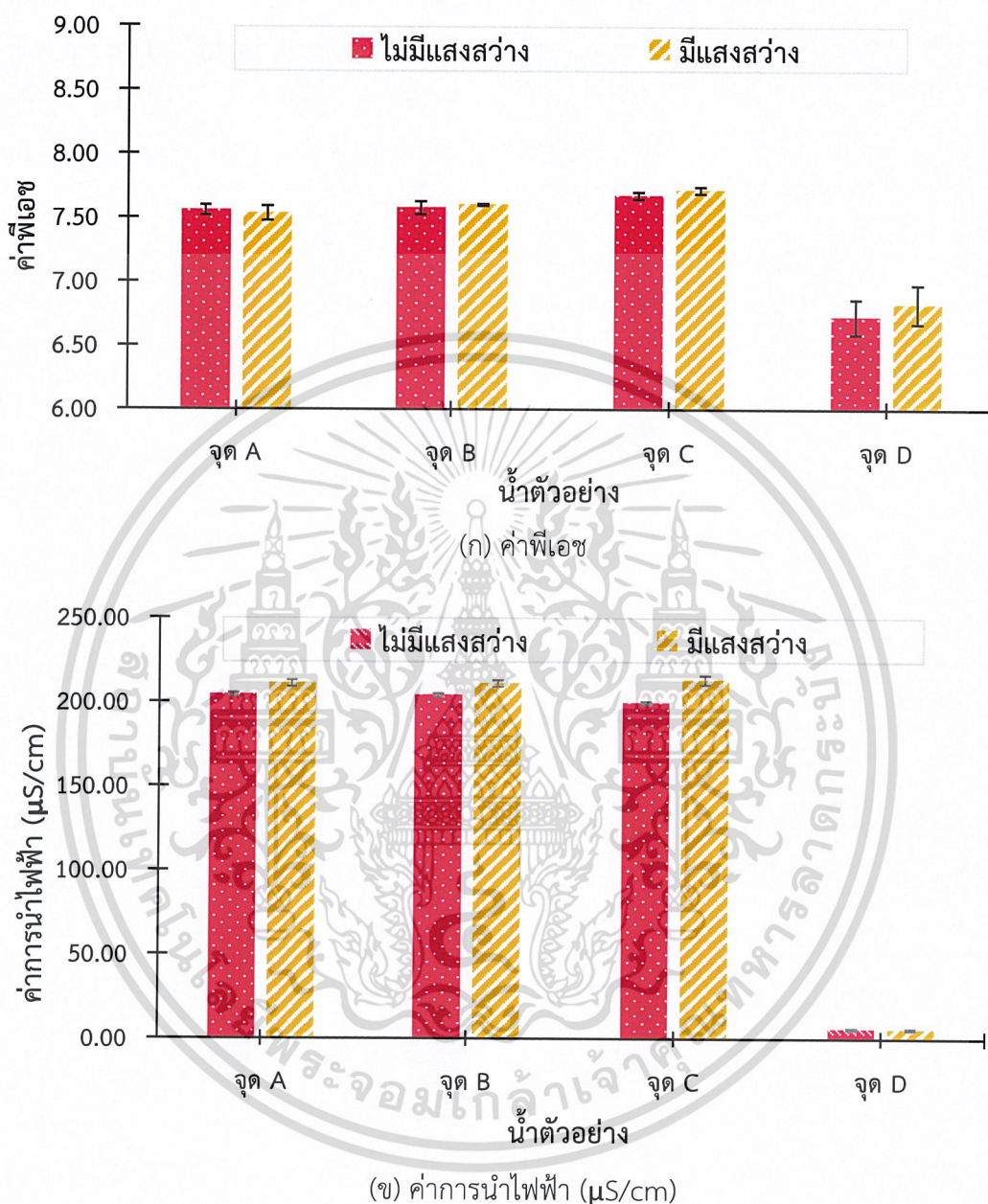
รูปที่ 4.1 ข้อมูลค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2557-2561 (ข้อมูลแสดงดังตารางที่ ข-1 ถึง ข-5)

### 4.2 สาเหตุของการเกิดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูง

#### 4.2.1 สารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุ

จากการศึกษาพารามิเตอร์ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ ค่า SDI ที่สูงอาจเกิดจากอนุภาคของอินทรีย์วัตถุ เช่น สาหร่าย สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ฯลฯ ที่อาจไปอุดตันบนกระดาษกรอง เนื่องจากในน้ำอาจมีอินทรีย์วัตถุที่สามารถนำสารประกอบหรือไอออนที่ละลายน้ำไปใช้ในการเจริญเติบโต จึงอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ ดังนั้นในขณะทำการตรวจวัดค่า SDI อาจส่งผลให้ค่า SDI สูงขึ้น โดยผู้วิจัยทำการจำลองสภาวะระหว่างการทำการทดลองเป็นสภาวะที่

ไม่มีแสงสว่าง (ระบบปิด) เปรียบเทียบกับสถานะที่มีแสงสว่าง (ระบบเปิด) ซึ่งสถานะที่ไม่มีแสงสว่างเปรียบเสมือนสถานะจริงของน้ำที่เก็บใน Service Tank



รูปที่ 4.2 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่าง (n = 7)

รูปที่ 4.2 (ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ข-6 ถึง ข-7) จากการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาอินทรีย์วัตถุทั้งทางกายภาพและทางเคมีของน้ำตัวอย่าง 4 ชนิด ได้แก่ น้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B), น้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) และน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ (จุด D) ที่เก็บในสถานะไม่มีแสงสว่างและสถานะที่มีแสงสว่าง ผู้วิจัยพบว่าลักษณะทางเคมีที่ได้ทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องตามตารางที่ 3.1 ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดทั้งสองสถานะมีค่าคงที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้น และลักษณะทางกายภาพคือ ไม่พบการเจริญเติบโตของสารแขวนลอยที่เป็นอินทรีย์วัตถุ (จำพวก

สำหรับ) เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า แต่สีของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ที่เก็บในสถานะที่มีแสงสว่างมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้นหรือเปลี่ยนแปลงไปจากสีของน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์คือ มีสีเหลืองเข้มขึ้น (ดังรูปที่ 4.3) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแร่ธาตุหรือสิ่งเจือปนที่คาดว่าจะเป็ไอออนของเหล็กที่สะสมอยู่ในน้ำ เนื่องจากเฟอร์ริก (III) ไอออนเมื่อสะสมอยู่ในน้ำเกิดการตกตะกอนแสงและให้สีของสารละลายเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำตาล (Gladwyn Joan, n.d.) และจากผลการทดลองดังกล่าวผู้วิจัยพบว่าสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำตัวอย่างไม่ใช่อนุภาคของอินทรีย์วัตถุ ดังนั้นอนุภาคของอินทรีย์วัตถุจึงไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า SDI สูงขึ้น แต่อาจมีไอออนของเหล็กที่สะสมอยู่ในน้ำ ผู้วิจัยจึงต้องทำการวิเคราะห์ไอออนของเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในน้ำตัวอย่าง



รูปที่ 4.3 สีของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ที่เก็บในสถานะที่มีแสงสว่าง

#### 4.2.2 สารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุ

จากการตรวจวัด SDI พบว่ากระดาศกรองที่ผ่านการตรวจวัดค่า SDI แล้วมีคราบสีเหลืองเกิดขึ้นส่งผลทำให้อัตราการไหลของน้ำระหว่างการตรวจวัด SDI ช้าลง และเมื่อนำช่วงเวลาของน้ำที่ไหลผ่านกระดาศกรองจนกระทั่งได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ณ นาทีที่ 15 มาใช้ในคำนวณทำให้ค่า SDI มีค่าสูง (3.0-5.0) โดยคราบสีเหลืองบนกระดาศกรองอาจเกิดจากสารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุ ผู้วิจัยจึงทำการทดลองวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำตัวอย่างเพื่อหาสาเหตุของการเกิดคราบสีเหลืองบนกระดาศกรอง ในการทดลองผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลและทำการทดลองวิเคราะห์ผลของดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์ และปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำตัวอย่าง เนื่องจากดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำตัวอย่างซึ่งเกี่ยวข้องกับการอิมตัวในรูปของหินปูนโดยพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลองคือ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด สภาพต่าง และความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม ถ้าน้ำตัวอย่างมีการอิมตัวในรูปของหินปูนสูงแสดงว่าน้ำตัวอย่างสามารถเกิดการตกตะกอนด้วยหินปูนซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบสีเหลือง และถ้าน้ำตัวอย่างไม่มีการอิมตัวในรูปของหินปูนแสดงว่าน้ำตัวอย่างอาจมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะ เมื่อน้ำ

ตัวอย่างที่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะเก็บอยู่ใน Service Tank ที่วัสดุของถังมีส่วนประกอบของเหล็ก และมีการเติมแก๊สคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำตัวอย่าง ซึ่งแก๊สคลอรีนสามารถเร่งกระบวนการกัดกร่อนโลหะให้เกิดเร็วขึ้น เนื่องจากแก๊สคลอรีนเมื่อละลายน้ำทำให้เกิดการแตกตัวได้ไฮโปคลอไรต์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็กที่อยู่ในน้ำได้ และไอออนของเหล็กที่เกิดปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรต์สามารถเกิดการตกตะกอนได้เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดคราบสีเหลืองจึงต้องวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดโดยผลการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 4.3-4.5

#### 4.2.3 การทดสอบระบบดับเพลิง (Exercise Fire Pump)

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การป้องกันและระงับอัคคีภัยในโรงงาน พ.ศ. 2552 โรงไฟฟ้าพระนครเหนือต้องทำการทดสอบ บำรุงรักษาระบบและอุปกรณ์ป้องกันและระงับอัคคีภัยให้สามารถพร้อมทำงานได้ตลอดเวลา ซึ่งการทดสอบระบบดับเพลิงของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 มีการนำน้ำจาก Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์มาใช้ในการทดสอบ ทำให้ตะกอนที่นอนอยู่ก้นถังเกิดการฟุ้งกระจาย เมื่อทำการตรวจวัด SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิงพบว่าสีของกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI หลังการทดสอบระบบดับเพลิงมีสีเหลืองเข้มขึ้นกว่าสีของกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI ในช่วงก่อนการทดสอบระบบดับเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการทดลองผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองโดยการตรวจวัดค่า SDI ก่อนและหลังการทดสอบระบบดับเพลิงซึ่งส่วนใหญ่การทดสอบระบบดับเพลิงทำทุกวันเสาร์ ผู้วิจัยจึงตรวจวัดค่า SDI ทุกวันศุกร์ของสัปดาห์ก่อนหน้า และทุกวันจันทร์ของสัปดาห์ถัดไปหนึ่งครั้งต่อวัน บริเวณจุดที่น้ำไหลเข้า Service Tank (จุด B) และจุดที่น้ำไหลออกจาก Service Tank (จุด C) เนื่องจากในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 มีช่วงเวลาในการทำงานที่ไม่แน่นอนโดยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในถังเก็บน้ำของระบบ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจวัด SDI ในแต่ละจุดตรวจวัดได้มากกว่า 1 ครั้งต่อวัน



(ก)



(ข)

#### รูปที่ 4.4 สีของกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI

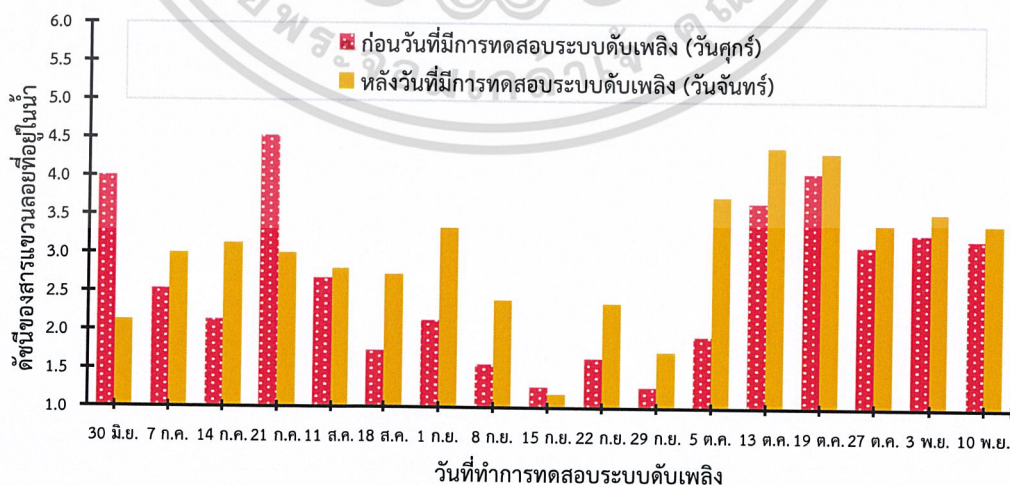
(ก) กระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI หลังการทดสอบระบบดับเพลิง และ

(ข) กระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI ช่วงที่ไม่มีการทดสอบระบบดับเพลิง

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลและตรวจวัด SDI ก่อนและหลังการทำการทดสอบระบบดับเพลิง และนำมาแสดงดังรูปที่ 4.5 สามารถอธิบายผลจากกราฟได้ 2 กรณี คือ ในกรณีที่ค่า SDI ก่อนทดสอบระบบดับเพลิงมีค่ามากกว่าค่า SDI หลังการทดสอบระบบดับเพลิง เนื่องจากในการทดสอบระบบดับเพลิงมีการใช้น้ำจาก Service Tank ในปริมาณมาก ซึ่งตะกอนหรือสารแขวนลอยที่นอนอยู่ก้นถัง

อาจไหลตามน้ำออกมาในระหว่างตึงน้ำไปทำการทดสอบทำให้สารแขวนลอยที่อยู่ในถังมีปริมาณน้อยลง เมื่อทำการตรวจวัด SDI จึงทำให้ค่า SDI หลังการทดสอบระบบดับเพลิงน้อยลงเช่นกัน

อีกหนึ่งกรณีคือ ค่า SDI ก่อนการทดสอบระบบดับเพลิงมีค่าน้อยกว่าหลังการทดสอบระบบดับเพลิง เนื่องจากสารแขวนลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่า SDI ก่อนน้อยกว่าหลังการทดสอบซึ่งในการทดสอบระบบดับเพลิงสามารถทำให้น้ำที่อยู่ใน Service Tank เกิดการปั่นกววน เมื่อมีการปั่นกววนทำให้อากาศที่อยู่ภายในถังละลายในน้ำมากขึ้นส่งผลให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำมีค่าสูงขึ้น และวัสดุของ Service Tank มีเหล็กเป็นส่วนประกอบทำให้เกิดไอออนของเหล็กละลายอยู่ในน้ำ เมื่อมีไอออนของเหล็กและการละลายของออกซิเจนเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนได้ตั้งรูปที่ 2.7 pE- pH ของเหล็กที่มีคาร์บอนละลายอยู่ในน้ำรวมกับไฮดรอกไซด์และออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (Zachara John M. and Kukkadapu Ravi K., 2017) ถ้าน้ำที่เก็บอยู่ใน Service Tank มีความกระด้างสามารถเกิดการตกตะกอนได้เช่นกัน ซึ่งในการตรวจวัดค่าพีเอชของน้ำที่เก็บอยู่ใน Service Tank เครื่อง pH meter สามารถเทียบค่าที่วัดได้ให้อยู่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จึงสามารถใช้รูปที่ 2.7 ในการทำนายรูปของการเกิดตะกอนได้ และค่า SDI ก่อนมีค่าน้อยกว่าหลังการทดสอบระบบดับเพลิงยังสามารถเกิดจากการถ่ายน้ำจาก Service Tank ของโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 2 ซึ่งน้ำต้นทางคือ แม่น้ำเจ้าพระยามาผสมรวมกับน้ำใน Service Tank ของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 ซึ่งน้ำต้นทางคือ น้ำประปา เมื่อน้ำในถังมีปริมาณไม่เพียงพอ ซึ่งจากรูปที่ 4.5 มีการถ่ายน้ำ Service Tank ในวันที่ 14 กรกฎาคม, 13 ตุลาคม และ 27 ตุลาคม 2561 โดยน้ำต้นทางของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือทั้งสองชุดมีคุณภาพน้ำแตกต่างกัน จึงเป็นผลทำให้สารแขวนลอยมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อมีการตรวจวัดค่า SDI ทำให้ค่า SDI หลังการทดสอบระบบดับเพลิงมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งข้อมูลค่า SDI และวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง (แสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-16) จากกรณีทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นสรุปว่าการทดสอบระบบดับเพลิงมีผลทำให้ค่า SDI สูงขึ้นและลดลงได้ และเมื่อมีการเติมแก๊สคลอรีนในวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิงยิ่งส่งผลให้ค่า SDI สูงขึ้นเมื่อเทียบกับวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิงแต่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีน



รูปที่ 4.5 ค่า SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับถาดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
หมายเหตุ วันที่ 14 กรกฎาคม, 13 ตุลาคม และ 27 ตุลาคม 2561 คือ วันที่มีการนำน้ำเซอร์วิสจาก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รือยังขาดมิให้คิดค่าเงินชดเชยหรือเงินชดเชยต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
โรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 2 มาใช้งาน

### 4.3 ดัชนีแลงเกลียร์ (Langlier Saturation Index, LSI) และดัชนีไรนาร์ (Ryznar Index, RI)

จากการศึกษาดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์ซึ่งเป็นการพิจารณาคุณสมบัติของน้ำที่สามารถเกิดการอิมตัวและเกิดการตกตะกอนในรูปของหินปูนอาจเป็นสาเหตุให้กระดาดากรองเกิดคราบสีเหลืองเมื่อทำการตรวจวัด SDI ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจากการอิมตัวในรูปของหินปูนของน้ำเป็นสารแขวนลอยประเภทอนินทรีย์วัตถุ โดยผู้วิจัยทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ และของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมดซึ่งเป็นพารามิเตอร์เบื้องต้นที่สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องวัดพีเอชกับเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า และทำการไทเทรตหาค่าสภาพต่างและความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม โดยน้ำตัวอย่างที่ทำการทดลองคือ น้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ในการทำการทดลองผู้วิจัยทำการทดลองเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปผลได้เมื่อผู้วิจัยหาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจนครบถ้วนและนำค่าพารามิเตอร์แทนในสูตรการคำนวณค่าดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์ จากการแทนค่าพารามิเตอร์ในสูตรการคำนวณสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีไรนาร์ของน้ำตัวอย่าง

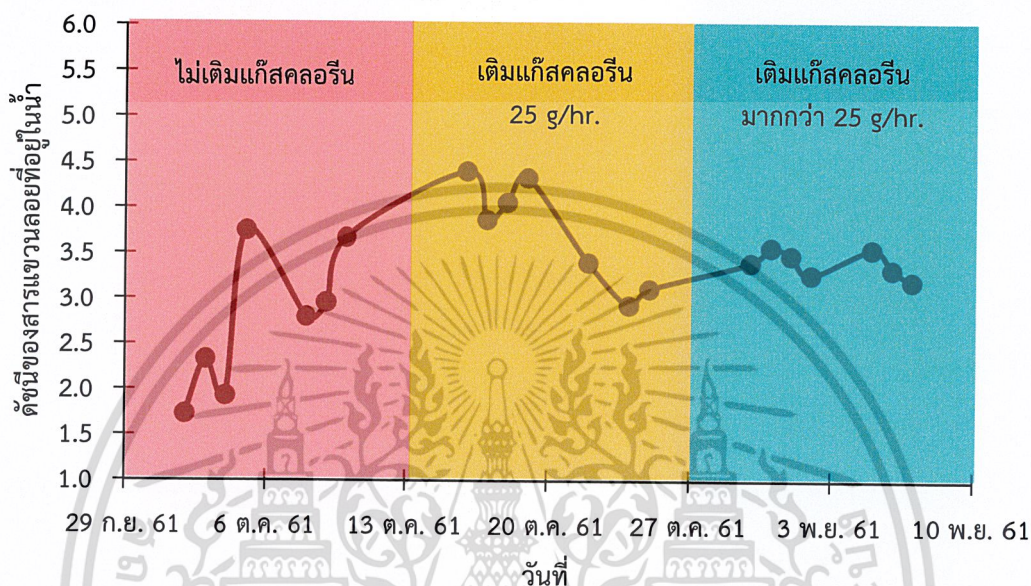
วันที่	LSI			RI		
	จุด A	จุด B	จุด C	จุด A	จุด B	จุด C
1	-0.60	-0.58	-0.47	8.77	8.77	8.69
2	-0.62	-0.40	-0.26	8.79	8.57	8.45
3	-0.59	-0.33	-0.31	8.71	8.50	8.55
4	-0.69	-0.50	-0.35	8.89	8.73	8.57
5	-0.70	-0.53	-0.36	8.90	8.66	8.56
6	-0.83	-0.62	-0.38	8.99	8.78	8.53
7	-0.93	-0.68	-0.41	9.13	8.85	8.63

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าดัชนีแลงเกลียร์ของน้ำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าเป็นลบ แสดงว่าไม่เกิดการตกตะกอนได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากไม่มีการอิมตัวในรูปของหินปูน แต่สามารถเกิดการกัดกร่อนโลหะได้ จากการพิจารณาค่าที่ได้ของน้ำตัวอย่างแต่ละจุดพบว่าที่จุด A มีค่าติดลบมากที่สุดแสดงว่าสามารถเกิดการกัดกร่อนโลหะได้มากกว่าจุด B และจุด C ส่วนจุด B มีค่าติดลบรองลงมาแสดงว่าสามารถเกิดการกัดกร่อนโลหะได้มากกว่าจุด C ซึ่งสามารถเกิดการกัดกร่อนโลหะได้น้อยที่สุด และค่าดัชนีไรนาร์ของน้ำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่ามากกว่า 7 แสดงว่ามีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะ ซึ่งพิจารณาจากค่าที่แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าน้ำที่จุด A มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะมากกว่าจุด B และจุด B มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะมากกว่าจุด C (ข้อมูลผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-8 ถึง ข-10) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าน้ำตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะ ผู้วิจัยจึงเลือกพิจารณาปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในน้ำเป็นลำดับถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 อัตราการเติมแก๊สคลอรีน (Feed Chlorine, $\text{FCl}_2$ )

จากการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SDI กับอัตราการเติมแก๊สคลอรีนของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) โดยกำหนดอัตราการเติมแก๊สคลอรีนเป็น 3 อัตรา ได้แก่ ช่วงที่มีการเติมแก๊สคลอรีนในอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง เป็นเวลา 7 วันต่ออัตราการเติมแก๊สคลอรีน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่า SDI กรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr.

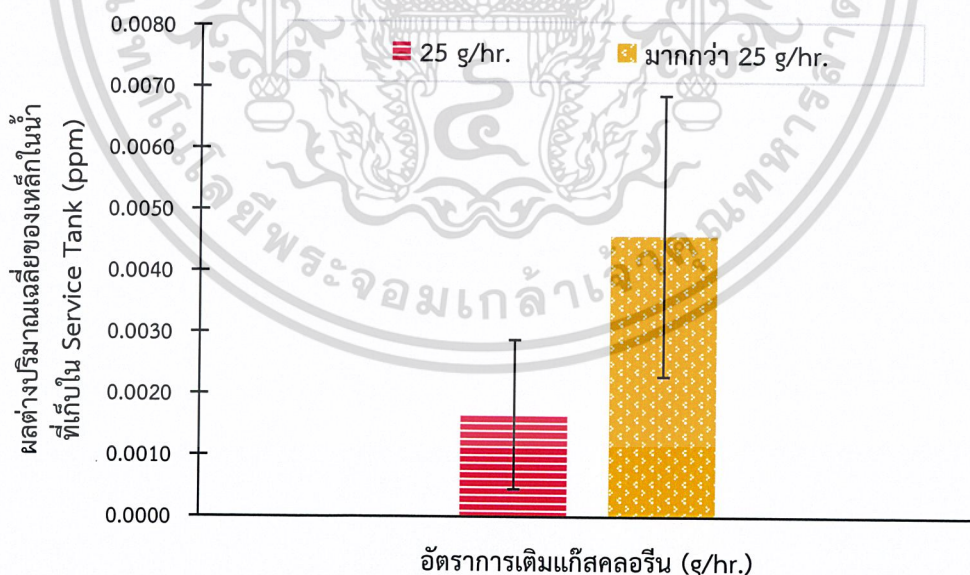
จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าผลของการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 25 และมากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง ทำให้ค่า SDI ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าช่วงที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีน เมื่อทำการเปรียบเทียบทางสถิติโดยใช้ One way Anova ในการทดสอบ และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey ปรากฏว่าค่า SDI ช่วงที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0 และ 25 กรัมต่อชั่วโมงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ดังรายละเอียดภาคผนวก ง-1) ดังนั้นการเติมแก๊สคลอรีนที่อัตรา 25 กรัมต่อชั่วโมง มีผลทำให้ค่า SDI สูง แต่ในการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตราที่มากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมงมีข้อจำกัดเรื่องของค่าคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ ถ้าคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำมีค่ามากกว่า 1 mg/L ระบบการเติมแก๊สคลอรีนจะหยุดทำงานทันทีและสามารถกลับมาเติมแก๊สคลอรีนได้อีกครั้งเมื่อคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่มีค่าน้อยกว่า 0.3 mg/L และยังพบว่าค่า SDI ในแต่ละอัตราการเติมแก๊สคลอรีนมีค่าค่อนข้างแปรปรวน เนื่องจากในแต่ละวันมีการผลิตน้ำบริสุทธิ์ในปริมาณที่ไม่เท่ากันจึงทำให้มีการใช้ปริมาณของน้ำต้นทางไม่เท่ากัน ซึ่งคุณภาพน้ำของน้ำต้นทางในแต่ละวันมีความแตกต่างกันส่งผลทำให้ค่า SDI ที่ตรวจวัดได้มีค่าค่อนข้างแปรปรวน แต่ค่า SDI ยังคงเพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมแก๊สคลอรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ (Total Iron, TFe)

จากการศึกษาวัสดุของ Service Tank การเติมแก๊สคลอรีน ดัชนีแลงเกลียร์ และดัชนีโรนาร์ ผู้วิจัยจึงพิจารณากระบวนการกัดกร่อนและทำการทดลองวิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ เนื่องจากวัสดุของ Service Tank มีส่วนประกอบของเหล็กสามารถเกิดการกัดกร่อนทำให้เกิดไอออนของเหล็กซึ่งเป็นสารแขวนลอยประเภทอนินทรีย์วัตถุในน้ำ และเมื่อทำการตรวจวัด SDI ทำให้กระดาศกรงเกิดคราบสีเหลืองและอัตราการไหลของน้ำลดลงเป็นผลทำให้ SDI มีค่าสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองเติมแก๊สคลอรีนในอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง เพื่อใช้ในการพิจารณาปริมาณไอออนของเหล็กที่เพิ่มขึ้นตามอัตราการเติมแก๊สคลอรีน โดยเก็บกระดาศกรงที่ผ่านการตรวจวัด SDI ทั้งหมด 2 จุด คือ จุดที่น้ำไหลเข้า Service Tank (จุด B) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) และเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 3 ชนิด คือ น้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) เป็นเวลา 7 วันต่ออัตราการเติมแก๊สคลอรีน และทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์โดยการย่อยน้ำตัวอย่างและกระดาศกรงที่ผ่านการตรวจวัด SDI และนำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อยมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

จากผลการทดลองปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่ผ่านการคำนวณผลเรียบร้อยแล้วมาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ ตัวอย่างและกระดาศกรงที่ผ่านการตรวจวัด SDI กับอัตราการเติมแก๊สคลอรีนเป็นเวลาอัตราละ 7 วัน โดยกราฟมีทั้งหมด 2 กราฟ คือ แผนภูมิปริมาณเหล็กที่ได้จากการย่อยน้ำตัวอย่างและกระดาศกรงที่ผ่านการตรวจวัด SDI ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

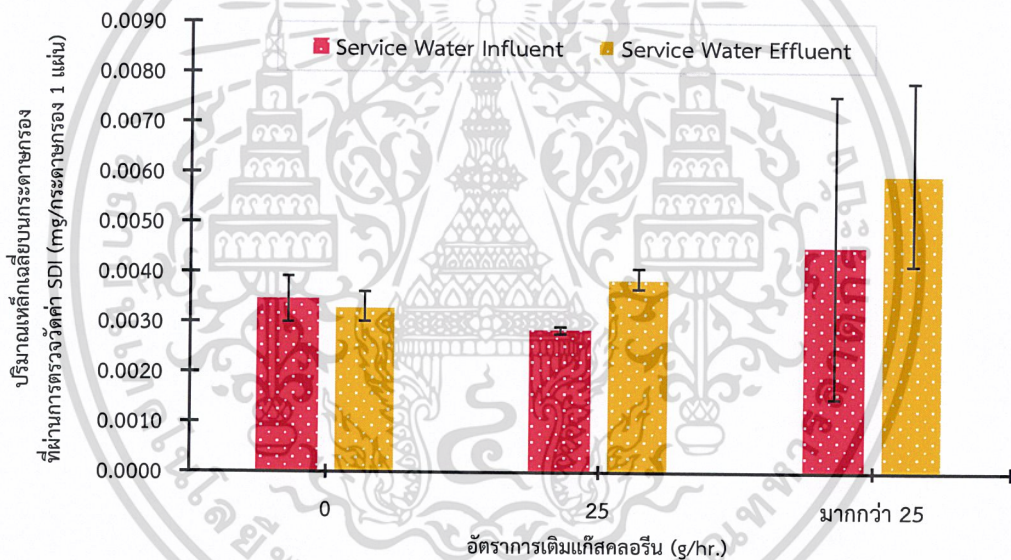


รูปที่ 4.7 ผลต่างปริมาณเฉลี่ยของเหล็กในน้ำระหว่างน้ำที่ไหลเข้าและน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (n=7) หมายถึง เนื่องจากปริมาณเหล็กของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจาก Service Tank

ในกรณีที่ไม่มีแก๊สคลอรีนมีปริมาณน้อยกว่าช่วงความเข้มข้นของเหล็กที่เครื่อง AAS สามารถตรวจวัดได้ จึงไม่สามารถนำมาแสดงค่าในรูปกราฟได้

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 (ข้อมูลดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-13) ปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำที่เก็บใน Service Tank ในอัตราการเติมแก๊สคลอรีน 25 กรัมต่อชั่วโมง มีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีน และนำผลการทดลองทั้ง 2 อัตรา มาทดสอบด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้ One way Anova และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Turkey (ดังรายละเอียดในภาคผนวก ง-2) แสดงให้เห็นว่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำที่อัตราการเติมแก๊สคลอรีน 0 และ 25 กรัมต่อชั่วโมง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีตั้งสมการที่ 2.30-2.32 (ธีรวิทย์, ยิ่งเจริญ และสรพจน์. 2548.) เชื่อว่าเกิดปฏิกิริยาของไอออนของเหล็กได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $Fe_2O_3$  เป็นตะกอนฟุ้งในน้ำที่เก็บใน Service Tank และจากผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Error Bar) ค่อนข้างกว้างเนื่องจากผลการตรวจวัดด้วยเครื่อง AAS มีปริมาณไอออนของเหล็กน้อยกว่าช่วงความเข้มข้นของเหล็กที่เครื่อง AAS สามารถตรวจวัดได้ และในอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่มากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้ได้ เนื่องจากระบบการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.4 ทำให้อัตราการเติมแก๊สคลอรีนไม่เป็นไปตามเงื่อนไข



รูปที่ 4.8 ปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI (n=7)

จากรูปที่ 4.8 (ข้อมูลดังตารางที่ ข-14) ปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัดค่า SDI ของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจาก Service Tank ในกรณีที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีน ไม่มีความแตกต่างกัน และผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้ One way Anova และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Turkey พบว่าปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองของน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจาก Service Tank ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และในอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 25 กรัมต่อชั่วโมง ปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองที่ของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank มีค่ามากกว่าน้ำที่ไหลเข้า Service Tank ซึ่งผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธีเช่นเดียวกัน พบว่าปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาษกรองของน้ำทั้งสองน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งรายละเอียดของผลการทดสอบทางสถิติของอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 และ 25 กรัมต่อชั่วโมง แสดงดังภาคผนวก ง-3 และ ง-4 ตามลำดับ และผลการทดลองของอัตราการ

เติมแก๊สคลอรีนมากกว่า 25 กรัมต่อชั่วโมง ไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากผลของระบบการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งอัตราการเติมแก๊สคลอรีนตลอดช่วงเวลาการทดลองไม่เป็นไปตามเงื่อนไข และส่งผลให้ช่วงความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Error Bar) ค่อนข้างกว้าง และจากผลการทดลองผลต่างปริมาณเฉลี่ยของเหล็กบนกระดาศกรองระหว่างน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจาก Service Tank ที่อัตราการเติมแก๊สคลอรีน 0 และ 25 กรัมต่อชั่วโมง (ข้อมูลดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-15) มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธีเช่นเดียวกัน พบว่าปริมาณเหล็กเฉลี่ยบนกระดาศกรองของน้ำทั้งสองอัตรามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 95% ดังภาคผนวก ง-5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของอินทรีย์วัตถุในน้ำตัวอย่าง 4 ชนิด ที่เก็บในสถานะไม่มีแสงสว่างกับสถานะที่มีแสงสว่าง พบว่าลักษณะทางกายภาพคือ สีของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ในสถานะที่มีแสงสว่างมีสีเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้นซึ่งสีที่พบคือสีเหลืองที่เกิดจากดุกกลืนแสงของเฟอร์รัส (II) ไอออน ลักษณะทางเคมี พบว่าค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ที่เก็บในสถานะไม่มีแสงสว่างและสถานะที่มีแสงสว่างมีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้นหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่เป็นตัวอ้างอิง ซึ่งทำให้อินทรีย์วัตถุไม่ส่งผลให้ค่า SDI สูงขึ้นและมีไอออนของเหล็กละลายอยู่ในน้ำ

การศึกษานินทรีย์วัตถุจากดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์ พบว่าน้ำตัวอย่างไม่สามารถเกิดการตกตะกอนได้ด้วยตัวเองเนื่องจากน้ำไม่มีความอิ่มตัวด้วยหินปูนและมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะที่เป็นส่วนประกอบวัสดุของ Service Tank ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้วิเคราะห์ปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมดในน้ำ

การเติมแก๊สคลอรีนทำให้ปริมาณไอออนของเหล็กที่อยู่ในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการกัดกร่อนโลหะและการตกตะกอนของเหล็กในน้ำมีผลต่อ SDI ดังนั้นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่า SDI สูงขึ้นมาจากการเติมแก๊สคลอรีน

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ในการศึกษาอัตราการเติมแก๊สคลอรีนควรใช้เวลาในการศึกษามากกว่า 7 วัน
- 2) ควรเก็บตัวอย่างน้ำแบบผสมรวม (Composite Sampling) เช่น เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 2, 4, 6, 8 และ 10 ชั่วโมงแล้วนำมาผสมรวมกันเพื่อให้เปรียบเทียบน้ำใน Service Tank ทั้งหมด
- 3) ในการศึกษาอินทรีย์วัตถุ ควรนำตัวอย่างน้ำไปวัดพารามิเตอร์อื่นๆ เพิ่มเติม เช่น ความขุ่น
- 4) ควรศึกษาโลหะชนิดอื่นที่อยู่บนกระดาดากรองที่ผ่านการตรวจวัดดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำแล้ว หรือน้ำตัวอย่างเพิ่มเติมนอกเหนือจากไอออนของเหล็กทั้งหมด เช่น แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn) หรือ แคลเซียม (Ca)
- 5) ควรศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการฉาบเคลือบวัสดุภายในของถังเพื่อใช้เป็นแนวทางในการป้องกันการกัดกร่อนของถัง Service Tank ที่เป็นสาเหตุของค่าดัชนีสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำสูง
- 6) ควรทำการถ่ายน้ำที่เก็บใน Service Tank ออกทั้งหมด (Empty Drain) แล้วทำการล้างถังใหม่ กรณีที่ค่า SDI สูงกว่า 3 เป็นประจำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

การประปานครหลวง. ม.ป.ป. “คลอรีน (Chlorine).” กรุงเทพฯ : การประปานครหลวง. เอกสาร  
 อัดสำเนา.

การประปานครหลวง. ม.ป.ป. “เกณฑ์กำหนดคุณภาพน้ำประปา.” กรุงเทพฯ : การประปานครหลวง.  
 เอกสารอัดสำเนา.

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2558. **มลพิษทางน้ำและผลกระทบต่อสุขภาพ.** กรุงเทพฯ : โรง  
 พิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทยจำกัด.

กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2558. **เอกสารประกอบการดำเนินงานตอบโต้ภาวะฉุกเฉินด้าน  
 อนามัยสิ่งแวดล้อมมลพิษทางน้ำและผลกระทบต่อสุขภาพ.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุม  
 สหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทยจำกัด.

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และพิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. 2559. **การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย.** กรุงเทพฯ : สถาบัน  
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์. 2559. **เคมีพื้นฐานของน้ำ.** กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
 ทหารลาดกระบัง

ชญชิตา สายชมด. ม.ป.ป. “การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS.” กรุงเทพฯ :  
 สำนักวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมโรงงาน

ดารินทร์ กิ่งงาม, เบญจรัตน์ นรสิงห์ และนุตรา ตียะศรี. 2547. “คลอรีน (Chlorine).” การศึกษา  
 การเตรียมหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่าง. 1(1) : 8

ธีรวิทย์ ปูผ้า, ยิ่งเจริญ ศุภกุลรัตน์ และสรพจน์ กนกกันพงษ์. 2548. “ปัญหาคลอรีน คลอไรต์ในน้ำ  
 ที่ใช้ในอุตสาหกรรมและแนวทางการแก้ไข.” มจก.วิชาการ. 8(16 มกราคม – มิถุนายน  
 2548) : 97-102.

นฤมล ตบนิยะกุล และวาสนา คงสุข. ม.ป.ป. “คุณภาพน้ำและผลกระทบต่อสุขภาพ.” นนทบุรี :  
 กระทรวงสาธารณสุข. เอกสารอัดสำเนา.

ปราโมช เชี่ยวชาญ. 2552. **คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :  
[https://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/2552\\_3/healthiness.html](https://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/2552_3/healthiness.html).

ผุสดี มุหะหมัด. 2555. **ดัชนีชี้วัดตัวหนึ่งของคุณสมบัติของน้ำ.** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก :  
<https://www.gotoknow.org/posts/293577>.

ฝ่ายเคมี. 2555. **วิเคราะห์น้ำ-น้ำทิ้งโรงไฟฟ้า.** 1. นนทบุรี: กองผลิตสื่อประชาสัมพันธ์ ฝ่ายสื่อสาร  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ชนด้านการค้า  
 อองครุ กฟผ.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไพฑูริย์ หมายมั่นสมสุข. ม.ป.ป. “สภาพต่าง (Alkalinity).” กรุงเทพฯ : กรมโรงงานอุตสาหกรรม. เอกสารอัดสำเนา
- สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ ศุภรัักษ์ แก้วแสง อติชัย พรพรหมินทร์. 2017. “การศึกษาปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในระบบท่อจ่ายน้ำประปา.” วิศวกรรมสาร มก. 29(96) : 25-26
- ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. ม.ป.ป. เนื้อดิน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.lesa.biz/earth/lithosphere/soil/soil-texture>.
- อรดี แจ่มอุลิตรัตน์. ม.ป.ป. “ความกระด้าง (Hardness).” นนทบุรี : สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6
- Alhadidia A., Blankertb B., Kempermana A.J.B., Schippersc J.C., Wesslinga M. and Meera van der W.G.J. 2011. “Effect of testing conditions and filtration mechanisms on SDI.” *Journal of Membrane Science* 381(2011) : 142– 151
- Eaton A.D., Rice E.W. and Clesceri L.S. 1999. “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.”
- Mosset A., Bonnelye V., Petry M. and Sanz M.A. 2008. “The sensitivity of SDI analysis: from RO feed water to raw water.” *Desalination* 222(1) : 17-23.
- Yoder Claude. 2018. “Stability Constants of Metal-Ion Complexes.” 8-9 to 8-11 in L.G. Sillen and A.E. Martell. *Lange's Handbook*. London : The Chemical Society.
- Corrosion Doctors. n.d. Iron E-pH (Pourbaix) Diagram. [Online]. Available : <https://corrosion-doctors.org/Corrosion-Thermodynamics/Potential-pH-diagram-iron.htm>.
- Cha Donghoon, Kim Suhan, Lim Jae-Lim and Kim Chung-Hwan. 2012. “A statistical approach to analyze factors affecting silt density index.” *Desalination and water treatment* 45(1) : 276-283
- Kastla G., Fisherb I. and Sathasivana A. 2017, “Scan of water treatment processes to achievedesirable chlorine stability in water supply systems.” *Process Safety and Environmental Protection* 112 (2017) : 265–273
- Gladwyn Joan. n.d. “Ion Revision.” New Zealand : University of Canterbury. Technical Report CSE-TR-31-89.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zachara John M., Kukkadapu Ravi K. and James K. 2017. **Bio-mineralization of Poorly Crystalline Fe (III) Oxides by Dissimilatory Metal Reducing Bacteria (DMRB).** [Online]. Available :

[https://www.semanticscholar.org/paper/Bio-mineralization-of-Poorly-Crystalline-Fe-\(III\)-Zachara-Kukkadapu/1a9b8faeb9fd3f49e4a95142839df028e7b82225](https://www.semanticscholar.org/paper/Bio-mineralization-of-Poorly-Crystalline-Fe-(III)-Zachara-Kukkadapu/1a9b8faeb9fd3f49e4a95142839df028e7b82225).

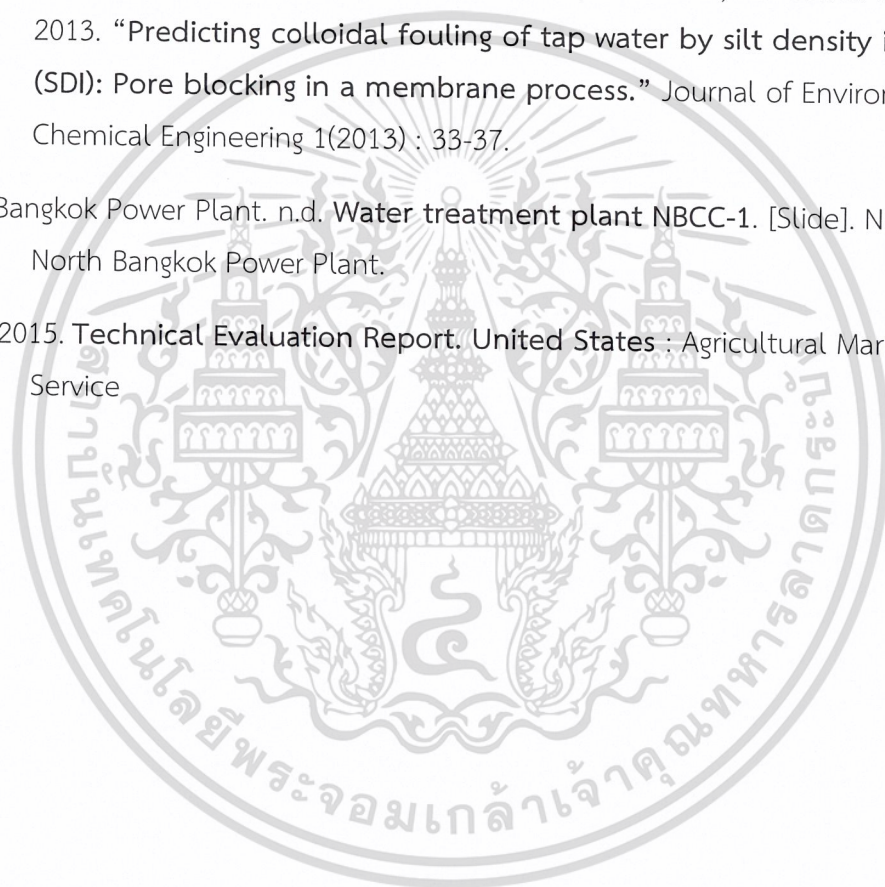
Lenntech. 2018. **Silt Density Index – SDI.** [Online]. Available :

<https://www.lenntech.com/sdi.htm>

Habib M., Habib U., Memonb A.R., Amin U., Karim Z., Khan A.U., Naveed S. and Ali S. 2013. “Predicting colloidal fouling of tap water by silt density index (SDI): Pore blocking in a membrane process.” *Journal of Environmental Chemical Engineering* 1(2013) : 33-37.

North Bangkok Power Plant. n.d. **Water treatment plant NBCC-1.** [Slide]. Nonthaburi: North Bangkok Power Plant.

USDA. 2015. **Technical Evaluation Report. United States : Agricultural Marketing Service**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

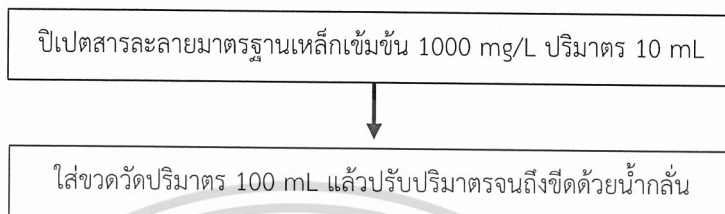
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมกราฟมาตรฐาน

#### ก-1 การเตรียมกราฟมาตรฐานหลัก

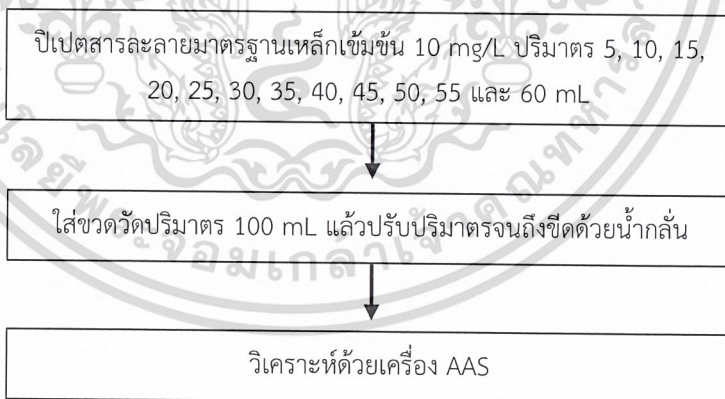
1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานหลักที่ความเข้มข้น 100 mg/L



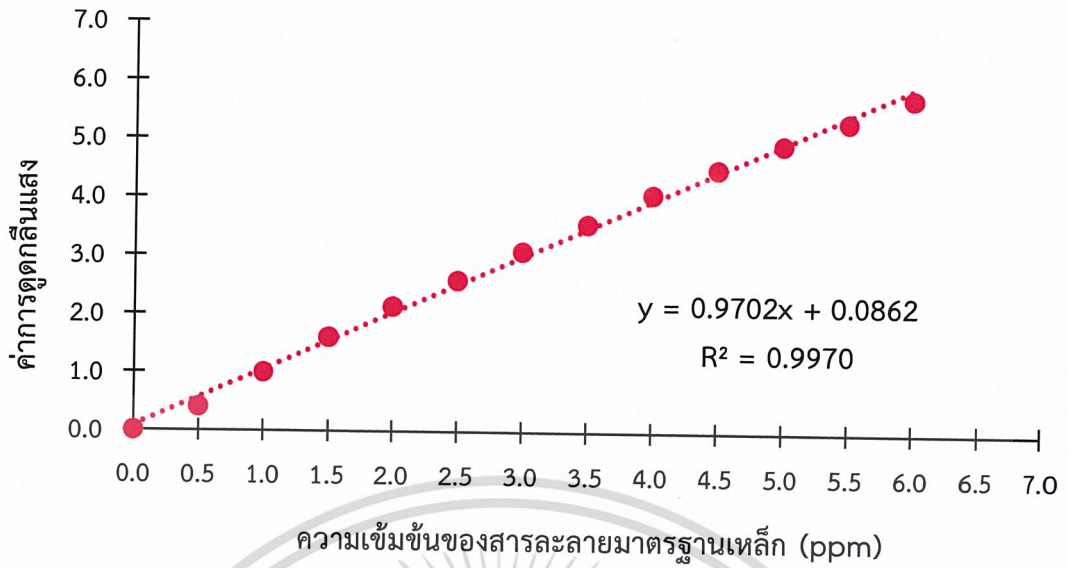
2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานหลักที่ความเข้มข้น 10 mg/L



3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานหลักที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5. และ 6.0 mg/L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานเหล็ก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลผลการทดลอง

#### ข-1 ข้อมูลค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำย้อนหลัง

ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลค่า SDI ย้อนหลังเป็นเวลา 5 ปี (ตั้งแต่ปี พ.ศ.2557-2561) ของน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) เพื่อสังเกตแนวโน้มของค่า SDI ที่มีค่าสูงขึ้นจนคุณสมบัติของน้ำไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของน้ำที่จะผ่านเมมเบรนของระบบ Reverse Osmosis ตามที่บริษัทผู้จำหน่ายเมมเบรนกำหนด

ตารางที่ ข-1 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2557

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
21 ม.ค. 57	1.60	1.93	8 ก.ค. 57	0.96	4.08
28 ม.ค. 57	1.46	1.86	15 ก.ค. 57	1.26	2.66
4 ม.ค. 57	0.66	1.06	22 ก.ค. 57	0.53	1.60
11 ก.พ. 57	0.40	0.73	29 ก.ค. 57	0.53	2.53
18 ก.พ. 57	1.53	0.40	5 ส.ค. 57	0.73	2.86
25 ก.พ. 57	1.60	1.46	13 ส.ค. 57	1.06	3.06
4 มี.ค. 57	0.80	2.33	19 ส.ค. 57	0.73	3.06
11 มี.ค. 57	1.80	3.75	26 ส.ค. 57	1.06	2.60
18 มี.ค. 57	0.86	4.20	2 ก.ย. 57	0.46	3.33
25 มี.ค. 57	1.40	3.00	10 ก.ย. 57	1.40	3.33
1 เม.ย. 57	1.26	2.73	17 ก.ย. 57	2.00	5.86
8 เม.ย. 57	0.80	4.00	18 ก.ย. 57	-	5.86
17 เม.ย. 57	1.07	2.00	23 ก.ย. 57	1.60	5.73
22 เม.ย. 57	1.33	4.13	30 ก.ย. 57	1.20	3.33
29 เม.ย. 57	1.20	2.47	7 ต.ค. 57	0.46	2.06
6 พ.ค. 57	1.20	2.60	14 ต.ค. 57	0.46	2.60
14 พ.ค. 57	0.40	2.40	21 ต.ค. 57	0.86	4.40
20 พ.ค. 57	0.87	2.46	28 ต.ค. 57	0.66	5.73
27 พ.ค. 57	0.93	2.73	4 พ.ย. 57	1.00	3.60
3 มิ.ย. 57	1.20	3.20	11 พ.ย. 57	0.53	4.46
10 มิ.ย. 57	1.06	3.60	18 พ.ย. 57	1.80	4.60
17 มิ.ย. 57	1.83	3.43	25 พ.ย. 57	1.40	5.53
24 มิ.ย. 57	0.87	2.53	2 ธ.ค. 57	0.80	4.07
1 ก.ค. 57	0.87	2.53	30 ธ.ค. 57	0.53	3.27

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2558

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
6 ม.ค. 58	0.13	1.33	14 ก.ค. 58	0.60	2.54
13 ม.ค. 58	0.73	4.40	20 ก.ค. 58	0.74	1.47
21 ม.ค. 58	0.93	3.20	28 ก.ค. 58	0.60	1.47
27 ม.ค. 58	0.93	4.00	3 ส.ค. 58	0.67	1.20
4 ก.พ. 58	-	5.06	10 ส.ค. 58	1.07	1.14
11 ก.พ. 58	0.26	5.00	17 ส.ค. 58	0.34	0.67
18 ก.พ. 58	0.73	2.87	25 ส.ค. 58	0.80	1.34
24 ก.พ. 58	0.73	3.60	31 ส.ค. 58	0.80	1.47
3 มี.ค. 58	0.93	3.40	7 ก.ย. 58	0.87	1.14
9 มี.ค. 58	0.73	4.26	14 ก.ย. 58	0.80	1.07
17 มี.ค. 58	1.06	3.86	21 ก.ย. 58	1.54	5.20
24 มี.ค. 58	1.20	2.60	28 ก.ย. 58	0.67	2.27
30 มี.ค. 58	0.26	2.93	5 ต.ค. 58	0.34	0.47
7 เม.ย. 58	0.73	2.26	12 ต.ค. 58	0.80	0.74
21 เม.ย. 58	0.40	2.46	20 ต.ค. 58	0.40	1.47
28 เม.ย. 58	0.20	2.40	27 ต.ค. 58	0.67	1.00
11 พ.ค. 58	0.73	3.20	2 พ.ย. 58	0.40	0.80
19 พ.ค. 58	1.13	2.13	10 พ.ย. 58	1.00	1.67
25 พ.ค. 58	0.33	2.66	18 พ.ย. 58	0.60	1.87
11 มิ.ย. 58	0.07	1.93	24 พ.ย. 58	1.20	1.27
16 มิ.ย. 58	0.54	1.94	30 พ.ย. 58	1.34	1.67
23 มิ.ย. 58	0.60	2.80	8 ธ.ค. 58	0.94	1.80
29 มิ.ย. 58	0.87	1.67	14 ธ.ค. 58	0.80	1.27
6 ก.ค. 58	0.80	2.67	21 ธ.ค. 58	1.20	1.87

ตารางที่ ข-3 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2559

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
5 ม.ค. 59	0.74	2.07	1 มิ.ย. 59	0.67	3.40
11 ม.ค. 59	0.67	2.00	8 มิ.ย. 59	1.07	4.34
18 ม.ค. 59	0.94	1.60	17 ส.ค. 59	1.20	4.07
25 ม.ค. 59	1.40	1.40	7 ก.ย. 59	1.60	4.14
1 ก.พ. 59	1.00	2.07	13 ก.ย. 59	0.80	2.00
8 ก.พ. 59	0.80	1.87	21 ก.ย. 59	1.27	2.54

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ใน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ใน้ำ	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
16 ก.พ. 59	1.20	2.07	4 ต.ค. 59	1.67	3.27
24 ก.พ. 59	0.67	1.07	10 ต.ค. 59	1.60	2.94
1 มี.ค. 59	0.87	1.34	18 ต.ค. 59	1.27	4.94
7 มี.ค. 59	0.74	1.67	8 พ.ย. 59	0.74	4.67
15 มี.ค. 59	-	1.80	15 พ.ย. 59	1.00	5.27
21 มี.ค. 59	0.54	-	23 พ.ย. 59	0.74	5.07
29 มี.ค. 59	0.54	-	30 พ.ย. 59	0.60	4.60
5 เม.ย. 59	0.80	-	7 ธ.ค. 59	2.54	5.00
11 เม.ย. 59	4.40	-	13 ธ.ค. 59	1.47	1.47
27 เม.ย. 59	1.00	-	20 ธ.ค. 59	1.60	4.54
16 พ.ค. 59	1.27	3.20			

ตารางที่ ข-4 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2560

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ใน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ใน้ำ	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
9 ม.ค. 60	1.40	4.07	2 ส.ค. 60	1.13	-
16 ม.ค. 60	1.00	3.07	18 ส.ค. 60	1.46	4.60
23 ม.ค. 60	1.74	3.80	22 ส.ค. 60	0.60	2.94
30 ม.ค. 60	1.60	5.14	23 ส.ค. 60	1.13	5.33
6 ก.พ. 60	1.27	5.87	30 ส.ค. 60	0.87	4.74
15 ก.พ. 60	0.80	4.87	31 ส.ค. 60	1.33	-
2 มี.ค. 60	1.00	3.60	6 ก.ย. 60	1.20	4.73
7 มี.ค. 60	1.07	4.27	13 ก.ย. 60	1.53	4.06
13 มี.ค. 60	1.00	3.93	25 ก.ย. 60	1.53	3.46
21 มี.ค. 60	1.33	-	2 ต.ค. 60	1.60	3.60
25 เม.ย. 60	1.53	3.66	9 ต.ค. 60	1.60	3.60
24 พ.ค. 60	1.60	5.40	16 ต.ค. 60	1.80	3.80
31 พ.ค. 60	1.27	4.73	1 พ.ย. 60	1.53	3.93
7 มิ.ย. 60	2.60	4.87	6 พ.ย. 60	1.40	5.20
14 มิ.ย. 60	1.13	-	13 พ.ย. 60	1.93	4.20
21 มิ.ย. 60	1.80	-	20 พ.ย. 60	1.60	4.26
5 ก.ค. 60	1.53	5.53	27 พ.ย. 60	0.93	4.60
14 ก.ค. 60	1.80	5.93	4 ธ.ค. 60	2.33	4.40
18 ก.ค. 60	1.40	-	13 ธ.ค. 60	1.60	5.13
25 ก.ค. 60	1.60	-	18 ธ.ค. 60	2.06	6.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลไปยังที่ใดแล้วขงเอกสารทุกครั้งที่จะนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ค่า SDI ย้อนหลังปี พ.ศ. 2561

วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ		วันที่	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	SWI	SWE		SWI	SWE
9 ม.ค. 61	1.74	2.27	7 ก.ย. 61	1.47	2.13
15 ม.ค. 61	1.94	2.34	10 ก.ย. 61	1.81	1.56
23 ม.ค. 61	1.54	1.94	12 ก.ย. 61	1.27	1.54
5 ก.พ. 61	0.67	1.60	13 ก.ย. 61	1.43	1.80
12 ก.พ. 61	1.60	4.40	14 ก.ย. 61	0.39	1.18
20 ก.พ. 61	1.66	2.73	17 ก.ย. 61	1.19	1.27
26 ก.พ. 61	1.80	1.93	18 ก.ย. 61	1.45	2.24
6 มี.ค. 61	1.80	1.87	19 ก.ย. 61	1.51	1.94
19 มี.ค. 61	1.26	1.80	20 ก.ย. 61	0.93	1.13
12 มี.ค. 61	1.33	3.07	21 ก.ย. 61	1.54	2.36
26 มี.ค. 61	2.00	2.33	25 ก.ย. 61	1.51	1.64
2 เม.ย. 61	2.00	4.33	26 ก.ย. 61	0.27	1.87
18 เม.ย. 61	1.73	3.40	27 ก.ย. 61	1.67	2.40
23 เม.ย. 61	1.86	4.00	28 ก.ย. 61	1.87	1.27
8 พ.ค. 61	1.80	2.06	2 ต.ค. 61	1.67	1.73
21 พ.ค. 61	1.47	3.47	3 ต.ค. 61	1.67	2.33
6 มิ.ย. 61	2.00	3.80	4 ต.ค. 61	1.40	1.93
12 มิ.ย. 61	1.47	3.20	5 ต.ค. 61	0.99	3.75
25 มิ.ย. 61	1.13	2.73	8 ต.ค. 61	1.53	2.80
29 มิ.ย. 61	1.40	2.13	9 ต.ค. 61	0.91	2.96
2 ก.ค. 61	1.47	4.00	10 ต.ค. 61	1.80	3.67
6 ก.ค. 61	1.40	3.27	16 ต.ค. 61	1.73	4.40
9 ก.ค. 61	1.67	2.53	17 ต.ค. 61	1.60	3.87
13 ก.ค. 61	1.20	3.13	18 ต.ค. 61	0.77	4.06
16 ก.ค. 61	1.47	2.13	19 ต.ค. 61	0.93	4.33
20 ก.ค. 61	1.60	3.00	22 ต.ค. 61	1.00	3.40
25 ก.ค. 61	1.67	4.53	24 ต.ค. 61	1.87	2.93
9 ส.ค. 61	1.34	2.80	25 ต.ค. 61	0.53	3.11
14 ส.ค. 61	0.73	0.60	30 ต.ค. 61	2.07	3.40
17 ส.ค. 61	1.13	2.73	31 ต.ค. 61	1.55	3.57
20 ส.ค. 61	1.80	1.73	1 พ.ย. 61	1.94	3.48
24 ส.ค. 61	1.80	2.50	2 พ.ย. 61	1.73	3.27
27 ส.ค. 61	1.73	2.67	5 พ.ย. 61	1.83	3.55
31 ส.ค. 61	1.73	3.34	6 พ.ย. 61	1.33	3.33
3 ก.ย. 61	1.73	2.13	7 พ.ย. 61	1.40	3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่หาก 3 ก.ย. 61 ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปะเนื้อหาและข้อมูลไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข-2 การตรวจวัดสารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุ

ผลของค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B), น้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) และน้ำดื่มบรรจุขวดที่วางจำหน่ายเชิงพาณิชย์ (จุด D) ที่ผู้วิจัยทำการจำลองการทดลองเป็น 2 สถานะคือ สถานะที่ไม่มีแสงสว่าง (ระบบปิด) และสถานะที่มีแสงสว่าง (ระบบเปิด) เพื่อดูโอกาสการเจริญเติบโตของสารแขวนลอยประเภทอินทรีย์วัตถุที่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ SDI มีค่าสูง

ตารางที่ ข-6 ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด (n = 7)

วันที่	จุด A		จุด B		จุด C		จุด D	
	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง
1	7.52	7.53	7.59	7.60	7.69	7.71	6.70	6.78
2	7.55	7.49	7.56	7.59	7.70	7.72	6.63	6.72
3	7.54	7.50	7.52	7.61	7.65	7.74	6.69	6.70
4	7.57	7.54	7.58	7.61	7.68	7.71	6.71	6.77
5	7.56	7.48	7.57	7.60	7.71	7.70	6.64	6.80
6	7.53	7.55	7.54	7.60	7.64	7.68	6.68	6.85
7	7.64	7.65	7.68	7.60	7.65	7.76	7.03	7.15
$\bar{X}$	7.56	7.53	7.58	7.60	7.67	7.72	6.73	6.82
SD	0.04	0.06	0.05	0.01	0.03	0.03	0.14	0.15

ตารางที่ ข-7 ค่าการนำไฟฟ้า ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ของน้ำตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด (n = 7)

วันที่	จุด A		จุด B		จุด C		จุด D	
	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง	ไม่มีแสง สว่าง	มีแสง สว่าง
1	203.20	208.70	204.10	210.10	198.70	211.30	5.67	4.98
2	203.90	209.80	202.80	209.80	199.50	210.50	5.21	5.92
3	204.50	210.60	203.20	211.30	200.00	211.00	5.42	5.82
4	203.30	210.20	204.40	210.70	200.40	211.20	5.41	5.93
5	204.70	214.60	203.00	210.60	198.90	215.00	6.22	4.91
6	206.50	211.50	205.50	209.50	200.80	216.10	6.45	5.72
7	204.90	212.30	205.30	215.10	198.80	216.70	6.56	6.40
$\bar{X}$	204.43	211.10	204.04	211.01	199.59	213.11	5.85	5.67
SD	1.13	1.93	1.09	1.90	0.84	2.70	0.55	0.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข-3 การตรวจวัดสารแขวนลอยประเภทอนินทรีย์วัตถุ

1. ผลการไทเทรตหาค่าสภาพต่างและค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมของน้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) เพื่อนำไปคำนวณหาดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์

ตารางที่ ข-8 การไทเทรตหาค่าสภาพต่าง (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)

วันที่	ประเภทน้ำ ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้ในการไทเทรต (mL)			ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )
		1	2	3		
1	จุด A	3.95	3.95	3.95	3.95	80.22
	จุด B	3.85	3.85	3.90	3.87	78.53
	จุด C	3.75	3.75	3.75	3.75	76.16
2	จุด A	3.80	3.80	3.80	3.80	77.18
	จุด B	3.75	3.75	3.80	3.77	76.50
	จุด C	3.75	3.80	3.75	3.77	76.50
3	จุด A	4.20	4.20	4.20	4.20	85.30
	จุด B	3.90	3.95	3.95	3.93	79.89
	จุด C	3.85	3.80	3.80	3.82	77.52
4	จุด A	4.00	3.90	3.90	3.93	79.89
	จุด B	3.95	3.80	3.80	3.85	78.19
	จุด C	3.95	3.85	3.85	3.88	78.87
5	จุด A	3.95	3.95	3.95	3.95	80.22
	จุด B	3.95	3.95	3.95	3.95	80.22
	จุด C	4.20	4.20	4.20	4.20	85.30
6	จุด A	3.90	3.90	3.90	3.90	79.21
	จุด B	3.90	3.80	3.90	3.87	78.53
	จุด C	4.05	4.05	4.05	4.05	82.26
7	จุด A	3.90	3.95	3.95	3.93	79.89
	จุด B	3.80	3.80	3.85	3.82	77.52
	จุด C	4.05	4.05	4.00	4.03	81.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 การไทเทรตหาค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม (mg/L as CaCO<sub>3</sub>)

วันที่	ประเภทน้ำ ตัวอย่าง	ปริมาตรที่ใช้ในการไทเทรต (mL)			ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความเข้มข้นเฉลี่ย (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )
		1	2	3		
1	จุด A	2.70	2.80	2.80	2.77	55.89
	จุด B	2.60	2.60	2.70	2.63	53.19
	จุด C	2.60	2.60	2.70	2.63	53.19
2	จุด A	2.80	2.90	2.90	2.87	57.91
	จุด B	2.90	2.90	2.90	2.90	58.58
	จุด C	2.80	2.80	2.80	2.80	56.56
3	จุด A	2.90	2.80	2.90	2.87	57.91
	จุด B	2.90	2.90	2.80	2.87	57.91
	จุด C	2.80	2.80	2.70	2.77	55.89
4	จุด A	2.80	2.80	2.80	2.80	56.56
	จุด B	2.60	2.60	2.60	2.60	52.52
	จุด C	2.70	2.70	2.70	2.70	54.54
5	จุด A	2.70	2.70	2.70	2.70	54.54
	จุด B	3.10	3.10	3.10	3.10	62.62
	จุด C	2.40	2.40	2.40	2.40	48.48
6	จุด A	2.80	2.90	2.90	2.87	57.91
	จุด B	3.00	3.00	2.90	2.97	59.93
	จุด C	2.80	2.80	2.90	2.83	57.23
7	จุด A	2.70	2.70	2.80	2.73	55.21
	จุด B	2.80	2.80	2.80	2.80	56.56
	จุด C	2.60	2.50	2.50	2.53	51.17

2. ผลการคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้ง 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช, อุณหภูมิ, ค่าของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด, ค่าสภาพต่าง และค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม และการแปลผลของดัชนีแล็กเกิลีร์และดัชนีโรนาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 การคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และการแปลผลของดัชนีแลงเกิลีย์และดัชนีโรนาร์

วันที่	ประเภทน้ำ ตัวอย่าง	pH	Temp	TDS	Alkalinity	Calcium Hardness	A	B	C	D	pH <sub>s</sub>	LSI	แปลผล LSI	RI	แปลผล RI
1	จุด A	7.56	29.0	109.8	80.22	55.89	0.10	2.01	1.35	1.90	8.16	-0.60	กักกร่อนโลหะ	8.77	กักกร่อนโลหะ
	จุด B	7.61	29.3	109.5	78.53	53.19	0.10	2.01	1.33	1.90	8.19	-0.58	"	8.77	"
	จุด C	7.75	28.5	110.4	76.16	53.19	0.10	2.02	1.33	1.88	8.22	-0.47	"	8.69	"
2	จุด A	7.55	28.7	107.6	77.18	57.91	0.10	2.02	1.36	1.89	8.17	-0.62	"	8.79	"
	จุด B	7.77	28.8	107.3	76.50	58.58	0.10	2.02	1.37	1.88	8.17	-0.40	"	8.57	"
	จุด C	7.92	28.8	106.5	76.50	56.56	0.10	2.02	1.35	1.88	8.18	-0.26	"	8.45	"
3	จุด A	7.53	29.3	111.5	85.30	57.91	0.10	2.01	1.36	1.93	8.12	-0.59	"	8.71	"
	จุด B	7.84	28.1	112.5	79.89	57.91	0.11	2.03	1.36	1.90	8.17	-0.33	"	8.50	"
	จุด C	7.92	26.1	107.6	77.52	55.89	0.10	2.07	1.35	1.89	8.23	-0.31	"	8.55	"
4	จุด A	7.51	27.0	111.8	79.89	56.56	0.10	2.05	1.35	1.90	8.20	-0.69	"	8.89	"
	จุด B	7.73	27.6	111.7	78.19	52.52	0.10	2.04	1.32	1.89	8.23	-0.50	"	8.73	"
	จุด C	7.87	27.2	116.8	78.87	54.54	0.11	2.05	1.34	1.90	8.22	-0.35	"	8.57	"
5	จุด A	7.49	28.3	126.6	80.22	54.54	0.11	2.03	1.34	1.90	8.19	-0.70	"	8.90	"
	จุด B	7.61	28.3	128.2	80.22	62.62	0.11	2.03	1.40	1.90	8.14	-0.53	"	8.66	"
	จุด C	7.85	28.9	118.8	85.30	48.48	0.11	2.01	1.29	1.93	8.21	-0.36	"	8.56	"
6	จุด A	7.34	28.9	134.9	79.21	57.91	0.11	2.01	1.36	1.90	8.17	-0.83	"	8.99	"
	จุด B	7.53	28.9	134.0	78.53	59.93	0.11	2.01	1.38	1.90	8.15	-0.62	"	8.78	"
	จุด C	7.77	28.8	122.0	82.26	57.23	0.11	2.02	1.36	1.92	8.15	-0.38	"	8.53	"
7	จุด A	7.26	28.3	137.8	79.89	55.21	0.11	2.03	1.34	1.90	8.19	-0.93	"	9.13	"
	จุด B	7.50	29.4	138.5	77.52	56.56	0.11	2.00	1.35	1.89	8.18	-0.68	"	8.85	"
	จุด C	7.81	28.1	128.0	81.92	51.17	0.11	2.03	1.31	1.91	8.22	-0.41	"	8.63	"

3. การเปลี่ยนแปลงของดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำในกรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr. ของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ผู้วิจัยทำการตรวจวัด SDI ในแต่ละช่วงอัตราการเติมแก๊สคลอรีนเป็นเวลา 7 วัน

ตารางที่ ข-11 ค่า SDI กรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr.

วันที่	ไม่เติมแก๊สคลอรีน	วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา 25 g/hr.	วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา มากกว่า 25 g/hr.
2 ต.ค. 61	1.73	16 ต.ค. 61	4.40	30 ต.ค. 61	3.40
3 ต.ค. 61	2.33	17 ต.ค. 61	3.87	31 ต.ค. 61	3.57
4 ต.ค. 61	1.93	18 ต.ค. 61	4.06	1 พ.ย. 61	3.48
5 ต.ค. 61	3.75	19 ต.ค. 61	4.33	2 พ.ย. 61	3.27
8 ต.ค. 61	2.80	22 ต.ค. 61	3.40	5 พ.ย. 61	3.55
9 ต.ค. 61	2.96	24 ต.ค. 61	2.93	6 พ.ย. 61	3.33
10 ต.ค. 61	3.67	25 ต.ค. 61	3.11	7 พ.ย. 61	3.20

4. การตรวจวัดปริมาณเหล็กในน้ำประปา (จุด A), น้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) และ น้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ในกรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr.

ตารางที่ ข-12 ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่าง (ppm)

วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา 25 g/hr.			วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา มากกว่า 25 g/hr.		
	จุด A	จุด B	จุด C		จุด A	จุด B	จุด C
16 ต.ค. 61	0.0878	0.0888	0.0878	30 ต.ค. 61	0.0888	0.0917	0.0888
17 ต.ค. 61	0.0878	0.0849	0.0878	31 ต.ค. 61	0.0878	0.0897	0.0955
18 ต.ค. 61	0.0975	0.0917	0.0907	1 พ.ย. 61	0.0888	0.0878	0.0946
19 ต.ค. 61	0.0917	0.0955	0.0975	2 พ.ย. 61	0.0917	0.0888	0.0926
22 ต.ค. 61	0.0888	0.0878	0.0897	5 พ.ย. 61	0.0897	0.0926	0.0985
24 ต.ค. 61	0.0965	0.0878	0.0897	6 พ.ย. 61	0.0907	0.0926	0.0965
25 ต.ค. 61	0.0897	0.0917	0.0946	7 พ.ย. 61	0.0936	0.0868	0.0926
$\bar{x}$	0.0914	0.0897	0.0911	$\bar{x}$	0.0901	0.0900	0.0942
SD	0.0041	0.0035	0.0036	SD	0.0020	0.0024	0.0032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 ผลต่างปริมาณเหล็กในน้ำระหว่างน้ำที่ไหลเข้าและน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C-B) (ppm)

วันที่	เติมแก๊สคลอรีน ด้วยอัตรา 25 g/hr.	เติมแก๊สคลอรีนด้วย อัตรามากกว่า 25 g/hr.
1	ND	ND
2	0.0029	0.0058
3	ND	0.0068
4	0.0019	0.0039
5	0.0019	0.0058
6	0.0019	0.0039
7	0.0029	0.0058
$\bar{x}$	0.0017	0.0046
SD	0.0012	0.0023

หมายเหตุ ปริมาณเหล็กในน้ำตัวอย่างกรณีที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีนมีปริมาณน้อยกว่าช่วงความเข้มข้นของเหล็กที่เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS) สามารถตรวจวัดได้

5. การตรวจวัดปริมาณเหล็กบนกระดาษที่ผ่านการตรวจวัด SDI จาก 2 จุดตรวจวัดคือ จุดที่น้ำไหลเข้า Service Tank (จุด B) และจุดที่น้ำไหลออกจาก Service Tank (จุด C) ในกรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr.

ตารางที่ ข-14 ปริมาณเหล็กบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI (mg/กระดาษกรอง 1 แผ่น)

วันที่	ไม่เติมแก๊สคลอรีน		วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา 25 g/hr.		วันที่	เติมแก๊สคลอรีนอัตรา มากกว่า 25 g/hr.	
	จุด B	จุด C		จุด B	จุด C		จุด B	จุด C
2 ต.ค. 61	0.0029	0.0036	16 ต.ค. 61	0.0028	0.0036	30 ต.ค. 61	0.0004	0.0082
3 ต.ค. 61	0.0037	0.0031	17 ต.ค. 61	0.0028	0.0040	31 ต.ค. 61	0.0077	0.0036
4 ต.ค. 61	0.0032	0.0034	18 ต.ค. 61	0.0029	0.0040	1 พ.ย. 61	0.0061	0.0065
5 ต.ค. 61	0.0037	0.0032	19 ต.ค. 61	0.0028	0.0040	2 พ.ย. 61	0.0059	0.0040
8 ต.ค. 61	0.0029	0.0035	22 ต.ค. 61	0.0028	0.0041	5 พ.ย. 61	0.0070	0.0078
9 ต.ค. 61	0.0038	0.0028	24 ต.ค. 61	0.0029	0.0039	6 พ.ย. 61	0.0004	0.0050
10 ต.ค. 61	0.0040	0.0035	25 ต.ค. 61	0.0027	0.0036	7 พ.ย. 61	0.0040	0.0068
$\bar{x}$	0.0035	0.0033	$\bar{x}$	0.0028	0.0039	$\bar{x}$	0.0045	0.0060
SD	0.0005	0.0003	SD	0.0001	0.0002	SD	0.0030	0.0018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาติให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 ผลต่างปริมาณเหล็กบนกระดาษกรองที่ผ่านการตรวจวัด SDI ระหว่างน้ำที่ไหลเข้า และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C-B) (mg/กระดาษกรอง 1 แผ่น)

วันที่	ไม่เติมแก๊สคลอรีน	เติมแก๊สคลอรีนด้วย อัตรา 25 g/hr.	เติมแก๊สคลอรีนด้วย อัตรามากกว่า 25 g/hr.
1	0.0008	0.0007	0.0078
2	ND	0.0012	ND
3	0.0002	0.0010	0.0004
4	ND	0.0012	ND
5	0.0006	0.0013	0.0007
6	ND	0.0009	0.0046
7	ND	0.0009	0.0028
$\bar{x}$	0.0002	0.0010	0.0023
SD	0.0003	0.0002	0.0030

หมายเหตุ ND หมายถึง ปริมาณเหล็กในน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (จุด C) มีปริมาณน้อยกว่า ปริมาณเหล็กในน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (จุด B) เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณเหล็กใน น้ำที่เก็บใน Service Tank ค่าที่ได้ออกมาจึงติดลบไม่สามารถนำมาเป็นข้อมูลผลการ ทดลองได้

#### ข-4 อิทธิพลของการทดสอบระบบดับเพลิงที่มีผลต่อค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ

การทดสอบระบบดับเพลิงของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 มีผลทำให้ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเปลี่ยนแปลงไป ผู้วิจัยจึงทำการรวบรวมข้อมูลวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิงของโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 1 และค่า SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง

ตารางที่ ข-16 ค่า SDI ก่อนและหลังวันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง

วันที่มีการทดสอบ ระบบดับเพลิง	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	ก่อนมีการทดสอบระบบดับเพลิง (วันศุกร์)	หลังมีการทดสอบระบบดับเพลิง (วันจันทร์)
30 มิ.ย. 61	4.00	2.13
7 ก.ค. 61	2.53	3.00
14 ก.ค. 61	2.13	3.13
21 ก.ค. 61	4.53	3.00
11 ส.ค. 61	2.67	2.80
18 ส.ค. 61	1.73	2.73

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณี18 ส.ค. 61 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่มีการทดสอบระบบดับเพลิง	ดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ	
	ก่อนมีการทดสอบระบบดับเพลิง (วันศุกร์)	หลังมีการทดสอบระบบดับเพลิง (วันจันทร์)
1 ก.ย. 61	2.13	3.34
8 ก.ย. 61	1.56	2.40
15 ก.ย. 61	1.27	1.18
22 ก.ย. 61	1.64	2.36
29 ก.ย. 61	1.27	1.73
5 ต.ค. 61	1.93	3.75
13 ต.ค. 61	3.67	4.40
19 ต.ค. 61	4.06	4.33
27 ต.ค. 61	3.11	3.40
3 พ.ย. 61	3.27	3.55
10 พ.ย. 61	3.20	3.40

หมายเหตุ วันที่มีการนำน้ำที่เก็บใน Service Tank จากโรงไฟฟ้าพระนครเหนือชุดที่ 2 มาใช้งาน ได้แก่ วันที่ 14 กรกฎาคม 2561, 13 ตุลาคม 2561 และ 27 ตุลาคม 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณผลการทดลอง

#### ค-1 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )

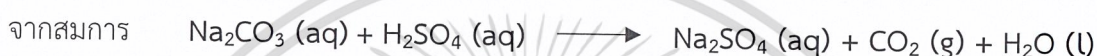
สูตรที่ใช้ในการคำนวณ  $C_1V_1 = C_2V_2$

$C_1$  = สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมคาร์บอเนต 0.02 N

$V_1$  = ปริมาตรของโซเดียมคาร์บอเนตที่ปัด (mL)

$C_2$  = สารละลายมาตรฐานทุติยภูมิกรดซัลฟิวริก

$V_2$  = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต (mL)



#### ตารางที่ ค-1 การไทเทรตและหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

ครั้งที่	น้ำหนักสารละลาย มาตรฐานปฐมภูมิ โซเดียมคาร์บอเนต (g)	ปริมาตรของกรด ซัลฟิวริกที่ใช้ (mL)	ความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริก (N)	ความเข้มข้นของ กรดซัลฟิวริก โดยเฉลี่ย (N)
1	1.0601	9.90	0.02020	0.02031
2	1.0602	9.80	0.02041	
3	1.0601	9.85	0.02031	

#### ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของ  $Na_2CO_3$  1.0601 g ปรับปริมาตรครบ 1000 mL

$$\text{น้ำหนักสมมูลของ } Na_2CO_3 = \frac{106 \text{ g/mol}}{2 \text{ eq/mol}} = 53 \text{ g/eq}$$

$$\text{ดังนั้น ความเข้มข้นของ } Na_2CO_3 = \frac{1.0601 \text{ g/L}}{53 \text{ g/eq}} = 0.0200019 \text{ N}$$

ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต 9.90 mL

ปัดสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต = 10 mL

$$C_{Na_2CO_3} V_{Na_2CO_3} = C_{H_2SO_4} V_{H_2SO_4}$$

$$(0.0200019 \text{ N})(10 \text{ mL}) = C_{H_2SO_4} (9.90 \text{ mL})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ  $C_{H_2SO_4}$  เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ดังนั้น ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 0.0202 นอร์มอล  
 ไม่ว่าจะผลิตที่ไหนก็ตาม ไม่ให้ผิดแบบลงเนื้อหา และต้องอยู่ในเงื่อนไขของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค-2 การหาค่าอัลคาไลนิตี้ของน้ำตัวอย่าง

$$\text{จากสูตรการคำนวณ} \quad [\text{ALK}] = \frac{A \times N \times 50000}{V}$$

A = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก (N)

V = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)

### ตัวอย่างการคำนวณ

ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกโดยเฉลี่ย = 3.95 mL

ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก = 0.02031 N

ปริมาตรน้ำตัวอย่าง = 50 mL

$$[\text{ALK}] = \frac{3.95 \text{ (mL)} \times 0.02031 \left(\frac{\text{eq}}{\text{L}}\right) \times 50000 \left(\frac{\text{mg}}{\text{eq}}\right)}{50 \text{ (mL)}}$$

= 80.23 mg/L as CaCO<sub>3</sub>

ดังนั้น ค่าอัลคาไลนิตี้ของน้ำตัวอย่าง เท่ากับ 80.23 mg/L as CaCO<sub>3</sub>

## ค-3 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายอีดีทีเอ (EDTA)

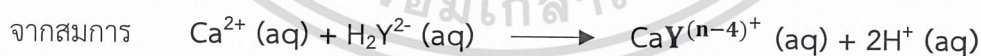
$$\text{สูตรที่ใช้ในการคำนวณ} \quad C_1 V_1 = C_2 V_2$$

C<sub>1</sub> = สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิแคลเซียมคาร์บอเนต 0.01 M

V<sub>1</sub> = ปริมาตรของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปิเปต (mL)

C<sub>2</sub> = สารละลายมาตรฐานทุตียมอีดีทีเอ

V<sub>2</sub> = ปริมาตรของสารละลายอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต (mL)



ตารางที่ ค-2 การไทเทรตและหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายอีดีทีเอ

ครั้งที่	น้ำหนักสารปฐมภูมิ แคลเซียม คาร์บอเนต (g)	ปริมาตรของ สารละลายอีดีทีเอ ที่ใช้ (mL)	ความเข้มข้นของ สารละลายอีดีทีเอ (M)	ความเข้มข้นของ สารละลายอีดีทีเอ โดยเฉลี่ย (M)
1	1.0003	9.90	0.0101	0.0101
2	1.0002	9.90	0.0101	
3	1.0001	9.95	0.0101	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

น้ำหนักของ  $\text{CaCO}_3$  1.0003 g ปริมาตรครบ 1000 mL

$$\text{ดังนั้น ความเข้มข้นของ } \text{CaCO}_3 = \frac{1.0003 \text{ g/L}}{100 \text{ g/mol}} = 0.010003 \text{ mol/L}$$

ปริมาตรของอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 9.90 mL

ปิเปตสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต = 10 mL

$$\begin{aligned} C_{\text{CaCO}_3} V_{\text{CaCO}_3} &= C_{\text{EDTA}} V_{\text{EDTA}} \\ (0.010003 \text{ M})(10 \text{ mL}) &= C_{\text{H}_2\text{SO}_4} (9.90 \text{ mL}) \\ C_{\text{EDTA}} &= 0.0101 \text{ M} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่แน่นอนของอีดีทีเอ เท่ากับ 0.0101 โมลาร์

**ค-4 การหาค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง**

$$\text{สูตรที่ใช้ในการคำนวณ Hardness calcium} = \frac{T \times B}{V}$$

T = ปริมาตรของอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต (mL)

B = ความเข้มข้นของสารละลายอีดีทีเอ (mol/L, M)

V = ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง (mL)

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{ปริมาตรของสารละลายอีดีทีเอโดยเฉลี่ย} = 2.77 \text{ mL}$$

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายอีดีทีเอ} = 0.0101 \text{ M}$$

$$\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง} = 50 \text{ mL}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักสมมูลของแคลเซียมคาร์บอเนต} &= \frac{100 \text{ g/mol}}{1 \text{ eq/mol}} \\ &= 100 \text{ g/eq} \times 1000 \\ &= 100000 \text{ mg as CaCO}_3 \end{aligned}$$

$$\text{Hardness calcium} = \frac{2.77 \text{ (mL)} \times 0.0101 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right) \times 100000 \left(\frac{\text{mg as CaCO}_3}{\text{mol}}\right)}{50 \text{ (mL)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานเอกสารนี้เองและขอสงวนสิทธิ์ในเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่าความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง เท่ากับ 55.95 mg/L as  $\text{CaCO}_3$

### ค-5 การคำนวณค่าดัชนีแลงเกลียร์และดัชนีโรนาร์

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = \frac{[\log(\text{TDS})-1]}{10}$$

$$B = [-13.12 \times \log(^{\circ}\text{C}+273)] + 34.55$$

$$C = [\log(\text{Ca}^{2+})] - 0.4$$

$$D = [\log(\text{Alk})]$$

$$\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

$$\text{RI} = 2\text{pH}_s - \text{pH}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ตารางที่ ค-3 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำตัวอย่าง

ประเภทน้ำ ตัวอย่าง	pH	Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	TDS (mg/L)	Alkalinity (mg/L as $\text{CaCO}_3$ )	Calcium Hardness (mg/L as $\text{CaCO}_3$ )
น้ำประปา	7.43	29.1	123.7	80.22	62.62

แทนค่า

$$A = \frac{[\log(123.7) - 1]}{10} = 0.11$$

$$B = [-13.12 \times \log(29.1+273)] + 34.55 = 2.01$$

$$C = [\log(62.62)] - 0.4 = 1.40$$

$$D = [\log(80.22)] = 1.90$$

$$\text{pH}_s = (9.3 + 0.11 + 2.01) - (1.40 + 1.90) = 8.12$$

$$\text{LSI} = 7.43 - 8.12 = -0.69$$

$$\text{RI} = 2(-0.69) - 7.43 = 8.81$$

ดังนั้น น้ำประปามีค่าพีเอช 7.43 ค่าพีเอชที่อิ่มตัวด้วยหินปูน 8.12 มีค่าดัชนีแลงเกลียร์ -0.69 และดัชนีโรนาร์ 8.81 นั่นคือสมบัติของน้ำประปาเมื่อดัชนีแลงเกลียร์มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีแนวโน้มในการกัดกร่อนโลหะแต่ไม่เกิดการตกตะกอนของหินปูน และดัชนีโรนาร์มีค่ามากกว่า 7 แสดงว่าน้ำมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ผลการทดลองทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยโปรแกรม Mini-tab

#### ง-1 อัตราการเติมแก๊สคลอรีน

ทำการศึกษาค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำของน้ำที่ไหลออกจาก Service tank (SWE) ในกรณีที่มีการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0, 25 และมากกว่า 25 g/hr. ทำการทดลองอย่างละ 7 ชั่วโมง โดยคาดการณ์ว่าทั้ง 3 กรณีที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำต่างกัน

#### Tukey Pairwise Comparisons

##### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
25	7	3.729	A
มากกว่า 25	7	3.4000	A B
0	7	2.739	B

Means that do not share a letter are significantly different.

#### Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบอัตราการเติมแก๊สคลอรีนทางสถิติ โดยใช้ One way Anova ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งอัตราการเติมแก๊สคลอรีนทั้งหมด 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่1 (กลุ่มA) คือ การเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 25 และมากกว่า 25 g/hr. กลุ่มที่2 (กลุ่มB) คือ การเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0 และมากกว่า 25 g/hr. จึงสรุปได้ว่าค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำของการเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 0 และ 25 g/hr. แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ดังนั้น การเติมแก๊สคลอรีนด้วยอัตรา 25 และมากกว่า 25 g/hr. มีผลทำให้ค่าดัชนีของสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ง-2 ผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำที่ไหลเข้าและออกจาก Service tank

ทำการศึกษาผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 และ 25 g/hr. ซึ่งทำการทดลองอย่างละ 7 ชั่วโมง โดยคาดการณ์ว่าทั้ง 2 กรณีที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำต่างกัน

### Tukey Pairwise Comparisons

#### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
25	7	0.001663	A
0	7	0.000000	B

Means that do not share a letter are significantly different.

#### Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบค่าผลต่างปริมาณไอออนของเหล็กทางสถิติ โดยใช้ One way Anova ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งค่าผลต่างปริมาณไอออนของเหล็กทั้งหมด 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่1 (กลุ่มA) คือ ผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำของน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 25 g/hr. กลุ่มที่2 (กลุ่มB) คือ ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 g/hr. จึงสรุปได้ว่าค่าผลต่างปริมาณไอออนของเหล็กในน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 และ 25 g/hr. แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

### ง-3 ค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดของน้ำที่ไหลเข้าและออกจาก Service Tank กรณีที่ไม่มีการเติมแก๊สคลอรีน

ทำการศึกษาปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดของน้ำที่ไหลเข้า (SWI) และไหลออก (SWE) จาก Service Tank ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 g/hr. ซึ่งทำการทดลองอย่างละ 7 ชั่วโมง โดยคาดการณ์ว่าทั้ง 2 กรณีที่ไม่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดที่ต่างกัน

#### Tukey Pairwise Comparisons

##### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
0.SWI	7	0.003460	A
0.SWE	7	0.003311	A

Means that do not share a letter are significantly different.

##### Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดทางสถิติ โดยใช้ One way Anova ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดเป็นกลุ่มเดียว คือ กลุ่ม A เป็นกลุ่มของน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และไหลออกจาก Service Tank (SWE) จึงสรุปได้ว่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาดที่ผ่านการวัดค่า SDI แล้ว ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 g/hr. ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

#### ง-4 ค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรองของน้ำที่ไหลเข้าและออกจาก Service Tank ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 25 g/hr.

ทำการศึกษ ปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรองของน้ำที่ไหลเข้า (SWI) และไหลออก (SWE) จาก Service Tank ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 25 g/hr. ซึ่งทำการทดลองอย่างละ 7 ชั่วโมง โดยคาดการณ์ว่าทั้ง 2 กรณีที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรองที่ต่างกัน

#### Tukey Pairwise Comparisons

##### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
25.SWE	7	0.003873	A
25.SWI	7	0.002840	B

Means that do not share a letter are significantly different.

##### Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรองทางสถิติ โดยใช้ One way Anova ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรอง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่1 (กลุ่มA) คือ กลุ่มของน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) และกลุ่มที่2 (กลุ่มB) คือ กลุ่มของน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) จึงสรุปได้ว่าค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระตาขกรองที่ผ่านการวัดค่า SDI แล้ว ที่อัตราการเติมแก๊สคลอรีน 25 g/hr. แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%

## ง-5 ผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงที่น้ำไหลเข้าและออกจาก Service tank

ทำการศึกษาค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงที่น้ำไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 และ 25 g/hr. ซึ่งทำการทดลองอย่างละ 7 ชั่วโมง โดยคาดการณ์ว่าทั้ง 2 กรณีที่แตกต่างกันจะมีผลทำให้ค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงต่างกัน

### Tukey Pairwise Comparisons

#### Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
25	7	0.001029	A
0	7	-0.000143	B

Means that do not share a letter are significantly different.

#### Tukey Simultaneous 95% CIs

จากการเปรียบเทียบค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงทางสถิติ โดยใช้ One way Anova ในการทดสอบและเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธีของ Tukey จะเห็นได้ว่าสามารถแบ่งค่าผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงทั้งหมด 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่1 (กลุ่มA) คือ ผลต่างค่าปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงของน้ำที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 25 g/hr. กลุ่มที่2 (กลุ่มB) คือ ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 g/hr. จึงสรุปได้ว่าค่าผลต่างปริมาณไอออนของเหล็กบนกระดาศกรงที่ไหลเข้า Service Tank (SWI) และน้ำที่ไหลออกจาก Service Tank (SWE) ด้วยอัตราการเติมแก๊สคลอรีนที่ 0 และ 25 g/hr. แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95%