



การลดกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบจากลุ่มน้ำ
คลองอุตะเกาศด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
Reduction of Organic Matter Fractions and Quantity of Organic Nitrogen
in Raw Water from Khlong U-Tapao River Basin by Coagulation

พนวรรณ ทองช่าง
Phanawan Tongchang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Prince of Songkla University

2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบจากกลุ่มน้ำ
 คลองอุต๊ะเก่าด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
 ผู้เขียน นางสาวพนวรรณ ทองช่าง
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์) (รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชน์ไพบุลย์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์) (รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 สิ่งแวดล้อม

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวพนวรรณ ทองช่าง)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวพนวรรณ ทองช่าง)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การลดกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน
ผู้เขียน	นางสาวพนวรรณ ทองช่าง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) สารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fraction, TPI) และกลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) ในน้ำดิบจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) และการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) ตลอดจนศึกษาผลของปริมาณสารอินทรีย์และปริมาณ DON ต่อโอกาสการก่อตัวของสาร *N*-nitrosodimethylamine (*N*-nitrosodimethylamine formation potential, NDMAFP) งานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้งจากอ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองทลาลาดตอนน้ำดิบและน้ำประปาจากระบบประปาสะเดา ระบบประปาพะตง-พังงา และระบบประปาหาดใหญ่บริเวณคลองอู่ตะเภา โดยนำน้ำดิบจากระบบประปาหาดใหญ่มาทดลองการลดสารอินทรีย์ด้วยการโคแอกกูเลชันและการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชัน น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC และ DON อยู่ในช่วง 1.8-2.3 mg/L และ 0.04-0.11 mg-N/L ตามลำดับ ส่วนน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภามีค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 2.0-3.9 mg/L และ ตรวจไม่พบ-1.12 mg-N/L ตามลำดับ น้ำประปามีค่า DOC และ DON อยู่ในช่วง 1.4-3.2 mg/L และ 0.06-1.07 mg-N/L ตามลำดับ น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่า HPO TPI และ HPI โดยเฉลี่ยร้อยละ 43 23 และ 34 ตามลำดับ ส่วนน้ำจากคลองอู่ตะเภามีค่าโดยเฉลี่ยร้อยละ 48 20 และ 32 ตามลำดับ การใช้ PACl 40 mg/L ที่ค่าพีเอช 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดสารอินทรีย์ โดยลด DOC ได้โดยเฉลี่ยจาก 3.0 mg/L เหลือ 1.9 mg/L และลด DON ได้โดยเฉลี่ยจาก 0.72 mg-N/L เหลือ 0.43 mg-N/L คิดเป็นร้อยละ 36 และ 39 ตามลำดับ ที่สภาวะดังกล่าวลด HPO และ HPI ได้โดยเฉลี่ยร้อยละ 28 และ 25 ตามลำดับ การใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L ที่ค่าพีเอช 7 ลดค่า DOC และ DON ในน้ำโดยเฉลี่ยเหลือ 1.7 mg/L และ 0.53 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละ 45 และ 21 ตามลำดับ การเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันโดยการใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L สามารถลดค่า HPO และ HPI ได้ดีกว่าการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว โดยลด HPO ได้เฉลี่ยร้อยละ 42 และลด HPI ได้เฉลี่ยร้อยละ 46 การตรวจวัดการปนเปื้อนของสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ *N*-nitrosodimethylamine, *N*-nitrosomethylethylamine, *N*-nitrosodiethylamine, *N*-nitrosodipropylamine, *N*-nitrosopiperidine, *N*-nitrosodi-n-butylamine, *N*-nitrosopyrrolidine, *N*-nitrosomorpholine และ *N*-nitrosodiphenylamine ในน้ำดิบและน้ำประปาพบว่าตรวจไม่พบสารดังกล่าวที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 300 ng/L ส่วนการตรวจวัดปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ในน้ำดิบ น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน รวมถึงน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ปรากฏว่าตรวจไม่พบสาร NDMA และ NDMAFP ที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการตรวจวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 237 ng/L

Thesis Title	Reduction of Organic Matter Fractions and Quantity of Organic Nitrogen in Raw Water from Khlong U-Tapao River Basin by Coagulation
Author	Miss Phanawan Tongchang
Major Program	Environmental Engineering
Academic Year	2015

ABSTRACT

This research is aimed at reducing amounts of dissolved organic nitrogen (DON), dissolved organic carbon (DOC), hydrophilic organic fraction (HPI), transphilic organic fraction (TPI), and hydrophobic organic fraction (HPO) in the raw water from the Khlong U-Tapao River Basin, Hatyai, Songkhla, Thailand by polyaluminium chloride (PACl) coagulation and enhanced PACl coagulation with powder activated carbon (PAC). Effects of organic matter fractions and DON on *N*-nitrosodimethylamine formation potential (NDMAFP) were investigated. Water samples were collected twice from the Sadao Reservoir and Khlongla Reservoir and from the raw water and water supply of the Sadao Water Treatment Plant (WTP), Patong-Pangla WTP, and Hat Yai WTP at the U-Tapao canal. The raw water of Hat Yai WTP was used for conducting the coagulation and enhanced coagulation experiments. The DOC and DON of reservoir water ranged from 1.8 to 2.3 mg/L and 0.04 to 0.11 mg-N/L, respectively and those of raw water ranged from 2.0 to 3.9 mg/L and not detected to 1.12 mg-N/L, respectively. The DOC and DON of water supply ranged from 1.4 to 3.2 mg/L and 0.06 to 1.07 mg-N/L, respectively. Average values of percent distribution of HPO, TPI, and HPI of reservoir water were 43, 23 and 34%, respectively, whereas those of canal water were 48, 20 and 32%, respectively. The PACl of 40 mg/L at pH 7 as optimal condition reduced DOC from 3.0 to 1.9 mg/L (36% reduction, on average) and DON from 0.72 to 0.43 mg-N/L, (39% reduction, on average). Under such condition, it could reduce HPO and HPI by 28 and 25% on average, respectively. The enhanced coagulation by using PACl 40 mg/L with PAC 60 mg/L at pH 7 reduced DOC and DON to 1.7 mg/L and 0.53 mg-N/L, respectively. Average values of percentage of DOC and DON reduction were 45 and 21%, respectively. The enhanced coagulation by PAC had better performance in removal of HPO and HPI in comparison to PACl coagulation alone. The PACl 40 mg/L with PAC 60 mg/L at pH 7 could reduce HPO and HPI by 42 and 46% on average, respectively. Nine Nitrosamines including *N*-nitrosodimethylamine, *N*-nitrosomethylethylamine, *N*-nitroso diethylamine, *N*-nitrosodi-*n*-propylamine, *N*-nitrosopiperidine, *N*-nitrosodi-*n*-butylamine, *N*-nitrosopyrrolidine, *N*-nitrosomorpholine and *N*-nitrosodiphenylamine in raw water and water supply were not detected at the detection limit of quantity of 300 ng/L. NDMA and NDMAFP of raw water, coagulated water and their HPO, HPI, and TPI were not detected at the detection limit of quantity and method at 237 ng/L.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือจากคณาจารย์หลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ ให้คำปรึกษาปัญหาต่างๆตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆด้วยความเอาใจใส่ ห่วงใย และให้กำลังใจเป็นอย่างดี ทำให้การวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมผล พิชนิไพบูลย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญโญผล และรองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งได้ประสิทธิภาพและความรู้ให้แก่ผู้ทำการวิจัย ให้มีความรู้ความเข้าใจที่ดีตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเภททั่วไปและสิ่งประดิษฐ์ ประจำปี 2555 ภายใต้สัญญาเลขที่ ENG๕๕๐๓๖๙S และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุกท่านที่กรุณาอนุเคราะห์เอกสาร เครื่องมือทดสอบ พื้นที่ในการวิจัย รวมถึงอำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่คอยให้คำปรึกษาและให้การช่วยเหลือด้านงานเอกสารและข้อปฏิบัติในการดำเนินงานวิจัยอย่างดีมาตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่การประสานภูมิภาคสาขาสะเดา สาขาพังงา และสาขาหาดใหญ่ ทุกท่านที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำดิบและน้ำจากระบบประปา

ขอขอบพระคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว ทองช่าง และแซ่ชิต ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนในการศึกษาระดับปริญญาโท ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆและน้องๆ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม รวมถึงผู้ที่คอยให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมด จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญรูป	(14)
คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา	6
2.2 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter, DOM)	10
2.2.1 สารฮิวมิก	11
2.2.2 สาเหตุที่ต้องกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา	13
2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำ	14
2.3.1 สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC)	14
2.3.2 สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON)	14
2.3.3 UV absorbance at wavelength 254-nm (UV-254)	15
2.3.4 Specific Ultraviolet Absorption (SUVA)	15
2.3.5 N-nitrosodimethylamine formation potential (NDMAFP)	16
2.4 กระบวนการ resin fractionation	17
2.5 กระบวนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection)	21
2.6 ผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs)	25
2.6.1 สารไนโตรซามีน (Nitrosamines)	26
2.6.2 ความเป็นพิษของสารไนโตรซามีน	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 สารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (N-nitrosodimethylamine, NDMA)	32
2.6.4 การก่อตัวของสาร NDMA	34
2.6.5 การวิเคราะห์สารไนโตรซามีนและ NDMA	37
2.6.6 การลดการก่อตัวและการกำจัด NDMA	38
2.7 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation)	38
2.7.1 กลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน	40
2.7.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน	42
2.7.3 การดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC)	45
2.7.4 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน	48
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
2.8.1 การตรวจวัดปริมาณ DON และสาร Nitrosamines	49
2.8.2 การก่อตัวของสาร Nitrosamines	51
2.8.3 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	53
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	61
3.1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำและสถานที่ดำเนินการวิจัย	61
3.2 กระบวนการทดลอง	65
3.2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะสารอินทรีย์	65
3.2.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	66
3.3 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	68
3.3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี	68
3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ	68
3.3.3 การวิเคราะห์ห่อนุพันธ์ของสาร Nitrosamines และปริมาณสาร N-nitrosodimethylamine (NDMA)	72
3.3.4 การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA formation potential, NDMAFP)	76
3.3.5 กระบวนการโคแอกกูเลชัน	77
3.3.6 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	84
4.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบและน้ำประปา	84
4.1.1 การกระจายมวลของสารอินทรีย์ละลายน้ำ	93
4.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	99
4.2.1 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)	99
4.2.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	102
4.2.3 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	108
4.3 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines ปริมาณสาร <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) และโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP)	111
4.3.1 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines และปริมาณสาร NDMA ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)	111
4.3.2 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines และปริมาณสาร NDMA ด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD)	115
4.4 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบประปา	125
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	127
5.1 สรุปผลการศึกษา	127
5.2 ข้อเสนอแนะ	128
บรรณานุกรม	130
ภาคผนวก	151
ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์	152
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ TDN, Nitrosamines, NDMA และ NDMAFP ในน้ำดิบและน้ำประปา	153
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	155
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation	162
ภาคผนวก จ การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์	165
ประวัติผู้เขียน	167

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ข้อมูลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบคลองอู่ตะเภาจากงานวิจัยที่ผ่านมา	8
2-2	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก	12
2-3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SUVA กับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน	16
2-4	ลักษณะและกลุ่มทางเคมีของสารอินทรีย์หลังผ่านกระบวนการ resin fractionation	18
2-5	การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยกระบวนการ resin fractionation โดยใช้เรซินชนิดต่างๆ	19
2-6	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิด	29
2-7	ระดับความเป็นพิษของสารกลุ่มไนโตรซามีนต่อหนูจากการทดสอบโดยการให้พร้อมอาหารทางปาก	31
2-8	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ NDMA	32
2-9	ความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำดื่มและน้ำเสีย	34
2-10	การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ	39
2-11	คุณลักษณะทางเคมีของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ตามมาตรฐานของ มอก. 2150-2546	43
3-1	พิกัดจุดเก็บตัวอย่างน้ำ	61
3-2	พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์	68
3-3	สภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-NPD ในการวิเคราะห์ Nitrosamines และ NDMA	73
3-4	คุณลักษณะทางเคมีของโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)	77
3-5	คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	78
3-6	ขอบเขตการทดลองการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	79
4-1	ลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและจุดสูบน้ำดิบประปา	88
4-2	ลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำประปา	92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-3	การกระจายมวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) กึ่งชอบน้ำ (TPI) และไม่ชอบน้ำ(HPO) ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปา	94
4-4	การกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI TPI และ HPO ในน้ำดิบจากแหล่งน้ำในประเทศไทยและต่างประเทศ	96
4-5	ค่า DOC, UV-254, SUVA, DON และประสิทธิภาพในการกำจัด	107
4-6	เปอร์เซ็นต์ความต่างและการกระจายมวลของ DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	109
4-7	ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	110
4-8	สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS สำหรับการวิเคราะห์สารกลุ่ม Nitrosamines 9 ชนิดและสาร NDMA	111
4-9	ค่าแมสสเปกตรัม (m/z) ของสารประกอบ Nitrosamines 9 ชนิด	113
4-10	ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของน้ำดิบ น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ resin fractionation	118
4-11	ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของแหล่งน้ำในต่างประเทศจากงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยครั้งนี้	121
ข-1	ค่า TDN ของน้ำดิบและน้ำประปา	153
ข-2	ชนิดของสาร Nitrosamines ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบ และน้ำประปา	153
ค-1	ค่าความเป็นต่างและความขุ่นของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	155
ค-2	ค่า NH ₃ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ และ TDN ของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	156
ค-3	ค่า DOC และประสิทธิภาพการกำจัด DOC โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	157
ค-4	ค่า UV-254 และประสิทธิภาพการกำจัด UV-254 โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	158
ค-5	ค่า DON และประสิทธิภาพการกำจัด DON โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	159
ค-6	ค่า SUVA และประสิทธิภาพการกำจัด SUVA โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	160

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค-7	ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของน้ำดิบประปาหาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	161
ง-1	ค่า DOC, DON และ NDMAFP ของน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation	162
ง-2	ค่า DOC, DON และ NDMAFP ของน้ำจากการโคแอกกูเลชันที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation	164

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของสารประกอบอิวมิก	12
2-2	การเกิด NDMA ของน้ำตัวอย่างในขณะที่เก็บน้ำตัวอย่างไม่มีคลอรีนอิสระหรือคลอรามิน	17
2-3	การเกิด NDMA ของน้ำตัวอย่างในขณะที่เก็บน้ำตัวอย่างมีคลอรีนอิสระหรือคลอรามิน	17
2-4	ผลของค่าพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ	24
2-5	ผลของค่าพีเอชต่อชนิดของคลอรามิน	24
2-6	การเปรียบเทียบอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคระหว่างคลอรีนรวมและคลอรีนอิสระ	25
2-7	โครงสร้างของสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ	26
2-8	สูตรโครงสร้างของ <i>N</i> -nitrosodimethylamine	32
2-9	การเกิด NDMA จากปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอรามินกับไดเมทิลลามีน	35
2-10	โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้ม	43
2-11	รูปตัดแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายใน Activated carbon	47
3-1	อ่างเก็บน้ำสะเดา	62
3-2	จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา	62
3-3	จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา	63
3-4	อ่างเก็บน้ำคลองหลา	63
3-5	จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่	64
3-6	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาคุณลักษณะของน้ำทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำ	66
3-7	แผนผังแสดงขั้นตอนการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl	67
3-8	แผนผังแสดงขั้นตอนการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)	67
3-9	ชุดอุปกรณ์ dead-end filtration	70
3-10	ขั้นตอนการกรองน้ำด้วยชุดอุปกรณ์ dead-end filtration	70
3-11	ชุดอุปกรณ์สกัด Resprep EPA 521 solid phase extraction	74
3-12	แผนภาพแสดงหลักการสกัดด้วยวิธี Solid phase extraction (SPE)	74
3-13	การโคแอกกูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์	78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-14	การทำความสะอาดเรซินด้วยวิธีการ soxhlet extraction	82
3-15	การแยกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation ด้วยเรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4	83
4-1	ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DOC reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	100
4-2	ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ UV-254 reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	100
4-3	ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DON reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	101
4-4	ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DOC reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	103
4-5	ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ UV-254 reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	104
4-6	ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DON reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	104
4-7	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน Nitrosamines 9 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L วิเคราะห์โดยเครื่อง GC-MS	112
4-8	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L โดยเครื่อง GC-MS	114
4-9	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน N-nitrosodimethylamine (NDMA) ที่ระดับความเข้มข้น 100 µg/L โดยเครื่อง GC-NPD	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4-10	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน Nitrosamines 9 ชนิด Peaks: <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA), <i>N</i> -nitrosomethylethylamine (NMEA), <i>N</i> -nitrosodiethylamine (NDEA), <i>N</i> -nitrosodi-n-propylamine (NDPA), <i>N</i> -nitrosopiperidine (NPip), <i>N</i> -nitrosodi-n-buthylamine (NDBA), <i>N</i> -nitroso-pyrrolidine (NPyr), <i>N</i> -nitrosomorpholine (NMor), <i>N</i> -nitrosodiphenylamine (NDPhA) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L โดยเครื่อง GC-NPD	116
4-11	โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ Nitrosamines 9 ชนิดในน้ำดิบ ประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	117
4-12	โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ NDMAFP _{Cl2} ในน้ำดิบประปา หาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	119
4-13	โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ NDMAFP _{NH2Cl} ในน้ำดิบ ประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2	119
ก-1	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ค่า DOC ที่ความเข้มข้น 0-3 mg/L	152
ก-2	กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ค่า DOC ที่ความเข้มข้น 0-10 mg/L	152

คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์

µg/L	Microgram per liter
µL	Microliter
µm	Micrometer
µs/cm	Microsiemens per centimeter
AOPs	Advanced oxidation process
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CDPH	California Department of Public Health
cm	Centimeter
COM	Colloidal organic matter
C-DBPs	Carbonaceous disinfection by-products
DBA	Dibutylamine
DBPs	Disinfection by-products
DBPFP	Disinfection by-product formation potential
DEA	Diethylamine
DIN	Dissolved inorganic nitrogen
DMA	Dimethylamine
DMS	Dimethylsulfamide
DO	Dissolved oxygen
DOC	Dissolved organic carbon
DOC _{HPI}	Dissolved organic carbon of hydrophilic organic fraction
DOC _{HPO}	Dissolved organic carbon of hydrophobic organic fraction
DOC _{TPI}	Dissolved organic carbon of transphilic organic fraction
DOM	Dissolved organic matter
DON	Dissolved organic nitrogen
DPD	<i>N, N</i> -diethyl- <i>p</i> -phenylenediamine
FEEM	Fluorescent excitation-emission matrix
FTIR	Fourier Transformed Infrared Spectroscopy
GAC	Granular activated carbon
GC	Gas chromatography
GC-NPD	Gas chromatography with nitrogen phosphorus detector
GC-HRMS	Gas chromatography with high resolution mass spectrometry
GC-MS	Gas chromatography mass spectrometry
GC-MS/MS	Gas chromatography tandem mass spectrometry

คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

GC-TEA	Gas chromatography with thermal energy analyzer
GV	Guideline value
HAAs	Haloacetic acids
HAcAms	Haloacetamides
HANs	Haloacetonitriles
HNMs	Halonitromethanes
HPI	Hydrophilic organic fraction
HPLC-MS/MS	High performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry
HPO	Hydrophobic organic fraction
IARC	International Agency for Research on Cancer
IRIS	Information Risk Information System
kDa	Kilodalton
LC	Liquid chromatography
L/mg-m	Liter per milligram-meter
LLE	Liquid-liquid extraction
MW	Molecular weight
mg	Milligram
mL	Milliliter
mm	Millimeter
mg/L	Milligram per liter
mg/L as CaCO ₃	Miligram per liter as calcium carbonate
N.A.	Not available
NAWQA	National Aquatic Water Quality Assessment
N.D.	Not detected
NF	Nanofiltration
ng	Nanogram
ng/L	Nanogram per liter
NH ₃	Ammonia
NO ₃ ⁻	Nitrate
NO ₂ ⁻	Nitrite
N-DBPs	Nitrogenous disinfection by-products
NDMAFP	<i>N</i> -nitrosodimethylamine formation potential
NDBA	<i>N</i> -nitroso-di- <i>n</i> -butylamine

คำย่อและคำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

NDEA	<i>N</i> -nitrosodiethylamine
NDMA	<i>N</i> -nitrosodimethylamine
NDPA	<i>N</i> -nitroso-di- <i>n</i> -propylamine
NDPhA	<i>N</i> -nitroso-di-phenylamine
NMEA	<i>N</i> -nitrosomethylethylamine
NMor	<i>N</i> -nitrosomorpholine
NPip	<i>N</i> -nitrosopiperidine
NPyr	<i>N</i> -nitrosopyrrolidine
NOM	Natural organic matter
NTU	Nepheo turbidity unit
°C	Celsius degree
PAC	Powder activated carbon
PACL	Polyaluminium chloride
POM	Particulate organic matter
ppm	Part per million
RO	Reverse osmosis
SPE	Solid phase extraction
SPME	Solid phase micro-extraction
SUVA	Specific ultraviolet absorption
TDN	Total dissolved nitrogen
THMFP	Trihalomethane formation potential
TPI	Transphilic organic fraction
TNDMA	Total <i>N</i> -nitrosodimethylamine
TNDMA ₀	Total <i>N</i> -nitrosodimethylamine ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง
TNDMAFP	Total <i>N</i> -nitrosodimethylamine formation potential
TNDMA _T	Total <i>N</i> -nitrosodimethylamine ณ เวลาใดๆ
TOC	Total organic carbon
UPLC-MS/MS	Ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry
U.S.EPA	United states environmental protection agency
UV-254	Ultraviolet absorbance at wavelength-254 nm
WHO	World health organization
Z _p	Zeta potential

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิต มนุษย์ใช้ประโยชน์จากน้ำอย่างหลากหลายทั้งด้านการอุปโภคบริโภค การเกษตรกรรม รวมถึงอุตสาหกรรม ปัจจุบันน้ำที่นำมาใช้ในการอุปโภคบริโภคและอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือน้ำประปา ดังนั้นระบบประปาจึงนับเป็นแหล่งผลิตน้ำที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง การได้มาซึ่งน้ำประปาที่สะอาดและมีคุณภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา น้ำดิบที่ดีต้องเป็นน้ำที่มีการปนเปื้อนน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการผลิตที่มีความยุ่งยากซับซ้อนหรือมีค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการ แต่ปัจจุบันน้ำดิบประปาโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำผิวดินมักมีสี ความขุ่น และมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์กลุ่มไม่ละลายน้ำและละลายน้ำ ตลอดจนอาจมีจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดอันตรายและไม่ก่อให้เกิดอันตรายปนเปื้อนอยู่ สารปนเปื้อนดังกล่าววันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นและส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำดิบโดยตรง

สารปนเปื้อนที่สำคัญและก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากต่อน้ำดิบและการผลิตน้ำประปา คือ สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter, DOM) และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) สารอินทรีย์ละลายน้ำนั้นเมื่อทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนในระบบฆ่าเชื้อโรคของการผลิตประปาก็ทำให้เกิดสาร disinfection by-products (DBPs) เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) สารฮาโลอะซิติกแอซิด (haloacetic acids, HAAs) และสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (haloacetonitriles, HANs) ซึ่งเป็นสารที่มีโอกาสก่อให้เกิดมะเร็ง (Rook, 1974; Marhaba and Washington, 1998) United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) กำหนดค่ามาตรฐานสารไตรฮาโลมีเทนสำหรับน้ำดื่มโดยผลรวมของสารประกอบไตรฮาโลมีเทน 4 ชนิด ได้แก่ คลอโรฟอร์ม (chloroform) โบรโมไดคลอโรมีเทน (bromodichloromethane) ไดโบรโมคลอโรมีเทน (dibromochloromethane) และโบรโมฟอร์ม (bromoform) ต้องไม่เกิน 80 µg/L (U.S.EPA, 2009) องค์การอนามัยโลก (World health organization, WHO, 1998) กำหนดค่า guideline value (GV) ของ คลอโรฟอร์ม โบรโมไดคลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และ โบรโมฟอร์มที่ 300 60 100 และ 100 µg/L ตามลำดับ นอกจากนี้ องค์การอนามัยโลกได้กำหนดค่ามาตรฐานผลรวมของอัตราส่วนความเข้มข้นต่อค่า guideline value ของคลอโรฟอร์ม โบรโมไดคลอโรมีเทน ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม ควรมีค่าไม่เกิน 1 ในด้านความเป็นพิษ โบรโมไดคลอโรมีเทนมีอันตรายมากกว่าคลอโรฟอร์ม อย่างไรก็ตามคลอโรฟอร์มมีความเข้มข้นสูงกว่าสารประกอบไตรฮาโลมีเทนชนิดอื่น

สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ มักพบได้ในแหล่งน้ำมีการปนเปื้อนของน้ำเสีย สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำส่วนใหญ่อยู่ในสารประกอบพวกโปรตีนและยูรีนซึ่งมักพบในน้ำเสียชุมชน (วารสารการประปานครหลวง อ้างอิงโดย การประปาส่วนภูมิภาค, 2552) เมื่อมีการทิ้งน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้เป็นน้ำดิบประปา เช่น น้ำจากแม่น้ำและคลองที่ไหลผ่านชุมชน โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารประกอบไนโตรเจนเป็นสารตั้งต้นของการผลิต หรือพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้สารฆ่าแมลงรวมถึงปุ๋ยเคมีที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ปัจจัยเหล่านี้ทำให้ระบบประปาต้องเผชิญปัญหาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยปัญหาที่ตามมาจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำในน้ำดิบประปา คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนหรือคลอรามินซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปาก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็งที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nitrogenous disinfection by-products, N-DBPs) ได้แก่ ไนโตรซามีน (nitrosamines) และอนุพันธ์ ประกอบด้วย เอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (*N*-nitrosodimethylamine, NDMA) เอ็น-ไนโตรโซเมทิลเอทิลลามีน (*N*-nitrosomethylethylamine, NMEA) เอ็น-ไนโตรโซไดเอทิลลามีน (*N*-nitrosodiethylamine, NDEA) เอ็น-ไนโตรโซได-*n*-โพรพิลลามีน (*N*-nitroso-di-*n*-propylamine, NDPA) เอ็น-ไนโตรโซได-*n*-บิวทิลลามีน (*N*-nitroso-di-*n*-butylamine, NDPA) เอ็น-ไนโตรโซได-ฟีนิลลามีน (*N*-nitroso-di-phenylamine, NDPhA) เอ็น-ไนโตรโซไพโรลิดีน (*N*-nitrosopyrrolidine, NPyr) เอ็น-ไนโตรโซไพเพอริดีน (*N*-nitrosopiperidine, NPip) เอ็น-ไนโตรโซมอร์โฟลีน (*N*-nitrosomorpholine, NMOR) ตลอดจน ฮาโลไนโตรอัลเคน (halonitroalkane) และ ฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (haloacetonitrile) เป็นต้น

สารก่อมะเร็งเหล่านี้มีความเป็นพิษต่ออินและเซลล์สูงกว่าสารก่อมะเร็งในกลุ่มไตรฮาโลมีเทน และฮาโลอะซิติกแอซิด (Lee *et al.*, 2007; Plewa *et al.*, 2009) จากฐานข้อมูล Integrated Risk Information System (IRIS) ของ U.S.EPA การรับสาร NDMA ทางปากมีค่าโอกาสการก่อให้เกิดมะเร็งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มประมาณ 600 เท่า เมื่อกำหนดให้ความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งตลอดช่วงชีวิตเท่ากับ 10^{-6} ค่า NDMA ในน้ำดื่มควรมีค่าต่ำกว่า 0.7 ng/L (EPA IRIS, 1993 อ้างอิงโดย U.S.EPA, 2014) The California Department of Health Services กำหนด notification level ของ NDMA, NDPA และ NDEA ไว้เท่ากับ 10 ng/L (CDPH, 2010) และองค์การอนามัยโลกกำหนดค่า guideline value (GV) ของ NDMA ในน้ำดื่มที่ 100 ng/L (WHO, 2008) จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการปนเปื้อนของสาร N-DBPs ในน้ำประปาจะส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคเป็นอย่างยิ่ง และสารที่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานได้แก่ สาร NDMA เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจากการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของสารไนโตรซามีนในน้ำ NDMA เป็นสารที่ตรวจพบได้บ่อยและมีความเข้มข้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารกลุ่มไนโตรซามีนชนิดอื่น (Nawrocki and Andrzejewski, 2011; Bond *et al.*, 2011)

โดยทั่วไประบบผลิตน้ำประปาในประเทศไทย ประกอบด้วย การโคแอกกูเลชัน โดยสารส้มหรือสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ การตกตะกอน การกรอง และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

โดยการดำเนินการมีได้มุ่งเน้นกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ ส่งผลให้สารดังกล่าวทำปฏิกิริยากับคลอรีนก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งได้ การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเพิ่มปริมาณสารโคแอกกูแลนต์กำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยการเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำมีค่าสูงกว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว (Musikavong *et al.*, 2013) อย่างไรก็ตามการศึกษากำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำด้วยการเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีการดำเนินการค่อนข้างน้อยในประเทศไทย

คลองอู่ตะเภาเป็นน้ำสายหลักในจังหวัดสงขลา มีการใช้ประโยชน์จากลำน้ำในหลายกิจกรรมไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและการผลิตน้ำประปา ปัจจุบันระบบประปาหลักใช้น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภาโดยจุดสูบน้ำดิบตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำของคลองอู่ตะเภา ดังนั้นกิจกรรมต่างๆที่มีการทิ้งมลพิษลงสู่คลองอู่ตะเภาไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากชุมชน เกษตรกรรม และ อุตสาหกรรม จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำดิบประปาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จากการทบทวนเอกสารพบว่า น้ำดิบประปาจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ละลายน้ำ และมีค่าโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนสูงเมื่อเทียบกับแหล่งน้ำดิบประปาแหล่งอื่นๆในประเทศไทย (จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ คณะ 2555) นอกจากนี้จากการวิเคราะห์น้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาที่ บ้านม่วงก้อง บ้านบางศาลา และ จุดสูบน้ำดิบประปา มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ไนโตรเจน ร้อยละ 18 18 และ 3 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในฤดูฝน และ ร้อยละ 23 22 และ 11 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในฤดูแล้งตามลำดับ (Musikavong and Wattanachira, 2013) อย่างไรก็ตามการศึกษาผลของกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบประปาต่อโอกาสการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน ตลอดจนการกำจัดกลุ่มสารอินทรีย์ไนโตรเจนด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำดิบประปาที่มีปนเปื้อนน้ำเสียและน้ำทิ้งยังมีการดำเนินการค่อนข้างน้อย

จากปัญหาคุณภาพน้ำดิบประปาบริเวณจุดสูบน้ำดิบประปาในปัจจุบันก่อให้เกิดแนวคิดและความจำเป็นที่ต้องปรับเปลี่ยนจุดสูบน้ำดิบประปาไปยังบริเวณต้นน้ำเพื่อลดการปนเปื้อนของสารมลพิษและลดศักยภาพการก่อตัวของสารก่อมะเร็งจากสารอินทรีย์กลุ่มสารต่างๆ และสารอินทรีย์ไนโตรเจน การศึกษาถึงผลของกลุ่มสารอินทรีย์และปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำดิบประปาจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาต่อโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA ของตัวอย่างน้ำบริเวณต้นน้ำจึงมีความจำเป็นสำหรับระบบประปาในอนาคต นอกจากนี้การศึกษาลดสารอินทรีย์กลุ่มต่างๆ สารอินทรีย์ไนโตรเจน และ โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) ที่ใช้กันโดยทั่วไปในกระบวนการผลิตน้ำประปาของประเทศไทย และการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงก็มีความสำคัญเช่นกัน โดยผลการศึกษาที่ได้ทั้งหมดสามารถนำไปใช้เป็น

ข้อมูลในการติดตาม ตรวจสอบ ป้องกัน และลดโอกาสการก่อตัวของสารก่อมะเร็งในน้ำประปาได้เป็นอย่างดี

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์กลุ่มสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นสารตั้งต้นของสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (N-DBPs) ในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา

2. เพื่อศึกษาการลดกลุ่มสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. แหล่งน้ำที่ทำการศึกษาวิจัยคือ แหล่งน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภา อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2. เก็บตัวอย่างน้ำ 2 ครั้ง จากจุดเก็บน้ำดิบ 5 จุด คือ บริเวณอ่างเก็บน้ำสะเดา จุดสูบน้ำดิบของการประปาสะเดา-ปาดังเบซาร์ จุดสูบน้ำดิบของการประปาพะตง-พังงา อ่างเก็บน้ำคลองหลา และบริเวณจุดสูบน้ำดิบของระบบประปาหาดใหญ่ ตลอดจนเก็บน้ำที่ออกจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของ การประปาสะเดา-ปาดังเบซาร์ การประปาพะตง-พังงา และ การประปาหาดใหญ่ เพิ่มเติม 3 จุด

3. ศึกษาคุณลักษณะของน้ำดิบประปาและน้ำที่ออกจากระบบประปา ประกอบด้วย ความขุ่น (turbidity) อุณหภูมิ (temperature) พีเอช (pH) ความเป็นด่าง (alkalinity) แอมโมเนีย (NH_3) ไนเตรต (NO_3^-) ไนไตรต์ (NO_2^-) สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) Ultraviolet Absorbance at wavelength 254 nm (UV-254) และ Specific Ultraviolet Adsorption (SUVA)

4. การวิเคราะห์อนุพันธ์ของ Nitrosamines วิเคราะห์โดยทำการสกัดด้วยวิธี solid phase extraction ตามวิธีมาตรฐาน EPA Method 521 (Munch and Basset, 2004) และตรวจวัดด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD)

5. การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของ NDMA (NDMA formation potential, NDMAFP) โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (Standard Method, 2000)

6. กระบวนการ Resin Fractionation โดยใช้เรซิน DAX-8/XAD-4 ใช้เพื่อแยกสารอินทรีย์ออกเป็นสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fractions, HPO)

สารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fractions, TPI) และสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fractions, HPI)

7. การทดลองโคแอกกูเลชันทำการทดลองด้วยเครื่องจาร์เทส โดยใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆกันและควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันโดยการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจนละลายน้ำ และกลุ่มของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำดิบและน้ำประปา ประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ร่วมกับถ่านกัมมันต์ชนิดผงในการลดกลุ่มสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในโตรเจนละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการก่อตัวของสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (N-DBPs) ตลอดจนผลของสารอินทรีย์ในโตรเจนละลายน้ำและกลุ่มสารอินทรีย์ต่อการก่อตัวของสาร N-DBPs การได้มาซึ่งข้อมูลดังกล่าวข้างต้นก่อให้เกิดแนวทางและวิธีการเพื่อการพัฒนากระบวนการปรับปรุงการผลิตน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นและมีคุณภาพน้ำที่ดี มีการปนเปื้อนสารตั้งต้นที่จะก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็งน้อยลง เมื่อมีการนำไปใช้ในระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภาจะส่งผลดีต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนที่ใช้น้ำประปาในการอุปโภคบริโภค นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปนเปื้อนสาร N-DBPs ในแหล่งน้ำต่อไปในอนาคตได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลุ่มน้ำคลองอุตะเถา

กลุ่มน้ำคลองอุตะเถาเป็นกลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา มีพื้นที่ประมาณ 2,840 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 7 อำเภอได้แก่ อำเภอสะเดา อำเภอนาหม่อม อำเภอหาดใหญ่ อำเภอกลองหยอง อำเภอบางกล่ำ อำเภอรัตภูมิ และอำเภอควนเนียง โดยมีลำน้ำที่สำคัญคือ คลองอุตะเถา ซึ่งเป็นลำน้ำที่ใหญ่ที่สุดในจังหวัดสงขลา คลองอุตะเถามีความกว้างของผิวน้ำในหน้าแล้งโดยเฉลี่ย บริเวณต้นน้ำ 6-15 เมตร กลางน้ำ 15-30 เมตร มีความลึก 2-5 เมตร มีพื้นที่รับน้ำ 1,600 ลูกบาศก์กิโลเมตร คลองอุตะเถาไหลจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ โดยมีจุดเริ่มต้นจากชายแดนไทย-มาเลเซียไปสิ้นสุดที่ทะเลสาบสงขลาตอนล่าง รวมความยาวประมาณ 130 กิโลเมตร ปัจจุบันคลองอุตะเถาเป็นแหล่งรองรับน้ำเสีย ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งตั้งอยู่ตลอดแนวสองฝั่งคลอง รวมถึงน้ำเสียจากชุมชนและการทำเกษตรกรรม (ชาคริต โภชะเรือง และ เทพกิตต์ กำเนิดไพรวลัย, 2550) จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้น้ำในคลองอุตะเถามีการปนเปื้อนสารมลพิษ โดยจากการประเมินคุณภาพน้ำโดยใช้ดัชนีคุณภาพน้ำทั่วไปเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำผิวดินพบว่าคุณภาพน้ำคลองอุตะเถาอยู่ในเกณฑ์พอใช้ถึงค่อนข้างเสื่อมโทรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการติดตามและตรวจสอบคุณภาพน้ำอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากคลองอุตะเถาเป็นแหล่งน้ำดิบหลักของการประปาที่ใช้ผลิตน้ำประปาจำหน่ายแก่ประชาชนทั่วไปทั้งในเขตเทศบาลนครหาดใหญ่และเทศบาลเมืองสงขลา (ชาคริต โภชะเรือง และ เทพกิตต์ กำเนิดไพรวลัย, 2550) โดยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการติดตามและวิเคราะห์คุณภาพน้ำรวมถึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางในการกำจัดและป้องกันสารปนเปื้อนในน้ำคลองอุตะเถาอย่างต่อเนื่อง

ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในคลองอุตะเถาจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงดังตารางที่ 2-1 น้ำดิบคลองอุตะเถามีสภาพค่อนข้างเป็นกลางถึงด่างเล็กน้อยโดยมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.7-9.6 เนื่องจากมีการกำหนดค่ามาตรฐานของพีเอชในแหล่งน้ำผิวดินควรมีค่าอยู่ในช่วง 5-9 (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) จึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบคลองอุตะเถาส่วนใหญ่มีค่า พีเอชอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 27-34 องศาเซลเซียส ความขุ่นมีค่าอยู่ในช่วง 1.9-290 NTU โดยน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีความขุ่นต่ำกว่าน้ำจากลำคลอง ความเป็นด่างมีค่าอยู่ในช่วง 12-27 mg/L as CaCO₃ ออกซิเจนละลายมีค่าอยู่ในช่วง 4.1-7.8 mg/L ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดให้น้ำผิวดินประเภทที่ 3 และ 4 ควรมีค่าออกซิเจนละลายไม่ต่ำกว่า 4.0 และ 2.0 mg/L ตามลำดับ (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537) ของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ในช่วง 3.4-272 mg/L ในเทรตมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-4.3 mg-N/L เนื่องจากมีการกำหนดค่ามาตรฐานของ

ไนเตรตในน้ำผิวดินประเภทที่ 3 และ 4 ต้องมีค่าไม่เกิน 5.0 mg-N/L จึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบคลองอู่ตะเภามีค่าไนเตรตต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ พิจารณาจากดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ได้แก่ สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกและอะโรมาติก ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm (UV-254) เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกซึ่งดูดกลืนแสง UV ได้ดีที่ความยาวคลื่น 254 nm และค่าการดูดกลืนแสงยูวีจำเพาะ (specific ultraviolet adsorption, SUVA) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า UV-254/DOC ใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำทั้งหมด จากตารางที่ 2-1 พบว่าน้ำดิบคลองอู่ตะเภามีค่า DOC อยู่ในช่วง 2.9-10.7 mg/L โดยน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC ต่ำกว่าน้ำจากลำคลอง และน้ำจากจุดสูบน้ำดิบมีค่า DOC สูงที่สุด ค่า UV-254 ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.072-0.189 cm^{-1} ซึ่งต่ำกว่าน้ำจากลำคลองซึ่งมีค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.112-0.414 cm^{-1} ส่วนค่า SUVA มีค่าอยู่ในช่วง 1.1-8.4 L/mg-m เมื่อพิจารณาจากช่วงเวลาเก็บตัวอย่างน้ำพบว่าน้ำดิบคลองอู่ตะเภาที่เก็บในช่วงเดือนตุลาคมมีปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงกว่าน้ำดิบที่เก็บในช่วงเดือนมีนาคม ทั้งนี้เนื่องจากเดือนตุลาคมเป็นช่วงฤดูฝนจึงอาจกล่าวได้ว่าน้ำท่าชะเอา สารอินทรีย์ลงสู่แหล่งน้ำทำให้มีสารอินทรีย์ละลายน้ำปนเปื้อนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณา ค่าโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethane formation potential, THMFP) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 157-750 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งน้ำที่มีปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงมีแนวโน้มก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทนในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบคลองอู่ตะเภาจากงานวิจัยที่ผ่านมา

แหล่งน้ำดิบ	ช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์							คุณลักษณะและปริมาณสารอินทรีย์			
		พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ความขุ่น (NTU)	ความเป็นต่าง	ออกซิเจนละลาย (mg/L)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ไนเตรต (mg-N/L)	DOC (mg/L)	UV-254 (cm ⁻¹)	SUVA (L/mg-m)	THMFP (µg/L)
จุดสูบน้ำดิบ	ก.ย. 2551	6.9	-	290	24	-	272	-	10.7	0.112	1.1	750
	เม.ย. 2552	6.7	-	22	26	-	66	-	6.9	0.228	3.3	557
	ก.ค. 2553	6.8	-	23	26	-	60	-	4.5	0.238	5.3	597
อ่างเก็บน้ำสะเดา	ต.ค. 2552	7.0	30	1.9	12	7.2	12	0.1	4.9	0.072	1.5	280
	มี.ค. 2553	6.7	27	6.1	14	7.0	3.4	0.3	2.9	0.058	2.0	212
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	ต.ค. 2552	8.2	31	6.2	15	7.1	23	0.2	4.2	0.189	4.5	238
	มี.ค. 2553	8.6	30	7.1	21	7.8	3.7	0.2	3.3	0.117	3.5	157
บ้านม่วงกึ่ง	ต.ค. 2552	6.7	28	17	15	5.5	29	1.4	3.9	0.202	5.2	237
	มี.ค. 2553	7.0	31	62	18	4.5	53	0.2	4.9	0.249	5.1	165
บ้านบางศาลา	ต.ค. 2552	6.8	28	20	18	4.8	40	1.1	4.9	0.252	5.1	246
	มี.ค. 2553	7.4	29	36	22	6.6	43	4.3	5.1	0.208	4.1	189
จุดสูบน้ำดิบ	ต.ค. 2552	6.9	29	24	22	6.5	64	1.4	5.1	0.414	8.1	729
	มี.ค. 2553	7.4	32	23	24	6.0	14	4.3	5.5	0.159	2.8	508
บ้านหาดใหญ่ใน	ต.ค. 2552	6.9	28	21	18	4.1	58	1.1	4.4	0.371	8.4	435
	มี.ค. 2553	9.6	34	36	27	6.2	45	1.1	6.2	0.135	2.1	321

หมายเหตุ: ความเป็นต่าง หน่วย mg/L as CaCO₃, (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ที่มา: จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ และชัยศรี สุขสาโรจน์ (2551), จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)

Musikavong *et al.* (2013) ศึกษาโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (THMFP) ในน้ำดิบประปาคลองอุต๊ะเถา จังหวัดสงขลา และ THMFP ของน้ำดิบประปาที่ผ่านการจำแนกกลุ่มของสารอินทรีย์ออกเป็น 2 กลุ่มคือ สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) และสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ครั้งจากจุดสูบน้ำดิบประปาซึ่งตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำ จากการศึกษาพบว่าน้ำดิบประปามีค่า Dissolved organic carbon (DOC) เฉลี่ยเท่ากับ 7.4 mg/L มีค่า THMFP เท่ากับ 630 µg/L ค่า DOC_{HPO} เท่ากับ 3.3 mg/L ค่า DOC_{HPI} เท่ากับ 3.7 mg/L ค่า THMFP_{HPO} เท่ากับ 281 µg/L และมีค่า THMFP_{HPI} เท่ากับ 348 µg/L จากการวิเคราะห์ Fluorescent excitation emission matrix (FEEM) ในน้ำดิบประปาตรวจพบสารอินทรีย์กลุ่ม tryptophan-like substance, humic และ fulvic acid-like substance การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นของ PACl เท่ากับ 40 mg/L พีเอช 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสม โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถลดค่า DOC ได้เฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ และลดค่า THMFP ได้เฉลี่ย 48 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ polymer 1 mg/L และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) 80 mg/L มีประสิทธิภาพดีที่สามารถลดค่า DOC ได้ 76 เปอร์เซ็นต์ ลดค่า THMFP ได้ 83 เปอร์เซ็นต์ ลดค่า DOC_{HPO}, DOC_{HPI}, THMFP_{HPO} และ THMFP_{HPI} ได้เท่ากับ 85, 68, 81 และ 79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Musikavong and Wattanachira (2013) ศึกษาปริมาณและการจำแนกลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำต่อโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำจากคลองอุต๊ะเถา จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากอ่างเก็บน้ำ 2 แห่งและจากบริเวณต้นน้ำ ลำน้ำช่วงกลางและน้ำดิบจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอุต๊ะเถาในช่วงฤดูฝนและฤดูร้อน น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปามีปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงกว่าน้ำในอ่างเก็บน้ำและน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปามีโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนสูงที่สุด จากการวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ตรวจพบพีคของสาร humic acid ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำและน้ำจากคลองอุต๊ะเถา จากการวิเคราะห์โดยวิธี pyrolysis gas chromatography ตรวจพบสารกลุ่ม aliphatic hydrocarbon และ organic nitrogen ทั้งในน้ำจากคลองอุต๊ะเถาและอ่างเก็บน้ำ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 40 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สภาวะดังกล่าวลดค่า UV-254 ได้ 57 เปอร์เซ็นต์ ลดค่า DOC ได้ 64 เปอร์เซ็นต์ และลดค่า THMFP ได้ 42 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันมาวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR ตรวจพบหมู่ฟังก์ชันของ O-H หรือ H bonded NH, cyclic และ alicyclic C=O, ketones และ quinines, aromatic C=C, C-O ของ alcohols, esters และ carbohydrates, deformation ของ COOH และ carboxylic acid salts โดยหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบมากที่สุดได้แก่ aliphatic hydrocarbon, organic nitrogen, aldehydes และ ketones

จากงานวิจัยข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าสารปนเปื้อนในน้ำคลองอุต๊ะเกาส่งผลเสียต่อระบบประปาและคุณภาพน้ำประปาเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทนและสารก่อมะเร็งกลุ่มอื่นๆในน้ำประปา สารตั้งต้นดังกล่าวกำจัดได้ค่อนข้างยากโดยระบบประปาแบบทั่วไป ดังนั้นปัญหาคุณภาพน้ำคลองอุต๊ะเกาจึงเป็นปัญหาหลักที่ควรเร่งหาทางป้องกันและแก้ไข ตลอดจนหาวิธีการลดสารตั้งต้นเพื่อลดโอกาสในการก่อตัวของสารก่อมะเร็งในน้ำประปา เนื่องจากในอนาคตชุมชนรวมถึงโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น และอาจส่งผลให้น้ำมีการปนเปื้อนสารตั้งต้นสารก่อมะเร็งในน้ำดิบประปาในระดับที่สูงขึ้น

2.2 สารอินทรีย์ละลายน้ำ (dissolved organic matter, DOM)

สารอินทรีย์ (organic matter, OM) ที่พบในแหล่งน้ำสามารถจัดแบ่งตามสถานการณ์การละลายออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ละลายน้ำและส่วนที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ (2-1)

$$OM = DOM + POM \quad (2-1)$$

เมื่อ DOM เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและ particulate organic matter (POM) เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ และเมื่อทำการแบ่งประเภทของสารอินทรีย์โดยใช้แผ่นกรองที่มีขนาดความพรุนแตกต่างกัน (เช่น $<0.1 \mu\text{m}$, $<0.45 \mu\text{m}$, $<1.0 \mu\text{m}$) สามารถแยกประเภทของสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้นโดยเป็นส่วนของสารอินทรีย์ประเภทคอลลอยด์ (colloidal organic matter, COM) ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ระหว่าง DOM และ POM ดังสมการที่ (2-2)

$$OM = DOM + COM + POM \quad (2-2)$$

สารอินทรีย์ละลายน้ำ เป็นส่วนของสารอินทรีย์ซึ่งมีสมบัติในการละลายน้ำ สารอินทรีย์ละลายน้ำที่พบได้ส่วนใหญ่ในแหล่งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินธรรมชาติคือสารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter, NOM) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการย่อยสลายของพืช การเจริญเติบโตและการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในน้ำ (Dilling and Kaiser, 2002; Au *et al.*, 2011) อีกส่วนหนึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น น้ำเสียและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือชุมชน การชะล้างหน้าดินจากพื้นที่เกษตรกรรม สิ่งปฏิกูลจากการเลี้ยงสัตว์ ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ ทำให้แหล่งน้ำแต่ละแห่งมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์แตกต่างกันออกไปตามที่มาของสารอินทรีย์ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สารอินทรีย์ละลายน้ำที่ปนเปื้อนในน้ำดิบมีบทบาทสำคัญต่อระบบผลิตน้ำประปา เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่ใส่เติมในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection) ก่อให้เกิดสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs) เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) สารไนโตรซามีน (nitrosamines) เป็นต้น

โดยทั่วไปสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในแหล่งน้ำประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นฮิวมิก (humic substance) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักและส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิก (non-humic substance) โดยส่วนที่เป็นฮิวมิกมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) ประกอบด้วย กรดฮิวมิก กรดฟัลวิก และฮิวมิน ส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิกมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) ประกอบด้วย hydrophilic acids โปรตีน กรดอะมิโน โพลีแซคคาไรด์ กรดคาร์บอกซิลิก และคาร์โบไฮเดรต (Newcombe *et al.*, 1997; Au *et al.*, 2011) ในแหล่งน้ำผิวดินโดยทั่วไปมีสารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่เป็นฮิวมิกประมาณ 45-65 เปอร์เซ็นต์ (Martin-Mousset *et al.*, 1997; Mash *et al.*, 2004; Velasco *et al.*, 2007) และมีส่วนที่ไม่ใช่ฮิวมิกประมาณ 35-55 เปอร์เซ็นต์ (Owen *et al.*, 1995)

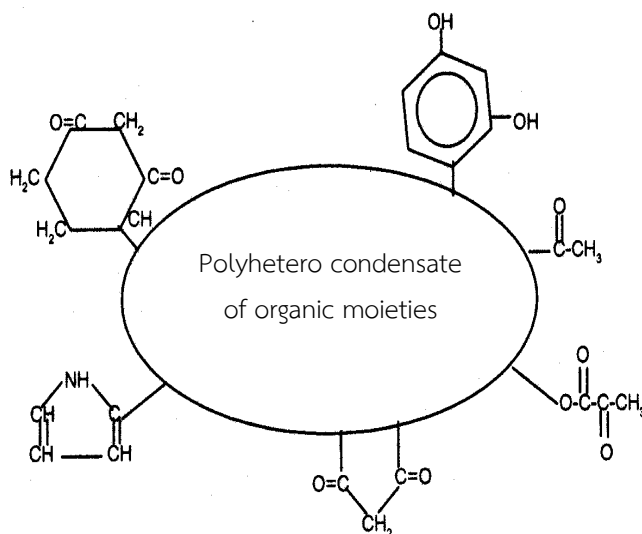
2.2.1 สารฮิวมิก

สารฮิวมิกเป็นองค์ประกอบหลักของสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ เกิดจากการสลายตัวทางชีวภาพของซากพืช มีส่วนประกอบที่ซับซ้อนและมีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นสารประกอบสีดำหรือน้ำตาล มีสภาพเป็นกรด โมลโมเลกุลมีค่าอยู่ในช่วงร้อยจนถึงหลายล้าน โครงสร้างโมเลกุลของสารฮิวมิก (รูปที่ 2-1) ประกอบด้วยกลุ่ม polyhetero condensate ที่มีโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน และมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ หลายกลุ่ม ได้แก่ กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ซึ่งมีปริมาณ 60-90 เปอร์เซ็นต์ ไฮดรอกซิล (hydroxyl) และคีโตน (ketone) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลต่อการละลายของสารประกอบฮิวมิก และเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนจนเกิดเป็นสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา

สารฮิวมิก สามารถจำแนกได้เป็น 2 ส่วน และมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2-2

1. กรดฮิวมิก (humic acid) เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่พบมากในดิน ซึ่งมีความสามารถละลายในด่าง (alkaline solution) แต่ไม่ละลายในสารละลายกรดที่มีพีเอชต่ำเกินกว่า 2

2. กรดฟัลวิก (fulvic acid) เป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่ากรดฮิวมิกและสามารถละลายได้ทั้งในกรดและด่าง



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของสารประกอบฮิวมิก
ที่มา: Trussell and Umphres (1978)

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกรดฮิวมิกและกรดฟัลวิก

คุณสมบัติ	กรดฮิวมิก	กรดฟัลวิก
องค์ประกอบธาตุ (%โดยน้ำหนัก)		
C	50-60	40-50
H	4-6	4-6
O	30-35	44-45
N	2-4	<1-3
S	1-2	0-2
ละลายในกรดแก่ (pH<1)	ไม่ละลาย	ละลาย
ช่วงน้ำหนักโมเลกุล	100-หลายล้าน	180-10,000
การกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชัน	เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชัน	เปอร์เซ็นต์ของออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชัน
คาร์บอกซิล (Carboxyl)	14-45	58-65
ฟีนอล (Phenol)	10-38	9-19
แอลกอฮอล์ (Alcohol)	13-15	11-16
คาร์บอนิล (Carbonyl)	4-23	4-11
เมทอกซิล (Methoxyl)	1-5	1-2

ที่มา: Snoeyink and Jenkins (1980)

2.2.2 สาเหตุที่ต้องกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากน้ำในกระบวนการผลิตน้ำประปา

สารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบประปา ทำให้เกิดสีและรสในน้ำ น้ำดิบที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงจะส่งผลให้มีความต้องการปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และปริมาณสารฆ่าเชื้อโรคที่มากขึ้นในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ สารอินทรีย์ละลายน้ำมีแนวโน้มเป็นตัวขัดขวางการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆในน้ำ รวมถึงทำให้เกิดการกัดกร่อนและการเจริญเติบโตขึ้นใหม่ของแบคทีเรียในระบบจ่ายน้ำ โดยเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีพบว่า สารอินทรีย์ละลายน้ำส่วนที่เป็นฮิวมิกเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดปัญหากับระบบประปา (Singer, 1999) นอกจากนี้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นสารอินทรีย์ละลายน้ำยังมีบทบาทอย่างมากต่อการเกิดผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากสารอินทรีย์ละลายน้ำเป็นส่วนของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดีและมีขนาดอนุภาคที่เล็ก จึงทำให้กำจัดออกได้ค่อนข้างยากกว่าสารอินทรีย์ที่เป็นอนุภาคและสารแขวนลอย รวมถึงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยทั่วไปมุ่งเน้นเพียงการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำหรือความขุ่นให้น้ำใส ปราศจากเชื้อโรค และเพื่อให้ได้น้ำสะอาดตามมาตรฐานกำหนดโดยมิได้คำนึงถึงการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำทำให้ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดีเท่าที่ควร เมื่อเข้าสู่กระบวนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค (chlorine disinfection) สารอินทรีย์ละลายน้ำที่ยังเหลือตกค้างอยู่จึงเข้าทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดเป็น DBPs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (THMs) ฮาโลอะซิติกแอซิด (haloacetic acids, HAAs) ฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (haloacetonitrile, HANs) และไนโตรซามีน (nitrosamines) เป็นต้น

2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

โดยทั่วไปค่าดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์เพียงชนิดเดียวไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนเพื่ออธิบายถึงคุณลักษณะโดยรวมของสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์จากดัชนีหลายตัวดังต่อไปนี้

2.3.1 สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC)

สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเป็นส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (total organic carbon, TOC) DOC สามารถแยกได้โดยการกรองผ่านแผ่นกรองขนาดรูเปิด $0.45 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามกระดาดกรองดังกล่าวโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และไม่สามารถอบที่อุณหภูมิสูงได้ จากข้างต้นจึงมีการใช้การกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด $0.7 \mu\text{m}$ ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสในการวิเคราะห์ค่า DOC ดังนั้น DOC จึงเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Julie *et al.*, 2004)

2.3.2 สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON)

สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ เป็นส่วนหนึ่งของมวลของ DOM หรือ TDN (Westerhoff and Mash, 2002) ซึ่งโดยทั่วไป DOM มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน total dissolved nitrogen (TDN) คือสารไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจน (DON) และสารอนินทรีย์ไนโตรเจน (dissolved inorganic nitrogen, DIN) สารจำพวก DON ได้แก่ amino acids, proteins, amino sugars, amides, nitriles, pyrroles, purines และ pyrimidines เป็นสารที่พบทั่วไปในน้ำผิวดินซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ การชะล้างหน้าดิน และการปนเปื้อนของน้ำเสีย (Westerhoff and Mash, 2002) จากการสำรวจข้อมูล Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) และแอมโมเนียในตัวอย่างน้ำ 23,000 ตัวอย่างโดย United State Geologic Survey ฐานข้อมูล National Aquatic Water Quality Assessment (NAWQA) รายงานถึงค่ามัธยฐานของความเข้มข้น DON ในแหล่งน้ำผิวดินมีค่า 0.37 mg-N/L ส่วนน้ำใต้ดินที่ระดับตื้นและลึกมีค่าเท่ากับ 0.24 และ 0.18 mg-N/L ตามลำดับ (Westerhoff and Mash, 2002) จากงานวิจัยของ Lee *et al.* (2006) ทำการตรวจวัด DON ในน้ำจากระบบประปา 28 แห่งในสหรัฐอเมริกาพบว่าน้ำดิบมีค่าความเข้มข้นของ DON เฉลี่ย 0.19 mg-N/L และน้ำประปามีความเข้มข้นของ DON เฉลี่ย 0.15 mg-N/L สำหรับประเทศไทยมีการรายงานค่า DON ในน้ำดิบประปากรุงเทพมหานคร โดยพบว่าน้ำดิบจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขนและโรงผลิตน้ำประปาบางเลนมีค่า DON เท่ากับ 0.24 และ 0.34 mg-N/L ตามลำดับ (Kumsuwan, 2013; Sumpattanavorachai, 2013)

ความเข้มข้นของ DON คำนวณได้จากผลต่างของ TDN และ DIN ซึ่งเป็นผลรวมของค่าแอมโมเนีย (NH_3) ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) ดังสมการที่ (2-3)

$$\text{DON} = \text{TDN} - (\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_3/\text{NH}_4^+) \quad (2-3)$$

DON เป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nitrogenous disinfection by-products, N-DBPs) โดยเกิดจากการที่ DON เข้าทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนหรือคลอรามินที่ใช้เติมเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา ก่อนจ่ายน้ำไปยังผู้บริโภค ซึ่งสาร N-DBPs ที่เกิดขึ้นได้แก่ ฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (haloacetonitriles, HANs), ฮาโลอะเซตาไมด์ (haloacetamides, HAcAms), ฮาโลไนโตรมีเทน (halonitromethanes, HNMs) และ ไนโตรซามีน (nitrosamines) เป็นต้น สารเหล่านี้เป็นสารก่อมะเร็งและมีความเป็นพิษสูงกว่าสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (carbonaceous disinfection by-products, C-DBPs) เช่น ไตรฮาโลมีเทน (THMs) และ ฮาโลอะซีติกแอซิด (HAAs) เป็นต้น

2.3.3 UV absorbance at wavelength 254 nm (UV-254)

UV-254 เป็นดัชนีตัวแทนในการตรวจวัดสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ และใช้ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำในการลดสารอินทรีย์ การวัดค่า UV-254 มีหลักการคือสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างอะโรมาติก หรือเป็นสารที่มีพันธะทางเคมีเป็นพันธะคู่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นของรังสีอัลตราไวโอเล็ต โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 254 nm ได้ดี ทำให้การวัดค่า UV-254 เป็นวิธีการที่เหมาะสมในการวัดปริมาณของสารอินทรีย์ละลายน้ำ เช่น ฮิวมิก เนื่องจากฮิวมิกประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติก และเป็นสารอินทรีย์ที่มีปริมาณมากในแหล่งน้ำธรรมชาติ (Edzwald *et al.*, 1985) นอกจากนี้การศึกษาของ Eaton (1995) พบว่า การดูดกลืนแสงรังสีอัลตราไวโอเล็ตของสารอินทรีย์ในน้ำ มีความสัมพันธ์อย่างมากกับปริมาณ DOC สี สารไตรฮาโลมีเทน และสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดสาร DBPs ชนิดอื่นๆ นอกจากนี้การวัดค่า UV-254 สามารถใช้ประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์โดยการดูดซับด้วยคาร์บอนแบบเกร็ด (granular activated carbon, GAC) กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการบำบัดน้ำแบบอื่นๆได้อีกด้วย

2.3.4 Specific Ultraviolet Absorption (SUVA)

SUVA เป็นดัชนีชี้วัดของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่อยู่ในน้ำ คำนวณได้จากค่าของ UV-254 (ในหน่วย cm^{-1}) หารด้วยค่า DOC (ในหน่วย mg/L) ค่า SUVA มีหน่วยเป็น L/mg-m น้ำตัวอย่างที่มีค่า SUVA ต่ำโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่ม non-humic และไม่เหมาะสมที่ใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มดังกล่าว ในทางกลับกันหากน้ำตัวอย่างมีค่า SUVA สูงย่อมหมายถึงน้ำดังกล่าวมีสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกเป็นส่วนใหญ่ มีความเหมาะสมที่จะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสารอินทรีย์ (USEPA, 1999) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SUVA และการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันแสดงดังตารางที่ 2-3

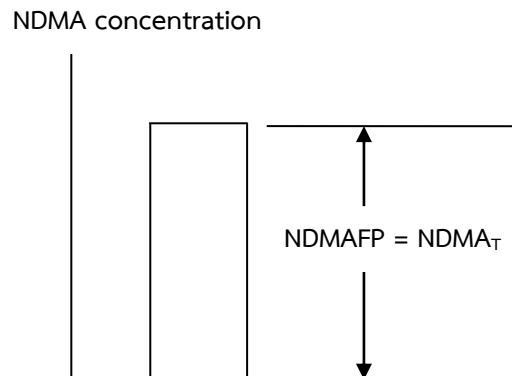
ตารางที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SUVA กับการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

SUVA	ลักษณะของสารอินทรีย์	การโคแอกกูเลชัน	การกำจัด DOC
<2	<ul style="list-style-type: none"> - ประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช่ฮิวมิกเป็นหลัก - มีสมบัติความไม่ชอบน้ำต่ำ - น้ำหนักโมเลกุลต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - NOM มีผลเล็กน้อยต่อการโคแอกกูเลชัน - กำจัด DOC ได้ไม่ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - alum กำจัดได้ <25% - ferric กำจัดได้ - ก่อนข้างดีกว่า alum
2-4	<ul style="list-style-type: none"> - ประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกในแหล่งน้ำและ NOM อื่นๆ - ประกอบด้วย NOM ที่มีสมบัติชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ - ประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายขนาดโมเลกุล 	<ul style="list-style-type: none"> - NOM มีผลต่อการโคแอกกูเลชัน - กำจัด DOC ได้ค่อนข้างดี 	<ul style="list-style-type: none"> - alum กำจัดได้ 25-50% - ferric กำจัดได้ - ก่อนข้างดีกว่า alum
>4	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกในน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก - มีสมบัติความไม่ชอบน้ำสูง - สารอินทรีย์มีขนาดโมเลกุลใหญ่ 	<ul style="list-style-type: none"> - NOM มีผลต่อการโคแอกกูเลชันอย่างมาก - กำจัด DOC ได้ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - alum กำจัดได้ 50% - ferric กำจัดได้ - ก่อนข้างดีกว่า alum

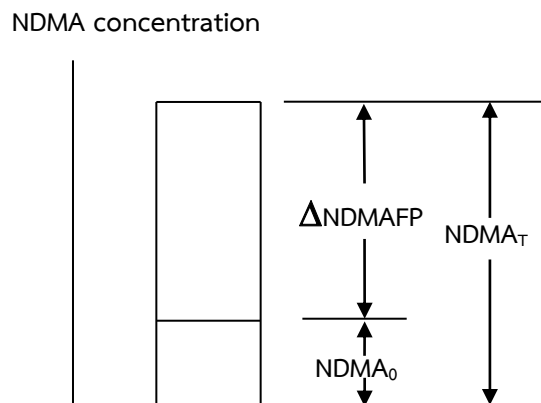
ที่มา: Edzwald and Tobiason (1999) อ้างอิงโดย Au *et al.* (2011)

2.3.5 N-nitrosodimethylamine formation potential (NDMAFP)

การวิเคราะห์หาโอกาสการก่อตัวของ NDMA มีหลักการเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (THMFP) โดย NDMAFP คือ ความเข้มข้นทั้งหมดของ NDMA มากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยเป็นค่าผลต่างระหว่างความเข้มข้นของค่า total NDMA ณ เวลาใดๆ ($NDMA_T$) กับค่า $NDMA_0$ ณ เวลาที่เก็บตัวอย่าง ค่า $NDMA_7$ เป็นค่าของ NDMA หลังจากเก็บน้ำตัวอย่างไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน ส่วนค่า $NDMA_0$ เป็นค่าความเข้มข้นของ NDMA ณ เวลาเก็บน้ำตัวอย่าง ถ้าหากน้ำตัวอย่างยังไม่มีคลอรีนในขณะเก็บ $NDMA_0$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่า NDMAFP เป็นค่า $NDMA_T$ และหากน้ำตัวอย่างมีการเติมคลอรีนในขณะเก็บน้ำตัวอย่างทำให้เกิด NDMA ส่วนหนึ่ง และ $\Delta NDMA$ เป็นค่าความแตกต่างระหว่าง $NDMA_T$ กับ $NDMA_0$ (รูปที่ 2-2 และ 2-3) โดยการศึกษาครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ค่า NDMAFP จากการเติมคลอรีนและคลอรีนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการก่อตัวของ NDMA จากสารฆ่าเชื้อโรคทั้งสองชนิด เนื่องจากมีงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าคลอรีนมีผลทำให้เกิดการก่อตัวของ NDMA ได้สูงกว่าคลอรีน (Lee *et al.*, 2007)



รูปที่ 2-2 การเกิด NDMA ของน้ำตัวอย่างในขณะเก็บน้ำตัวอย่างไม่มีคลอรีนอิสระหรือคลอรามิน



รูปที่ 2-3 การเกิด NDMA ของน้ำตัวอย่างในขณะเก็บน้ำตัวอย่างมีคลอรีนอิสระหรือคลอรามิน

2.4 กระบวนการ resin fractionation

การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการ resin fractionation มีความสำคัญในการกำหนดการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำกับสารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคซึ่งก่อให้เกิด disinfection by-products (DBPs) และทำให้เข้าใจถึงลักษณะทางเคมีของสารอินทรีย์ละลายน้ำเพื่อใช้ออกแบบระบบบำบัดที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ กระบวนการ resin fractionation เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกชนิดของสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำธรรมชาติโดยใช้เรซินซึ่งมีสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation สามารถจำแนกออกได้เป็น สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (HPO) ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ คือ fulvic และ humic acid จัดเป็นส่วนของ humic fraction อีกส่วนหนึ่งเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) หรือ non humic fraction ซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำและกรดอะมิโน โดยสารอินทรีย์กลุ่ม HPO มีโครงสร้างเป็นแบบอะโรมาติก aromatic มากกว่า HPI

Thurman และ Malcolm (1981) ได้ทำการทดลองโดยใช้เรซินชนิด XAD-8 ในการดูดซับ humic substance ภายใต้สภาวะความเป็นกรด (pH=2) ซึ่งส่วนที่ค้างอยู่ในเรซินถูกชะโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ Leenheer *et al.* (1982), Leenheer and Noyes (1984) และ Reckhow *et al.* (1992) ได้เสนอลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ผ่านการ fractionation และกลุ่มทางเคมี ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ลักษณะและกลุ่มทางเคมีของสารอินทรีย์หลังผ่านกระบวนการ resin fractionation

แฟรกชัน	กลุ่มทางเคมี
Hydrophobic	
<u>Acids</u>	
Strong	Humic acid, fulvic acid and high MW alkyl monocarboxylic and dicarboxylic acids, aromatic acids
Weak	Phenols, tannins, intermediate MW alkyl monocarboxylic and dicarboxylic acids, aromatic acids
<u>Base</u>	Proteins, aromatic amines, high MW alkyl amines
<u>Neutrals</u>	Hydrocarbon, aldehydes, high MW methyl ketones and alkyl alcohols, ethers, furan, pyrrole
Hydrophilic	
<u>Acids</u>	Hydroxy acids, sugars, sulfonics, low MW alkyl monocarboxylic and dicarboxylic acids
<u>Base</u>	Amino acids, purines, pyrimidines, low MW alkyl amine
<u>Neutrals</u>	Polysaccharides; low MW alkyl alcohols, aldehydes and ketones

ที่มา: Leenheer *et al.* (1982), Leenheer and Noyes (1984) และ Reckhow *et al.* (1992)

จากการตรวจสอบข้อมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้เรซิน XAD (XAD-2 XAD-4 และ XAD-8) และ DAX (DAX-2, DAX-4 และ DAX-8) ในการแยกสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) และกลุ่มไม่ชอบน้ำ (HPO) ดังตารางที่ 2-5 ส่วนงานวิจัยในประเทศไทยนิยมใช้เรซินชนิด DAX-8 เนื่องจากเรซิน DAX-8 มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และมีความชื้นน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (w/w) ทำให้สามารถแยกสารอินทรีย์ออกจากน้ำได้ดีและง่ายต่อการใช้งาน (Peuravuori *et al.*, 2002) ส่วนการแยกสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) เพิ่มเติมออกเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) และกึ่งชอบน้ำ (TPI) โดยใช้เรซิน XAD-4 ยังมีการดำเนินการค่อนข้างน้อย และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) กำจัดออกได้ยากโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันในระบบประปาทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาจากกลุ่มสารอินทรีย์ในเชิงลึกยิ่งขึ้นโดยการแยกกลุ่มสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ สารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (TPI) และกลุ่มไม่ชอบน้ำ (HPO) โดยใช้เรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4 ตลอดจนศึกษาโอกาสการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรโซโดเมทิลลามีน (NDMAFP) เพื่อที่จะสามารถประเมินกลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีอิทธิพลต่อการก่อตัวของสารก่อมะเร็งดังกล่าว รวมถึงศึกษาหาแนวทางในการควบคุมและกำจัดที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 2-5 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยกระบวนการ resin fractionation โดยใช้เรซินชนิดต่างๆ

แหล่งน้ำดิบประปา	เรซิน	แฟรกชัน	อ้างอิง
แม่น้ำ Suwanee Southern Georgia USA.	XAD-8 และ AG-MP-50	Humic acid และ fulvic acid	Thurman และ Malcolm (1981)
แม่น้ำ Mississippi USA. (TOC 6.3 mg/L)	XAD-2 และ XAD-8	HPO 60% และ HPI 40%	Semmens และ Staples (1986)
แม่น้ำ Sacramento Delta California USA. (DOC 2.1-22 มก/ล.)	XAD-8	Humic fraction 38-62% และ non-humic fractions	Amy <i>et al.</i> (1990)
น้ำใต้ดิน (10 Wells) USA (DOC 1.2-14 mg/L)	XAD-8	Humic fraction 55-94% และ non-humic fractions	Amy <i>et al.</i> (1992)
อ่างเก็บน้ำ Apremont France (DOC 7.3-11.5 mg/L)	XAD-4 และ XAD-8	HPO 50-55% และ HPI 20-25%	Croue <i>et al.</i> (1993)
อ่างเก็บน้ำ (DOC 6.8-7.8 mg/L) และแม่น้ำ (DOC 2.8-5.3 mg/L)	XAD-4 และ XAD-8	HPO 41-62% และ HPI 14-26%	Martin-Mousset <i>et al.</i> (1997)
แม่น้ำ Rhine (TOC 8 mg/L)	XAD-4 และ XAD-8	HPI 90% และ HPO 10%	Bremere <i>et al.</i> (1999)
แม่น้ำ Nakdong Korea (DOC 3.71 mg/L)	XAD-4 และ XAD-8	HPO HPI และ TPI	Lee <i>et al.</i> (2002)
อ่างเก็บน้ำ Moorabool และ Horsham Australia	XAD-4	HPO 52% และ HPI 48%	Wong <i>et al.</i> (2002)
น้ำใต้ดิน Wanneroo Australia		HPO 72% และ HPI 28%	
		HPO 89% และ HPI 11%	
แม่น้ำ Passaic New Jersey USA.	XAD-8 AG-MP-50 และ WA-10	HPO 62% และ HPI 38%	Bengraine and Marhaba (2003)
แม่น้ำ Suwanee Southern Gorgia	XAD-8	Fulvic acids	Leenheer <i>et al.</i> (2003)
อ่างเก็บน้ำแม่กวง เชียงใหม่ (DOC 2.0 mg/L)	DAX-8 AG-MP-50 และ WA-10	HPO 60% และ HPI 40%	Homklin (2004)
อ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว เชียงใหม่ (DOC 2.4 mg/L)	DAX-8 AG-MP-50 และ WA-10	HPO 53% และ HPI 47%	Homklin (2004)
อ่างเก็บน้ำแม่เหียะ เชียงใหม่	DAX-8	HPO 49% และ HPI 51%	อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย (2548)

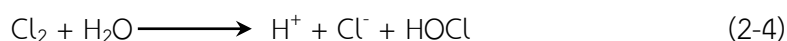
ตารางที่ 2-5 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยกระบวนการ resin fractionation โดยใช้เรซินชนิดต่างๆ (ต่อ)

แหล่งน้ำดิบประปา	เรซิน	แฟรกชัน	อ้างอิง
อ่างเก็บน้ำของการอุตสาหกรรมภาคเหนือ ลำพูน (DOC 5.4 mg/L)	DAX-8 AG-MP-50 และ WA-10	HPO 57% และ HPI 43%	Janhom <i>et al.</i> (2005)
น้ำดิบประปาจาก Albert water treatment works England	XAD-8	HPO 53-76% และ HPI	Sharp <i>et al.</i> (2006)
แม่น้ำ Ulu Pontian Malaysia (DOC 6.8 mg/L)	DAX-8 และ XAD-4	HPO 35% TPI 25% และ HPI 38%	Zularisam <i>et al.</i> (2007)
แม่น้ำ Murrumbidgee Australia (DOC 3-10 mg/L)	DAX-8	Fulvic acids 44.8%	McDonald <i>et al.</i> (2007)
แม่น้ำ Lake Hongfeng China	XAD-8 และ XAD-4	HPO 77% และ HPI 23%	Liyang <i>et al.</i> (2009)
อ่างเก็บน้ำสะเดา ต.ค. 2552 (DOC 4.9 mg/L)	DAX-8	HPO 55% และ HPI 45%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
อ่างเก็บน้ำสะเดา มี.ค. 2553 (DOC 2.9 mg/L)	DAX-8	HPO 55% และ HPI 45%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
อ่างเก็บน้ำคลองหลา ต.ค. 2552 (DOC 4.2 mg/L)	DAX-8	HPO 53% และ HPI 47%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
อ่างเก็บน้ำคลองหลา มี.ค. 2553 (DOC 3.3 mg/L)	DAX-8	HPO 55% และ HPI 45%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านม่วงก้อง ต.ค. 2552 (DOC 3.9 mg/L)	DAX-8	HPO 43% และ HPI 57%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านม่วงก้อง มี.ค. 2553 (DOC 5.0 mg/L)	DAX-8	HPO 47% และ HPI 53%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านบางศาลา ต.ค. 2552 (DOC 4.9 mg/L)	DAX-8	HPO 45% และ HPI 55%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านบางศาลา มี.ค. 2553 (DOC 5.1 mg/L)	DAX-8	HPO 48% และ HPI 52%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
จุดสูบน้ำดิบ ต.ค. 2552 (DOC 5.1 mg/L)	DAX-8	HPO 42% และ HPI 58%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
จุดสูบน้ำดิบ มี.ค. 2553 (DOC 5.5 mg/L)	DAX-8	HPO 45% และ HPI 55%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านหาดใหญ่ใน ต.ค. 2552 (DOC 4.4 mg/L)	DAX-8	HPO 40% และ HPI 60%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)
บ้านหาดใหญ่ใน มี.ค. 2553 (DOC 6.2 mg/L)	DAX-8	HPO 47% และ HPI 53%	จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ (2555)

2.5 กระบวนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection)

กระบวนการฆ่าเชื้อโรค (disinfection) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตน้ำประปา ก่อนจ่ายน้ำไปยังผู้บริโภค สารฆ่าเชื้อโรคที่นิยมใช้ในระบบประปาส่วนใหญ่คือ คลอรีน (chlorine) สารประกอบคลอรีนมีการกล่าวถึงมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 77 หรือประมาณเกือบ 2000 ปีมาแล้ว โดยชาวโรมันชื่อ Pliny ได้ทำการทดลองทางเคมีเพื่อแยกทองคำให้บริสุทธิ์พบว่าเกิดสารไฮโดรเจนคลอไรด์จากปฏิกิริยาดังกล่าว ในปี ค.ศ. 1774 เกอส์ทกรชาวสวีเดนชื่อ Carl Wilhelm Scheele ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคลอรีนเป็นครั้งแรกและพบว่าคลอรีนมีสมบัติในการฟอกสี ต่อมาในปี ค.ศ. 1835 คลอรีนถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดกลิ่นในน้ำจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1890 มีการค้นพบว่าคลอรีนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค จากการค้นพบดังกล่าวจึงเริ่มมีการทำคลอรีเนชัน (chlorination) เป็นครั้งแรกใน Great Britain และเริ่มแพร่หลายไปยังประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1908 และประเทศแคนาดาในปี ค.ศ. 1917 มาจนถึงปัจจุบันมีการใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อโรคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำโดยการเติมคลอรีน เรียกว่า คลอรีเนชัน กระบวนการดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้ตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากคลอรีนมีราคาถูก จัดหาได้ง่าย มี Oxidizing power สูง สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ และมีการคงตัวอยู่ในเส้นท่อได้นาน คลอรีนที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาได้แก่ แก๊สคลอรีน (Cl_2) คลอรีนน้ำ (Sodium Hypochlorite, NaClO) และ คลอรีนผง (Ca(OCl)_2) แต่อย่างไรก็ตามระบบประปาส่วนใหญ่นิยมใช้แก๊สคลอรีน เนื่องจากคลอรีนน้ำมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแก๊สคลอรีน ส่วนคลอรีนผงไม่นิยมใช้ เนื่องจากต้องนำมาละลายน้ำก่อนจึงจะสามารถใช้งานได้ จึงเหมาะสำหรับระบบประปาขนาดเล็กซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ทุรกันดาร เนื่องจากสะดวกต่อการขนส่งและมีความปลอดภัยสูง (การประปานครหลวง, 2548)

การเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ เมื่อเติมแก๊สคลอรีนลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) อย่างรวดเร็ว เกิดเป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดย HCl สามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์กลายเป็น H^+ และ Cl^- ดังสมการที่ (2-4)



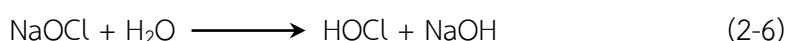
กรดไฮโปคลอรัสเป็นกรดอ่อน แตกตัวได้บางส่วน เกิดเป็น hydrogen ion และ hypochlorite ion ดังสมการที่ (2-5)



ดังนั้นคลอรีนที่เหลืออยู่ในน้ำจึงอยู่ในรูปกรดเกลือที่แตกตัว HOCl , OCl^- และ แก๊สคลอรีน (Cl_2) ซึ่งคลอรีนดังกล่าวรวมเรียกว่า คลอรีนอิสระคงเหลือ (free residual chlorine) โดยคลอรีนอิสระคงเหลือแต่ละชนิดจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2-4 ที่ค่าพีเอชของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ Cl_2 และจะระเหยสู่บรรยากาศที่พีเอชช่วง 1-3.5 คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ Cl_2 และ HOCl ที่พีเอชช่วง 3.5-5.5 จะอยู่ใน

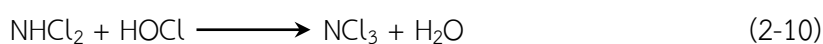
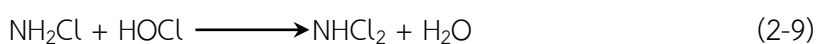
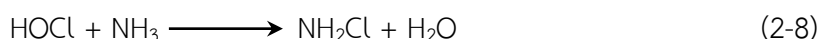
รูป HOCl ส่วนที่ค่าพีเอชช่วง 5.5-9 อยู่ในรูปของ HOCl และ OCl⁻ และที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 9 ขึ้นไปจะอยู่ในรูปของ OCl⁻ อย่างไรก็ตามเนื่องจากคลอรีนอิสระในรูป HOCl มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่า OCl⁻ ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงจึงควรทำคลอรีนชั้นที่ค่าพีเอชต่ำเพื่อให้มีคลอรีนอิสระในรูป HOCl เหลืออยู่ในน้ำ โดยองค์การอนามัยโลก (WHO, 1996) ได้กำหนดค่า guideline value (GV) ของคลอรีนอิสระที่คงเหลืออยู่ในน้ำต้องมีค่าไม่เกิน 5 mg/L

สำหรับการเติมคลอรีนน้ำและคลอรีนผงลงในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสดังสมการที่ (2-6) และ (2-7) ตามลำดับ

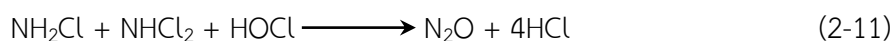


จากสมการที่ (2-6) และ (2-7) จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของคลอรีนชนิดน้ำและผงมีต่างเกิดขึ้นจึงทำให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่การใช้แก๊สคลอรีนมีกรดเกิดขึ้นจึงทำให้แนวโน้มของค่าพีเอชในน้ำต่ำลง ดังนั้นตามทฤษฎีจึงกล่าวได้ว่าการใช้แก๊สคลอรีนมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้ดีกว่าการใช้คลอรีนรูปแบบน้ำและผง แต่ในทางปฏิบัติพบว่ามีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากใช้คลอรีนในปริมาณน้อยมาก ผลกระทบต่อค่าพีเอชของน้ำจึงค่อนข้างน้อย (การประปานครหลวง, 2548)

น้ำประปาที่ผลิตจากน้ำผิวดินมักมีแอมโมเนีย (NH₃) ตกค้างอยู่ในน้ำ เมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำ กรดไฮโปคลอรัสจะเข้าทำปฏิกิริยากับ NH₃ เกิดเป็นสารประกอบคลอรามิน ได้แก่ โมโนคลอรามิน (NH₂Cl), ไดคลอรามิน (NHCl₂) และไตรคลอรามิน (NCl₃) ดังสมการที่ (2-8), (2-9) และ (2-10) ตามลำดับ

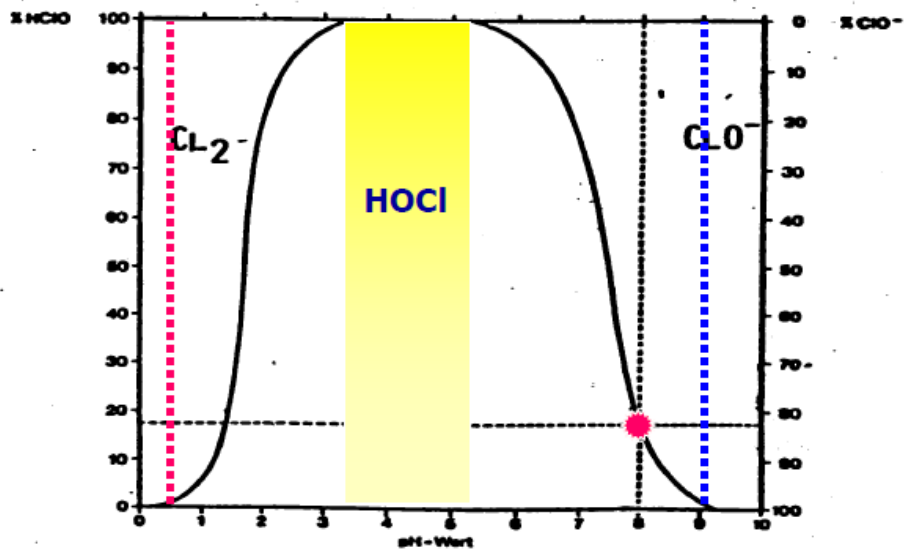


สัดส่วนของการเกิดคลอรามินทั้งสามชนิดขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและปริมาณของสารตั้งต้นทั้งคู่ โดยเมื่ออัตราส่วนของจำนวนโมลระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียมีค่าไม่เกิน 1:1 โมโนคลอรามินและไดคลอรามินจะเกิดขึ้นได้ทั้งคู่ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของสารทั้งสองขึ้นอยู่กับค่าพีเอชด้วยคือ เมื่อค่าพีเอชต่ำจะมีไดคลอรามินมาก แต่หากค่าพีเอชสูงจะมีโมโนคลอรามินมาก ดังรูปที่ 2-5 เมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียสูงกว่า 1:1 จะมีไตรคลอรามินเกิดขึ้น สำหรับน้ำที่มีแอมโมเนียอยู่เล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนโมลระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียเป็น 2:1 จะเกิดก๊าซ N₂O ขึ้น ดังสมการที่ (2-11) (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

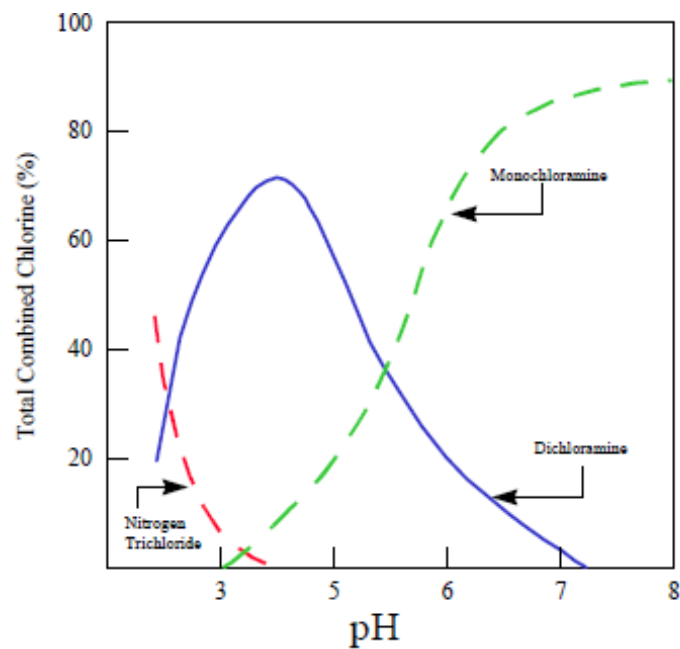


สารประกอบคลอรามินทั้ง 3 ชนิดรวมเรียกว่า Combined residual chlorine มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำกว่าคลอรีนอิสระ ดังรูปที่ 2-6 แต่สามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานกว่าคลอรีนอิสระ จึงเหมาะสำหรับใช้ในระบบท่อส่งน้ำที่มีระยะไกลเพื่อให้มีคลอรีนตกค้างเหลืออยู่เพียงพอสำหรับฆ่าเชื้อโรคจนกว่าจะถึงมือผู้ใช้น้ำ รวมทั้งยังสามารถฆ่าเชื้อโรคที่พีเอชสูงกว่า 10 ได้ดีกว่าคลอรีนอิสระ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) สารประกอบคลอรามินนอกจากจะเกิดขึ้นได้เองในระบบประปาจากการเข้าทำปฏิกิริยาของแอมโมเนียกับคลอรีนแล้ว ระบบประปาหลายแห่งในต่างประเทศยังนิยมใช้คลอรามินเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาและน้ำดื่มเช่นกัน กระบวนการเติมคลอรามินลงในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรคเรียกว่า คลอรามิเนชัน (chloramination) ซึ่งสารประกอบคลอรามินที่นิยมใช้เติมเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะอยู่ในรูปของโมโนคลอรามิน (NH_2Cl)

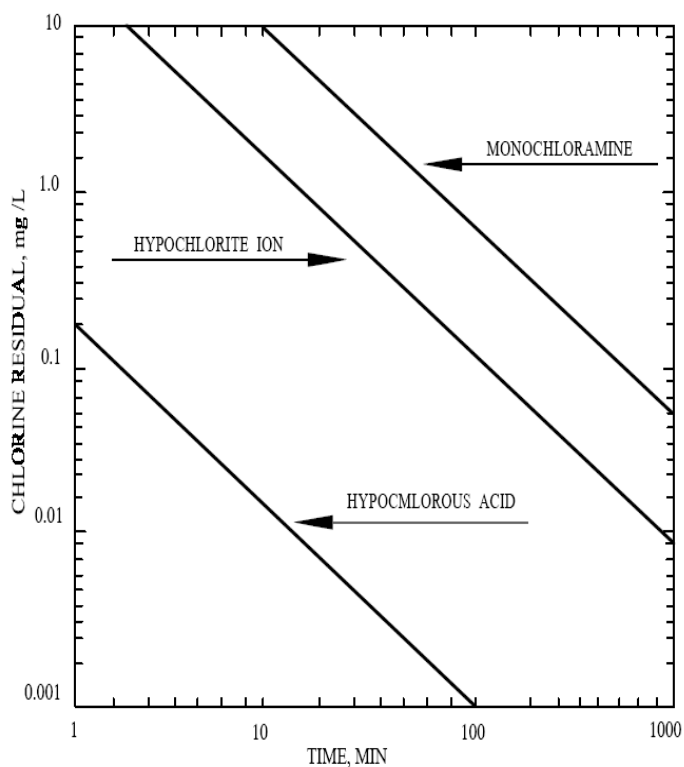
การใช้สารคลอรามินเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาเริ่มใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1929 ในพื้นที่รัฐ Cleveland, Ohio, Springfield, Illinois, Lansing และ Michigan ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S.EPA, 2009) โดยจากการสำรวจข้อมูลของ United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) ในปี ค.ศ. 1998 พบว่าชาวอเมริกันประมาณ 68 ล้านคนดื่มน้ำที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรามิน (U.S.EPA, 2012) นอกจากนี้ในเมืองหลายๆของสหรัฐอเมริกา เช่น Philadelphia, San Francisco, Tampa Bay และ Washington D.C. รวมถึงประเทศแคนาดา และ Great Britain ก็มีการใช้คลอรามินเป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำเช่นเดียวกัน (U.S.EPA, 2009) โดยองค์กรในต่างประเทศมีการกำหนดค่ามาตรฐานคลอรามินคงเหลือ ดังนี้ องค์การอนามัยโลก (WHO, 1998) กำหนดให้โมโนคลอรามินคงเหลือในน้ำต้องมีค่าไม่เกิน 3 mg/L ประเทศแคนาดากำหนดค่าความเข้มข้นสูงสุดของคลอรามินรวมไม่เกิน 3.0 mg/L (Health Canada, 2003) และ U.S.EPA, 1998 กำหนดให้คลอรามินคงเหลือต้องมีค่าไม่เกิน 4.0 mg/L (ในเทอมของ Cl_2) จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการใช้คลอรามินในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาและน้ำดื่มนิยมใช้ค่อนข้างแพร่หลายในต่างประเทศ ส่วนในประเทศไทยยังนิยมใช้คลอรีนเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ของประเทศไทยใช้น้ำผิวดินในการผลิตซึ่งน้ำผิวดินมักมีแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นจึงอาจเกิดคลอรามินได้จากการทำปฏิกิริยาของแอมโมเนียที่ตกค้างอยู่ในน้ำกับคลอรีนที่ใช้ฆ่าเชื้อโรค



รูปที่ 2-4 ผลของค่าพีเอชต่อการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ
ที่มา: การประปานครหลวง (2548)



รูปที่ 2-5 ผลของค่าพีเอชต่อชนิดของคลอรามิน
ที่มา: Palin (1950) อ้างอิงโดย U.S.EPA (1999)



รูปที่ 2-6 การเปรียบเทียบอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคระหว่างคลอรีนรวมและคลอรีนอิสระ
ที่มา: มั่นสิน ตัณกุลเวศม์ (2542)

2.6 ผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs)

ผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs) ในน้ำประปาเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนอิสระหรือคลอรามินที่เติมลงไปเพื่อฆ่าเชื้อโรคกับสารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ในน้ำ ทำให้สารอินทรีย์แตกตัวและจับกลุ่มใหม่เป็นสารก่อมะเร็ง โดยสาร DBPs ที่เกิดขึ้นมีด้วยกันหลายกลุ่มดังสมการที่ (2-12)

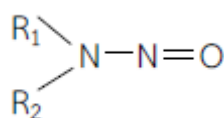


ผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคถูกค้นพบครั้งแรกในช่วงปี ค.ศ.1970 โดยมีการตรวจพบในน้ำดื่ม ซึ่งสารตัวแรกที่ตรวจพบคือสาร THMs และมีการตรวจพบสาร HAAs ในเวลาต่อมา (Bond *et al.*, 2011) สารดังกล่าวจัดเป็นผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (carbonaceous disinfection by-products, C-DBPs) เนื่องจากมีสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา ต่อมา มีการรายงานการตรวจพบสาร Haloacetonitrile (HANs) ในน้ำที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Bond *et al.*, 2011) สารดังกล่าวเป็น DBPs ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nitrogenous disinfection by-products, N-DBPs) โดยมีสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ

(dissolved organic nitrogen, DON) เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา สาร DBPs ดังกล่าวเหล่านี้ล้วนเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย หลังจากมีการตรวจพบสาร DBPs ครั้งแรกก็มีการตระหนักและมีการศึกษาเกี่ยวกับ DBPs กันอย่างแพร่หลายและต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน และมีการตรวจพบสาร DBPs เพิ่มขึ้นมากมายหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาส่วนใหญ่ล้วนมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะสาร C-DBPs ส่วนสาร N-DBPs ยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ธรรมชาติมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ไนโตรเจนมีอยู่เล็กน้อยเพียงร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อพิจารณาถึงความเป็นพิษ พบว่าสาร N-DBPs มีความเป็นพิษสูงกว่าสาร C-DBPs โดยเฉพาะสาร *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) ซึ่งจากฐานข้อมูล Integrated Risk Information System (IRIS) ของ USEPA กล่าวว่าการรับสาร NDMA ทางปากมีค่าโอกาสการก่อให้เกิดมะเร็งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มประมาณ 600 เท่า เมื่อกำหนดให้ความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งตลอดช่วงชีวิตเท่ากับ 10^{-6} ค่า NDMA ในน้ำดื่มควรมีค่าต่ำกว่า 0.7 ng/L (EPA IRIS, 1993 อ้างอิงโดย U.S.EPA, 2014) ดังนั้นแม้ว่าสาร N-DBPs จะเป็นสารที่มีปริมาณน้อยกว่าสาร C-DBPs แต่จากข้อมูลความเป็นพิษข้างต้นกล่าวได้ว่าสาร N-DBPs เป็นสารก่อมะเร็งที่อันตรายอย่างมากและควรมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อหาวิธีการในการป้องกันรวมถึงกำจัดสารดังกล่าวเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำประปาในการอุปโภคบริโภค

2.6.1 สารไนโตรซามีน (Nitrosamines)

ไนโตรซามีนเป็นสารก่อมะเร็งที่เกิดจากสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ (ประสงค์ คุณา นุวัฒน์ชัยเดช, 2549 อ้างอิงโดย กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) ประเภทอะลิฟาติก และอะโรมาติก โดยมีกลุ่ม functional ไนโตรโซต่อกับไนโตรเจน สารประกอบเอ็น-ไนโตรโซมีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังรูปที่ 2-7



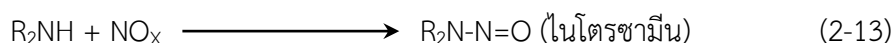
รูปที่ 2-7 โครงสร้างของสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ

สารประกอบเอ็น-ไนโตรโซสามารถจำแนกตามความแตกต่างของหมู่ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

1. กรณีที่ R_1 หรือ R_2 เป็นหมู่อัลคิล (alkyl) หรือหมู่แอริล (aryl) เรียกว่า สารประกอบไนโตรซามีน (*N*-nitrosamines)
2. กรณีที่ R_1 เป็นหมู่อัลคิล (alkyl) หรือหมู่แอริล (aryl) และ R_2 เป็นหมู่ แอซิล (acyl) เรียกว่า สารประกอบไนโตรซามิด์ (*N*-nitrosamides)

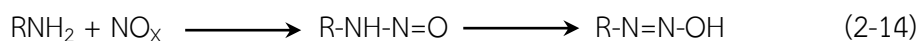
สารไนโตรซามีนพบได้ทั่วไปทั้งในดิน น้ำ อากาศ และยังมีการปนเปื้อนในอาหารและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ อาหารประเภทหมักดอง เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ยาสูบ เครื่องสำอาง เป็นต้น (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) ในปี ค.ศ.1954 นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ John Barnes และ Peter Magee ได้ค้นพบไนโตรซามีนเป็นครั้งแรก (Raths and Reyes, 2009 อ้างอิงโดย กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) จากการศึกษาพบว่า ไดเมทิลไนโตรซามีน (dimethylnitrosamine, NDMA) เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมะเร็งตับในหนู การค้นพบดังกล่าวทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกเริ่มสนใจและศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของสารก่อมะเร็งของไนโตรซามีนตัวอื่นๆ และสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ (*N*-nitroso) โดยมีการนำสารประกอบเหล่านี้ประมาณ 300 ชนิดไปทดสอบพบว่า 90 เปอร์เซ็นต์เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความหลากหลายในสัตว์ทดลองและมีความเฉพาะเจาะจงกับบางอวัยวะ เช่น ไดเมทิลไนโตรซามีน เป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็งตับในสัตว์ทดลอง สารไนโตรซามีนในใบยาสูบเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็งปอด สารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (NDMA) ก่อให้เกิดมะเร็งตับ ส่วนสารเอ็น-ไนโตรโซไดเอทิลลามีน (NDEA) ก่อให้เกิดมะเร็งตับและหลอดอาหารในสัตว์ทดลอง เป็นต้น (โอบเอื้อ อิมวิทยา และ อนุธมณต์ ปัญญวัฒน์กิจ, 2557) ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 เกิดโรคมะเร็งตับแพร่ระบาดในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของประเทศนอร์เวย์ ซึ่งสาเหตุของการเกิดโรครดังกล่าวเนื่องจากสัตว์ในฟาร์มบริโภคเนื้องาโฮร์ริงที่ใช้โซเดียมไนไตรต์เป็นสารรักษาสภาพ เมื่อโซเดียมไนไตรต์เข้าทำปฏิกิริยากับไดเมทิลลามีนในเนื้องาโฮร์ริงก่อให้เกิดเป็นสารไดเมทิลไนโตรซามีนจึงทำให้สัตว์ที่บริโภคดังกล่าวเกิดโรคมะเร็งตับ จากการตรวจพบสารไดเมทิลไนโตรซามีนในอาหารสัตว์ดังกล่าวจึงทำให้เกิดความตระหนักถึงการปนเปื้อนของไนโตรซามีนในอาหารของมนุษย์ จึงมีการทดสอบหาสารไนโตรซามีนจากอาหารและแหล่งต่างๆพบว่ามีสาร NDMA ในเปียร์ นอกจากนี้ยังมีการตรวจพบสารไนโตรซามีนจากผลิตภัณฑ์อื่นๆอีกมากมาย เช่น อาหารหมักดอง อาหารแปรรูป ถู่มือยาง ยาสูบ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เครื่องสำอาง เป็นต้น รวมถึงมีการตรวจพบไนโตรซามีนน้ำ ดิน และอากาศ เช่นเดียวกัน (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

การก่อตัวของสารไนโตรซามีนเกิดจากปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยากัน เช่น การเกิดไนโตรซามีนจากอุตสาหกรรมและอาหารบางประเภทมีสาเหตุสำคัญที่คล้ายกันคือ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) กับเอมีนทุติยภูมิ (เกิดปฏิกิริยาไนโตรเซชัน) ดังสมการที่ (2-13) (กนกทิพย์ บุญเกิด, 2551)



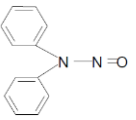
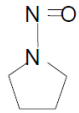
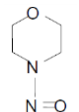
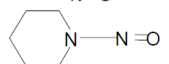
นอกจากนี้เอมีนปฐมภูมิก็สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนออกไซด์และเกิดเป็นไนโตรซามีนได้เช่นกัน แต่ไนโตรซามีนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพต่ำและเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นไดอะโซเนียมไฮดรอกไซด์ (diazonium hydroxide) ซึ่งในที่สุดจะแตกตัวได้เป็นแอลกอฮอล์และไนโตรเจน ดังสมการที่ (2-14) ส่วนเอมีนทุติยภูมิไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไนโตรเซชันได้โดยตรงดังสมการที่

(2-15) ต้องเกิดการแตกตัวเป็นเอมีนทุติยภูมิก่อน ดังนั้นปฏิกิริยาการเกิดไนโตรซามีนจากเอมีนจึงต้องพิจารณา เอมีนทุติยภูมิเป็นหลัก (กนกทิพย์ บุญเกิด, 2551)



สำหรับการปนเปื้อนของไนโตรซามีนในน้ำ ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ไนโตรซามีนมีการปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำทั้งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน รวมถึงน้ำประปาและน้ำดื่มซึ่งมีสาเหตุมาจากการก่อกวนในกระบวนการผลิตน้ำ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำกับสารฆ่าเชื้อโรค ได้แก่ คลอรีนหรือคลอรามิน ซึ่งสารก่อมะเร็งในกลุ่มไนโตรซามีนที่สำคัญมี 9 ชนิด คือ เอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (*N*-nitrosodimethylamine, NDMA), เอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอทิลลามีน (*N*-nitrosomethyl ethylamine, NMEA), เอ็น-ไนโตรโซไดเอทิลลามีน (*N*-nitrosodiethylamine, NDEA), เอ็น-ไนโตรโซไดโพรพิลลามีน (*N*-nitroso-*n*-dipropylamine, NDPA), เอ็น-ไนโตรโซได-เอ็น-บิวทิลลามีน (*N*-nitrosodi-*n*-butylamine, NDBA), เอ็น-ไนโตรโซไดฟีนิลลามีน (*N*-nitroso-diphenylamine, NDPhA), เอ็น-ไนโตรโซไพโรลิดีน (*N*-nitrosopyrrolidine, NPyr), เอ็น-ไนโตรโซมอร์โฟลีน (*N*-nitrosomorpholine, NMOR) และ เอ็น-ไนโตรโซไพเพอริดีน (*N*-nitrosopiperidine, NPip) ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางกายภาพและเคมีดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิด

	Structure		Formula	Molecular weight (g/mol)	Diffusion coefficient in water (cm ² /s) x 10 ⁻⁶	log K _{ow}	Solubility in water at 20-25 °C (g/L)
	R ₁	R ₂					
<i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA)	CH ₃	CH ₃	C ₂ H ₆ N ₂ O	74.05	9.7	-0.64	1000
<i>N</i> -nitrosomethylethylamine (NMEA)	C ₂ H ₅	CH ₃	C ₃ H ₈ N ₂ O	88.06	8.0	-0.15	300
<i>N</i> -nitrosodiethylamine (NDEA)	CH ₂ CH ₃	CH ₂ CH ₃	C ₄ H ₁₀ N ₂ O	102.08	8.0	0.34	147
<i>N</i> -nitroso- <i>n</i> -dipropylamine (NDPA)	(CH ₂) ₂ CH ₃	(CH ₂) ₂ CH ₃	C ₆ H ₁₄ N ₂ O	130.11	8.2	1.35	9.9
<i>N</i> -nitrosodi- <i>n</i> -butylamine (NDBA)	(CH ₂) ₃ CH ₃	(CH ₂) ₃ CH ₃	C ₈ H ₁₈ N ₂ O	158.14	8.0	2.31	1.2
<i>N</i> -nitroso-diphenylamine (NDPhA)			C ₁₂ H ₁₀ N ₂ O	198.08	6.3	3.16	0.035
<i>N</i> -nitrosopyrrolidine (NPYR)			C ₄ H ₈ N ₂ O	100.06	8.0	0.23	780
<i>N</i> -nitrosomorpholine (NMOR)			C ₄ H ₈ N ₂ O ₂	116.06	9.2	-1.39	4714
<i>N</i> -nitrosopiperidine (NPIP)			C ₅ H ₁₀ N ₂ O	114.08	8.6	0.74	49

ที่มา: GSI chemical properties database (GSI Environmental Inc.)

2.6.2 ความเป็นพิษของสารไนโตรซามีน

ไนโตรซามีนเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง จากฐานข้อมูล IRIS ของ U.S.EPA ได้กำหนดให้สารไนโตรซามีนจัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็งประเภท B2 หมายถึงสารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งต่อมนุษย์ได้ (U.S.EPA IRIS, 1999) สถาบันวิจัยมะเร็งนานาชาติ (International Agency for Research on Cancer, IARC) ได้จัดกลุ่มของสารไนโตรซามีนเป็น 2 กลุ่ม คือ (IARC, 1978)

กลุ่ม 2A คือ สารที่มีความเป็นไปได้สูงในการก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ ได้แก่ NDMA และ NDEA

กลุ่ม 2B คือ สารที่มีความเป็นไปได้ในการก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ ได้แก่ NDBA, NDPA, NMOR, NPIP และ NMEA

สารไนโตรซามีนสามารถก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมทุกชนิดและสามารถก่อให้เกิดพิษต่อร่างกายของมนุษย์และสัตว์ได้ทั้งในรูปแบบเฉียบพลัน (acute toxicity) และแบบเรื้อรัง (chronic toxicity) (กนกรัตน์ เจริญทอง, 2556)

1. พิษแบบเฉียบพลัน จากการรายงานของ Barnes และ Magee กล่าวว่า เมื่อให้สารไนโตรซามีนชนิด Dimethyl Nitrosamine ขนาด 20-40 mg/kg แก่หนู หนูตะเภา กระจาย และสุนัข จะส่งผลให้ตับของสัตว์เหล่านี้ถูกทำลาย และเมื่อให้สารดังกล่าวขนาด 25 mg/kg ทางปาก หรือฉีดเข้าทางใต้ผิวหนังแก่หนู พบว่ามีเลือดออกในตับและระบบทางเดินอาหาร และเมื่อให้สารชนิดนี้กับหนูตะเภาและสุนัขพบว่ามีเลือดออกในช่องท้อง (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542)

2. พิษแบบเรื้อรังหรือพิษที่ทำให้เกิดมะเร็ง Barnes และ Magee เป็นกลุ่มแรกที่แสดงให้เห็นว่า สาร Diethyl Nitrosamine ขนาด 50 ppm ในอาหาร จะก่อให้เกิดมะเร็งที่ตับหนูเมื่อให้หนูกินอาหารชนิดนี้นาน 26-40 สัปดาห์ และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 200 ppm จะทำให้เกิดมะเร็งที่ไตหนูในระยะเวลาที่สั้นกว่า (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542)

สารไนโตรซามีนชนิดที่แตกต่างกัน จะก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ต่างชนิดที่อวัยวะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารไนโตรซามีน อายุและชนิดของสัตว์ ปริมาณและความถี่ของการรับสารเข้าสู่ร่างกาย รวมถึงสภาวะร่างกายในขณะรับสารด้วยเช่นกัน (จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ, 2542) ซึ่งระดับความเป็นพิษของสารกลุ่มไนโตรซามีนต่อหนูจากการทดสอบโดยการให้พร้อมอาหารทางปากแสดงดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ระดับความเป็นพิษของสารกลุ่มไนโตรซามีนต่อหนูจากการทดสอบโดยการให้พร้อมอาหารทางปาก

Nitrosamines	LD ₅₀ (µg/kg)	TD ₅₀ (mg/kg body weight/day)
N-nitrosodimethylamine (NDMA)	40	0.01
N-nitrosodiethylamine (NDEA)	280	0.11
N-nitrosopyrrolidine (NPYR)	900	2.10
N-nitrosopiperidine (NPIP)	200	1.30
N-nitrosodibutylamine (NDBA)	1200	0.69

หมายเหตุ: LD₅₀ คือ ปริมาณสารที่สัตว์ทดลองได้รับแล้วทำให้เกิดการตาย 50 เปอร์เซ็นต์

TD₅₀ คือ ปริมาณสารต่อน้ำหนักตัวต่อวันที่สัตว์ทดลองได้รับแล้วก่อให้เกิดเนื้องอก 50 เปอร์เซ็นต์

ที่มา: Fernlof and Darnerud (1996) อ้างโดย กนกรัตน์ เขียวทอง (2556)

จากตารางที่ 2-7 สามารถจัดลำดับความเป็นพิษของสารไนโตรซามีนจากมากไปน้อยได้ดังนี้ (กนกรัตน์ เขียวทอง, 2556)

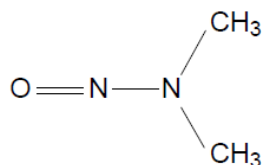
พิษเฉียบพลัน : NDMA > NPIP > NDEA > NPYR > NDBA

พิษเรื้อรัง : NDMA > NDEA > NDBA > NPIP > NPYR

จากข้อมูลความเป็นพิษของสารไนโตรซามีนข้างต้นจึงกล่าวได้ว่า NDMA เป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงสุดเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นในกลุ่มไนโตรซามีน จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการตรวจพบ NDMA จากแหล่งต่างๆมากมายทั้งในอาหาร เครื่องสำอาง เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ บุหรี่ ดิน อากาศ น้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนของ NDMA ในน้ำดื่ม น้ำประปา รวมทั้งน้ำเสียที่มีการตรวจพบ NDMA ได้บ่อยและมีปริมาณสูงกว่าสารชนิดอื่นในกลุ่มไนโตรซามีน ดังนั้นการปนเปื้อนของ NDMA ในน้ำจึงเป็นปัญหาที่ต้องเร่งป้องกันและแก้ไข เนื่องจากน้ำเป็นปัจจัยหลักในการดำรงชีวิตและมีความจำเป็นในการใช้สอย หากน้ำมีการปนเปื้อนสาร NDMA ผู้บริโภคก็ย่อมได้รับสาร NDMA เข้าสู่ร่างกายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.6.3 สารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (*N*-nitrosodimethylamine, NDMA)

NDMA เป็นสารก่อมะเร็งในกลุ่มไนโตรซามีน มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรโมเลกุลคือ $C_2H_6N_2O$ มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2-8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ NDMA แสดงดังตารางที่ 2-8



รูปที่ 2-8 สูตรโครงสร้างของ *N*-nitrosodimethylamine

ที่มา: California Environmental Protection Agency (2006)

ตารางที่ 2-8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของ NDMA

Property	Value/Description
CAS Number	62-75-9
Physical Description (physical state at room temperature)	Yellow liquid with no distinct odor
Molecular weight (g/mol)	74.08
Water solubility (g/L at 25°C)	Miscible
Boiling point (°C)	154
Specific gravity (g/mL)	1.0059
Vapor pressure at 25°C (mmHg)	2.7
Organic carbon partition coefficient (log K_{oc})	1.07
Octanol-water partition coefficient (log K_{ow})	-0.57
Henry's Law Constant (atm m ³ /mol)	2.63×10^{-7}

ที่มา: ATSDR (1999) อ้างอิงโดย USEPA (2010)

NDMA เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษสูงซึ่งพบได้ทั้งในอากาศ ดิน น้ำ บุหรือาหาร และเครื่องดื่มบางชนิด NDMA เป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง จากการตรวจวัดการปนเปื้อนของสารประกอบไนโตรซามีนในน้ำพบว่า NDMA ถูกตรวจพบได้บ่อยและมีปริมาณมากที่สุดทั้งในน้ำดื่มและน้ำเสีย (Sacher *et.al.*, 2008 และ Krasner *et.al.*, 2009) เมื่อเปรียบเทียบกับสารชนิดอื่นในกลุ่มไนโตรซามีน ปริมาณ NDMA ที่ตรวจวัดได้ทั้งในน้ำดื่มและน้ำเสียของประเทศต่างๆที่ทำการศึกษาวินิจฉัยแสดงดังตารางที่ 2-9 ในอดีต NDMA ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวกลางในการผลิตเชื้อเพลิงจรวด ใช้เป็นตัวยับยั้งการเกิดไนตริฟิเคชันในดิน เป็นตัวทำลายในอุตสาหกรรมไฟเบอร์และพลาสติก (Najm and Trussel, 2001) ต่อมาได้มีการตรวจพบการปนเปื้อนในน้ำ โดยมีการตรวจ

พบ NDMA ในน้ำดื่มเป็นครั้งแรกในประเทศแคนาดาในปี ค.ศ.1989 ซึ่งก่อตัวจากการเติมคลอรีนหรือคลอรามินเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ต่อมาในปี ค.ศ.1998 พบว่ามีการปนเปื้อนของ NDMA ในน้ำใต้ดินใกล้กับพื้นที่ที่มีการทำการบินและอวกาศ ทางตอนเหนือของแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Charrois *et.al.*, 2007; Najm and Trussell, 2001) เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันของ unsymmetrical dimethylhydrazine ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ใช้ในการผลิตหัวเชื้อเพลิงจรวด โดย NDMA ที่ตรวจพบในน้ำจะตรวจวัดได้ในหน่วยนาโนกรัมต่อลิตร (ng/L) องค์กรในต่างประเทศได้มีการกำหนดระดับความเข้มข้นที่มีความเสี่ยงของ NDMA โดยจากฐานข้อมูล Integrated Risk Information System (IRIS) ของ U.S.EPA การรับสาร NDMA ทางปากมีค่าโอกาสการก่อให้เกิดมะเร็งสูงกว่าค่ามาตรฐานของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มประมาณ 600 เท่า เมื่อกำหนดให้ความเสี่ยงของการเป็นมะเร็งตลอดช่วงชีวิตเท่ากับ 10^{-6} ค่า NDMA ในน้ำดื่มควรมีค่าต่ำกว่า 0.7 ng/L (EPA IRIS, 1993 อ้างอิงโดย U.S.EPA, 2014) หน่วยงานประเมินอันตรายต่อสุขภาพจากสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA) กำหนดค่าความเข้มข้นของ NDMA ที่มีผลต่อสุขภาพประชาชนไว้ที่ 3 ng/L (OEHHA, 2006) ออนตาริโอ ประเทศแคนาดากำหนดค่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของสาร NDMA ในน้ำดื่มที่ระดับ 9 ng/L (Government of Ontario, 2010) องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) ได้กำหนดค่า guideline value (GV) ของ NDMA ในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 100 ng/L (WHO, 2008) และ California Department of Public Health (CDPH) ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ NDMA, NDEA และ NDPA ในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 10 ng/L (CDPH, 2010)

ตารางที่ 2-9 ความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำดื่มและน้ำเสีย

แหล่งน้ำ	ng/L	ที่มา
น้ำดื่ม		
Ohsweken, Ontario, Canada	N.D. - 52	Ontario Ministry of the Environmental and Energy (1994)
Water Factory 21, California, USA	N.D. - 200	Orange Country Water District (2001)
Alberta, Canada	N.D. - 100	Charrois <i>et al.</i> (2007)
United Kingdom	≤5.8	Dillon <i>et al.</i> (2008)
Supply Systems, United Kingdom	<0.9-15.6	Templeton and Chen (2010)
Germany ^a	≤100	Schmidt and Brauch (2008)
Japan	≤10	Asami <i>et al.</i> (2009)
River water, Japan	< 0.5-5.2	Huy <i>et al.</i> (2011)
Groundwater, Japan	<0.5-3.4	Huy <i>et al.</i> (2011)
น้ำเสีย		
Primary sludge supernatant, USA	≤1000	Padhye <i>et al.</i> (2009)
WWTPs, USA	≤3000	Zhou <i>et al.</i> (2009)
WWTPs, USA	80-790	Sedlak <i>et al.</i> (2005)
WWTPs, Switzerland	5-25	Krauss <i>et al.</i> (2009)
Secondary effluent, Switzerland	<10	Krauss <i>et al.</i> (2009)

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected, WWTPs หมายถึง wastewater treatment plants,

(^a) หมายถึง after ozonation

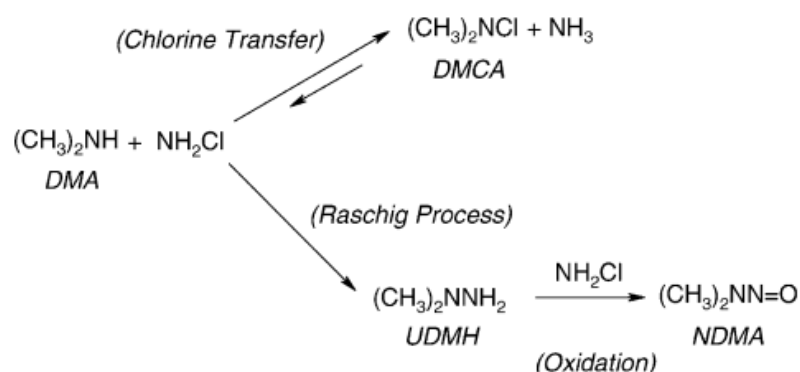
ที่มา: Sharma (2012)

2.6.4 การก่อตัวของสาร NDMA

NDMA ที่มีการปนเปื้อนในน้ำประปาหรือน้ำดื่มเกิดจากการก่อตัวระหว่างสารอินทรีย์ละลายน้ำที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบกับคลอรีนหรือคลอรามินที่ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในระบบผลิตน้ำประปา จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการรายงานถึงสารตั้งต้นชนิดต่างๆที่ก่อให้เกิดสาร NDMA ได้แก่

1. ไดเมทิลลามีน (dimethylamine, DMA) เป็นสารตั้งต้นของ NDMA ที่มีการตรวจพบมากที่สุดและมีการศึกษาถึงกลไกการก่อตัวของสาร NDMA จาก DMA อย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาข้างต้นส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์เฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ส่วนการตรวจวัด DMA ในแหล่งน้ำธรรมชาติยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย โดยจากการตรวจวัด DMA ในแม่น้ำเยอรมันพบว่ามีความเข้มข้นไม่เกิน 3 µg/L (Sacher *et al.*, 1997) และจากการศึกษาของ Cai *et al.* (2003) พบว่าน้ำในทะเลสาบมีความเข้มข้นของ DMA 20 µg/L

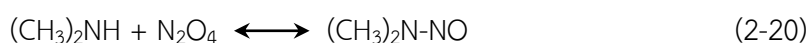
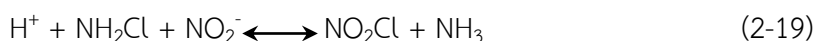
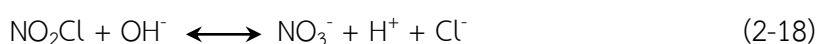
Choi and Valentine (2002) ศึกษาการก่อตัวของ NDMA จากปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอรามินกับไดเมทิลลามีนเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาระหว่างไนไตรท์กับไดเมทิลลามีนและปฏิกิริยาระหว่างไฮโปคลอไรต์กับไดเมทิลลามีน พบว่าปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอรามินกับไดเมทิลลามีนเกิด NDMA 12 $\mu\text{g/L}$ ส่วนปฏิกิริยาระหว่างไนไตรท์กับไดเมทิลลามีนเกิด NDMA 2 $\mu\text{g/L}$ และปฏิกิริยาระหว่างไฮโปคลอไรต์กับไดเมทิลลามีนไม่เกิด NDMA เนื่องจากไม่มีแอมโมเนีย แสดงให้เห็นว่า NDMA ก่อตัวได้ดีจากปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอรามินกับไดเมทิลลามีนโดยมีกลไกการก่อตัวดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 การเกิด NDMA จากปฏิกิริยาระหว่างโมโนคลอรามินกับไดเมทิลลามีน
ที่มา: Choi and Valentine (2002)

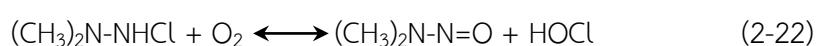
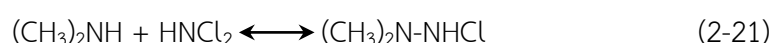
รูปที่ 2-9 แสดงถึงกลไกการเกิด NDMA โดยการเข้าทำปฏิกิริยากันของไดเมทิลลามีนและคลอรามินโดยกระบวนการ Raschig เกิดเป็นสารตัวกลางคือ 1,1-dimethylhydrazine (UDMH) จากนั้น UDMH จะถูกออกซิไดซ์โดยโมโนคลอรามินเกิดเป็น NDMA นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลลามีนและคลอรามินยังเกิดสารผลิตภัณฑ์ร่วมด้วยคือ DMCA โดยเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาการขนถ่ายคลอรีนระหว่างไดเมทิลลามีนและโมโนคลอรามิน

Choi and Valentine (2003) เสนอถึงการก่อตัวของ NDMA โดยเกิดจากการก่อตัวระหว่างไดเมทิลลามีนกับไนไตรท์โดยมีไฮโปคลอไรต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการเกิดปฏิกิริยานี้เรียกว่า การเร่งปฏิกิริยาไนไตรเซชันด้วยไฮโปคลอไรต์ แสดงดังสมการที่ (2-16) ถึง (2-20)



อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นได้ช้าและคาดว่าจะไม่ทำให้ NDMA เกิดขึ้นในปริมาณสูง (Nawrocki and Angrzejewski, 2011)

Schreiber and Mitch (2006) เสนอถึงการก่อตัวของ NDMA จากปฏิกริยาระหว่างไดคลอโรอามีนกับเอมีนทุติยภูมิโดยจะเกิดสารตัวกลางคือ chlorinated unsymmetrical dialkylhydrazine จากนั้นสารตัวกลางนี้จะถูกออกซิเดชันโดยออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen, DO) เกิดเป็น NDMA แสดงดังสมการที่ (2-21) ถึง (2-22)



Chen and Valentine (2007) ศึกษาการก่อตัวของ NDMA จาก humic substance ในแหล่งน้ำ โดยใช้ตัวอย่างน้ำจาก Iowa River Water (IRW) และศึกษาผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในการก่อตัวของ NDMA (NDMAFP) ในแหล่งน้ำที่ใช้ผลิตน้ำดื่มพบว่า NDMA 120 ng/L สามารถก่อตัวได้โดยไม่มีการเติม ไดเมทิลอามีน โดยที่ไดเมทิลอามีน 0.5 $\mu\text{g/L}$ ก่อตัวเป็น NDMA ได้เพียง 20 ng/L คิดเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ ของการก่อตัวที่เกิดขึ้น ในขณะที่ NDMA ส่วนใหญ่ก่อตัวจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาการก่อตัวของ NDMA จาก DMA เป็นหลัก ดังนั้นจากผลการศึกษาดังกล่าวจึงแสดงให้เห็นว่าการก่อตัวของ NDMA ไม่ได้เกิดจาก DMA เพียงอย่างเดียวเท่านั้น องค์ประกอบอื่นๆของสารอินทรีย์ธรรมชาติก็มีผลต่อการก่อตัวของ NDMA ด้วยเช่นกัน

2. สารประกอบเอมีนอื่นๆที่สามารถเกิดการออกซิไดซ์เป็น DMA ในระหว่างกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เช่น cationic flocculants และ anion exchange resins รวมถึง furfuryl alcohol ซึ่งเป็นสารประกอบที่ใช้ผลิตยา ranitidine (นิยมใช้รักษาแผลในกระเพาะอาหาร) จัดเป็นสารตั้งต้นของ NDMA ที่มีนัยสำคัญ (Le Roux *et al.*, 2012) โดยมีการตรวจพบ NDMA เป็นสารผลิตภัณฑ์จากระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการคลอรีเนชันของโรงงานผลิตตัวยาดังกล่าว

3. สารไดเมทิลซัลฟาไมด์ (dimethylsulfamide, DMS) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสารกำจัดเชื้อรา tolylfluanid ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีการตรวจพบทั้งในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินโดยมีค่าอยู่ในช่วง 100-1000 และ 50-90 ng/L ตามลำดับ (Schmidt and Brauch, 2008) ซึ่งการใช้ไอโซนบำบัดน้ำที่มีสาร DMS จะส่งผลให้เกิดการก่อตัวของ NDMA

4. การกรองผ่านเมมเบรนชนิดนาโนฟิลเตรชัน (nanofiltration, NF) จากการศึกษาของ Ersan *et al.* (2015) พบว่าน้ำส่วนที่กรองผ่านเมมเบรน (permeate) มีค่าโอกาสการก่อตัวของ NDMA (NDMAFP) สูงอยู่ในช่วง 180-450 ng/L อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถระบุชนิดของสารตั้งต้นที่ถูกชะออกจากเมมเบรนได้ แต่สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากปฏิกริยาที่ไม่สมบูรณ์ของพอลิเมอร์หรือการเติมสารบางอย่างในกระบวนการผลิตเมมเบรน

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการก่อตัวของสาร NDMA ในน้ำเกิดได้จากสารตั้งต้นหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งสารตั้งต้นของ NDMA ตามแหล่งที่มาออกได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ สารตั้งต้นที่เกิดจากธรรมชาติและสารตั้งต้นที่เกิดจากมนุษย์ สารตั้งต้นของ NDMA ที่เกิดจากธรรมชาติได้แก่ สาหร่าย (algae) สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOM) สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON) และผลผลิตของจุลินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนสารตั้งต้นที่เกิดจากมนุษย์ ได้แก่ พอลิเมอร์ที่มีเอมีนเป็นองค์ประกอบ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ ผลิตภัณฑ์ด้านเภสัชกรรม สารกำจัดเชื้อรา สารกำจัดศัตรูพืช น้ำเสียจากโรงงานยาง โรงงานผลิตปะเก็นยาง เป็นต้น (Ersan *et al.*, 2015) แต่จากการตรวจสอบเอกสารพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาการก่อตัวของ NDMA จาก DMA ส่วนการศึกษาการก่อตัวของ NDMA จากสารอินทรีย์ธรรมชาติยังมีค่อนข้างน้อยในขณะที่สารอินทรีย์ธรรมชาติมีอิทธิพลต่อการเกิด NDMA สูงกว่า DMA ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจากการวิจัยของ Chen *et al.* (2007) ดังนั้นการศึกษากการก่อตัวของ NDMA จากสารอินทรีย์ธรรมชาติจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากสารอินทรีย์ธรรมชาติอยู่ทั่วไปในแหล่งน้ำโดยเฉพาะแหล่งน้ำผิวดินซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุด

2.6.5 การวิเคราะห์สารไนโตรซามีนและ NDMA

วิธีการตรวจวิเคราะห์สารไนโตรซามีนและ NDMA ในน้ำโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ (Pozzi *et al.*, 2011)

1. การสกัดสารตัวอย่างโดยวิธีการสกัดด้วยของแข็ง (solid phase extraction: SPE), Solid Phase Micro-Extraction (SPME) หรือการสกัดด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction, LLE)

2. การตรวจวัดด้วยเทคนิค Gas Chromatography (GC) โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิดต่างๆ ได้แก่ Thermal Energy Analyzer (TEA), Nitrogen Chemiluminescence (NCD), Nitrogen-Phosphorus Detector (NPD), Mass Spectrometry (MS), tandem Mass Spectrometry (MS/MS) และ High Resolution Mass Spectrometry (HRMS) หรือการตรวจวัดด้วยเทคนิค Liquid Chromatography (LC) โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด fluorescence detector and tandem mass spectrometry (LC-MS/MS)

อย่างไรก็ตามเทคนิคการตรวจวัดที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เทคนิค Gas Chromatography tandem mass spectrometry (GC-MS/MS) ตามวิธีมาตรฐานของ USEPA Method 521 ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สารกลุ่มไนโตรซามีนในน้ำดื่ม โดยวิธีนี้อาศัยหลักการของการทำให้สารเข้มข้นโดยเทคนิคการสกัดด้วยของแข็ง (solid phase extraction, SPE) ร่วมกับเทคนิค GC-MS ในการตรวจวัดสารมลพิษกับสารตัวแทนมาตรฐาน (internal standards) นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังมีการตรวจวัดสารไนโตรซามีนด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น Ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) เป็น

เทคนิคในการวิเคราะห์สารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิดในน้ำดื่ม เหมาะสำหรับการวิเคราะห์หลายตัวอย่างในเวลาเดียวกันและมีความไวสูง (Wang *et al.*, 2011) การตรวจวัดไนโตรซามีนแบบรวดเร็วทำได้โดยการสกัดด้วยเทคนิค SPE ซึ่งใช้ LiChrolut EN เป็นตัวดูดซับ ชะสารตัวอย่างด้วย acetonitrile: ethylacetate อัตราส่วน 1:9 จากนั้นทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค GC-NPD พบว่าปรากฏพีคของสาร NDMA, NDEA, NPyr, NMor, NPip และ NDBA ชัดจำกัดในการตรวจวัดของสารไนโตรซามีนทั้ง 6 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-1.7 ng/L แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จำเป็นต้องมีการยืนยันชนิดของสารด้วยเทคนิค GC-MS (Jurado-Sánchez *et al.*, 2010 อ้างอิงโดย Nawrocki and Andrzejewski, 2011)

2.6.6 การลดการก่อตัวและการกำจัด NDMA

การลดการก่อตัวของ NDMA สามารถทำได้โดยการลดปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำก่อนการเติมคลอรีนหรือคลอรามินเพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งเมื่อระดับ DON ลดลง โอกาสการก่อตัวของ NDMA ก็จะลดลงด้วย Lee and Westerhoff (2006) ทำการศึกษาการกำจัด DON ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับพอลิเมอร์สามารถกำจัด DON ได้ดีกว่าการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว 15-20 เปอร์เซ็นต์ แต่ในบางกรณีกระบวนการโคแอกกูเลชันก็สามารถทำให้ NDMAFP เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากเกิดฟล็อกที่มีสารอินทรีย์ (Krasner *et al.*, 2009) นอกจากนี้กระบวนการเติมโอโซน (ozonation) ซึ่งโดยทั่วไปเชื่อว่าสามารถลดค่า NDMAFP ได้ แต่จากการศึกษากลับพบว่ากระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิด NDMA เพิ่มขึ้นถึง 46 เปอร์เซ็นต์ (Nawrocki and Andrzejewski, 2011)

วิธีการที่ใช้กำจัด NDMA ได้แก่ advanced oxidation process (AOPs), reverse osmosis (RO), radiolytic destruction, chemical reduction และ biodegradation เป็นต้น แต่ไม่มีวิธีใดสามารถกำจัด NDMA ได้อย่างสมบูรณ์ วิธี reverse osmosis กำจัด NDMA ได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ การใช้ซีโอไลต์และเรซิน XAD-7 กรอง NDMA ได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ การใช้โอโซนจะทำให้ NDMA สลายตัวเข้ามา การฉายด้วยวิธียูวีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะได้ NO_3^- เป็นผลพลอยได้หลักและมี DMA น้อยกว่าการทำสลายโดยตรง (เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ์, 2555) ส่วนกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ต้องใช้ระยะเวลาในการกำจัด

2.7 กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation)

ความขุ่นหรือสารแขวนลอยเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำเป็นที่น่าสนใจ การกำจัดความขุ่นในน้ำทำได้ง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคเป็นหลัก (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542) อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ย่อมมีน้ำหนักมากพอที่จะแยกตัวออกจากน้ำและตกตะกอนได้ด้วยตัวเองเมื่อตั้งทิ้งไว้ ตะกอนที่ตกลงสู่พื้นน้ำเรียกว่าสลัดจ์ (sludge) ส่วนอนุภาคที่ทำให้เกิดความขุ่นซึ่งเป็นปัญหาต่อระบบประปาคืออนุภาคขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองเรียกว่า คอลลอยด์ (colloid)

เป็นอนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร (1 นาโนเมตร) จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (1 ไมครอน) กระจายตัวอยู่ในน้ำ ได้แก่ สาหร่าย สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งนอกจากจะก่อให้เกิดความขุ่นแล้ว อนุภาคดังกล่าวยังก่อให้เกิดกลิ่นและสีในน้ำด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดออกจากน้ำ แต่เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักน้อยไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองภายในระยะเวลาที่จำกัด (ตารางที่ 2-10) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการจับกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ จนเป็นก้อน หรือ ฟล็อก (floc) ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น กระบวนการในการทำให้คอลลอยด์หลายๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นฟล็อก เรียกว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation)

ตารางที่ 2-10 การเปรียบเทียบอัตราเร็วในการตกตะกอนของสารต่างๆ

สารต่างๆ	เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	เวลาที่ต้องการในการตกตะกอนไกล 1 เมตร
กรวด	10	1 วินาที
ทรายหยาบ	1	10 วินาที
ทรายละเอียด	0.1	120 วินาที
ตะกอนดิน	0.01	120 นาที
แบคทีเรีย	0.001	192 ชั่วโมง
คอลลอยด์	0.0001	730 วัน
	0.00001	10 ปี
	0.000001	มากกว่า 20 ปี

ที่มา: มั่นสิน ตันจุลเวศม์ (2542)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน หมายถึง การเติมสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ในน้ำและกวนอย่างรวดเร็ว เพื่อทำลายเสถียรภาพ (destabilization) โดยการลดแรงผลักระหว่างอนุภาคต่างๆลง เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่าย (มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2542) เมื่ออนุภาคมีการสัมผัสกันจะเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า ฟล็อก (floc) ซึ่งเป็นการรวมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการสร้างตะกอน โดยทำการกวนช้าเพื่อทำให้อนุภาคต่างๆ เกิดการเคลื่อนที่ไปมาในน้ำมีการสัมผัสกันเกิดขึ้น เมื่ออนุภาคเกิดการสัมผัสกัน ทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นฟล็อกพร้อมที่จะตกตะกอน (โกมล ศิวะบวร, 2523) กระบวนการตกตะกอน (sedimentation) เป็นกระบวนการที่แยกของแข็งออกจากของเหลว โดยการอาศัยแรงดึงดูดของโลกเพื่อให้ได้ส่วนน้ำใสและตะกอนเหลวหรือสลัดจ์ (sludge) ที่มีความเข้มข้นของตะกอนสูงโดยนำของเหลวไปผ่านตัวกลางที่มีความพรุนหรือวัสดุต่างๆ ที่มีความพรุนเพื่อให้ได้น้ำสะอาด (มั่นสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

ระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการหลักในการบำบัดน้ำเพื่อกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยต่างๆ นอกจากนี้กระบวนการโคแอกกูเลชัน

ยังสามารถลดสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิด DBPs อีกด้วย แต่กระบวนการโค-แอกกูเลชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก (HPO) เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีและกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม non-humic (HPI) ซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กได้น้อย (Edzwald, 1993; Nissinen *et al.*, 2001; Laor and Avnimelech, 2002; Tan *et al.*, 2005; Sharp *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Bose and Reckhow, 2007; Ji *et al.*, 2008) จากการศึกษาของ Lee and Westerhoff (2006) พบว่าการโคแอกกูเลชันโดยใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตร่วมกับพอลิเมอร์สามารถกำจัด DON ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของไนโตรซามีนได้ดีกว่าการใช้อะลูมิเนียมซัลเฟตเพียงอย่างเดียว 15-20 เปอร์เซ็นต์ Sacher *et al.* (2008) ศึกษาการลดโอกาสการก่อตัวของสารกลุ่มไนโตรซามีนโดยกระบวนการโค-แอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ พบว่าการใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันสามารถลดค่าโอกาสการก่อตัวของ NDMA, NDEA และ NPyr ได้ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ Pramanik *et al.* (2015) พบว่าการโคแอกกูเลชันน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำด้วย Alum และ *M. oleifera* (สาหร่ายเมล็ดมะรุ่ม) สามารถลดค่า DOC ในน้ำดิบจากจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 5.8 mg/L ให้เหลือ 4.3 และ 4.5 mg/L ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการลด DOC คิดเป็น 27 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดค่า DON ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.92 mg/L ให้เหลือ 0.78 และ 0.84 mg/L ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการลด DON คิดเป็น 15 และ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพในการลดกลุ่มสารอินทรีย์และ DON โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันจากงานวิจัยข้างต้นกล่าวได้ว่าการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารโคแอกกูแลนต์เพียงชนิดเดียวกำจัดค่า DON ได้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากสารในกลุ่ม DON ส่วนใหญ่ประกอบด้วย amino acids, proteins, amino sugars, amides, nitriles, pyrroles, purines และ pyrimidines ซึ่งมีสมบัติเป็นสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) กำจัดได้ค่อนข้างยากโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด DON และสารชนิดอื่นๆในกลุ่ม HPI ได้ดียิ่งขึ้น

2.7.1 กลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กลไกการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์และการทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค (มันส์ติน ตันซูลเวคม์, 2542; Masschelein, 1992)

ขั้นตอนที่ 1 การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ (destabilization) เกิดขึ้นโดยมีกลไก 4 รูปแบบ ดังนี้

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) โดยการลดค่า zeta potential (Z_p) ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับประจุคอลลอยด์ในชั้นกระจาย ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และทำให้ค่า Z_p ลดลงตามไปด้วย

2. การดูดซับและการทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption หรือ charge neutralization) เกิดจากสารที่มีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ถูกดูดซับไว้บนผิวของคอลลอยด์ ส่งผลให้อานาจศักย์ไฟฟ้าลดลง และเสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลาย ซึ่งกลไกการดูดซับนี้ แตกต่างจากกลไกการลดความหนาของชั้นกระจายคือ ก. กลไกแบบดูดซับ ต้องการไอออนที่มีประจุตรงข้ามน้อยกว่ากลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจาย เนื่องจากกลไกแบบดูดซับ ไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคคอลลอยด์ได้โดยตรง จึงส่งผลให้เกิดการทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ได้ดีกว่าการลดความหนาของชั้นกระจายที่ไอออนประจุตรงข้ามไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

ข. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบดูดซับ คือ ปริมาณสารสร้างตะกอนที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดปริมาณอนุภาคคอลลอยด์

ค. กลไกแบบดูดซับสามารถเปลี่ยนแปลงชนิดประจุของอนุภาคคอลลอยด์ให้กลายเป็นประจุตรงข้ามกับประจุเดิมได้ (charge reversal) เมื่อมีการใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า ทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ ส่วนกลไกแบบการลดความหนาของชั้นกระจายไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นประจุตรงข้ามได้ ซึ่งอาจเกิดจากจำนวนไอออนประจุตรงข้ามในชั้นกระจายถูกจำกัดด้วยศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์เสมอ ดังนั้นจึงทำให้ประจุตรงข้ามไปอยู่นอกชั้นกระจาย ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณสารสร้างตะกอนมากเพียงใดก็ไม่สามารถทำให้ประจุของคอลลอยด์มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นประจุตรงข้ามกับประจุเดิมได้

3. การเพิ่มน้ำหนักและขนาดอนุภาคคอลลอยด์โดยการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกสารอนินทรีย์ หากมีการเติมสารประกอบของโลหะบางชนิดลงไปใต้น้ำในปริมาณที่เพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์อาจทำหน้าที่เป็นแกนในของผลึกเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึกทำให้เกิดการตกตะกอนขึ้นอย่างรวดเร็ว กลไกดังกล่าวอาจถือเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบนี้เรียกว่า sweep floc coagulation หรือ sweep coagulation หรือการห่อหุ้มคอลลอยด์ กลไกนี้มีความแตกต่างจากกลไกการลดความหนาของชั้นกระจายและการดูดซับ คือ ความเข้มข้นของคอลลอยด์แปรผกผันกับปริมาณที่เหมาะสมของสารสร้างตะกอน หมายถึง น้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ความเข้มข้นของคอลลอยด์ต่ำ) จำเป็นต้องใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณสูงเพื่อให้เกิดการโคแอกกูเลชันได้ดีทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์ต่ำจะมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคได้น้อย แม้เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์จะถูกทำลายแต่การโคแอกกูเลชันอาจไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณมากเพื่อสร้างให้เกิดผลึกจำนวนมากเพื่อเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ ส่วนน้ำที่มีความขุ่นสูง มีอนุภาคคอลลอยด์จำนวนมาก จึงมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคสูงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมาก จึงไม่จำเป็นต้องใช้สารสร้างตะกอนในปริมาณสูง

4. การใช้สารโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (polymer bridging) โพลีเมอร์มีคุณสมบัติในการเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้ ซึ่งการเกาะติดดังกล่าวอาจเกิดจากประจุที่มีความแตกต่างกันหรือเกิดจากแรงทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่แตกต่างกันระหว่างโพลีเมอร์กับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่แล้ว โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะกับอนุภาคอื่นๆ อนุภาคดังกล่าวถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) การที่อนุภาคนี้จะสามารถจับกับอนุภาคอื่นได้ต้องอาศัยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อม หากปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระนี้จะจับบนอนุภาคคอลลอยด์ตัวเดิมทำให้อนุภาคคอลลอยด์นั้นมีที่ว่างน้อยลง และไม่มีปลายอิสระของโพลีเมอร์ไว้สำหรับจับกับอนุภาคอื่น เป็นผลให้อนุภาคนั้นมีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่อีกครั้ง ส่วนการเติมสารโพลีเมอร์ลงไปนี้น้ำในปริมาณที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้ เนื่องจากสารโพลีเมอร์ไปเกาะจับบนผิวของคอลลอยด์มากเกินไปจนไม่เหลือที่ว่างบนพื้นผิวของอนุภาคทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่จับอยู่บนอนุภาคอื่นไม่สามารถเข้ามาเกาะจับได้ นอกจากนี้การกวนในระยะเวลาสั้นหรือเร็วเกินไปอาจส่งผลให้ฟล็อกที่ก่อตัวขึ้นแล้วแตกตัวกลับเป็นส่วนๆ ทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์จับกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวเดิม ทำให้อนุภาคคอลลอยด์นั้นกลับมามีเสถียรภาพอีกครั้งหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้ได้มากที่สุด อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะมีโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคได้ง่ายกว่าคอลลอยด์ที่ยังมีเสถียรภาพอยู่ ซึ่งเมื่ออนุภาคเกิดการสัมผัสกันแล้วควรยึดติดกันแน่นหนาและหลุดออกจากกันได้น้อยที่สุด

กระบวนการโคแอกกูเลชันจะสามารถเกิดขึ้นได้และให้ผลที่ดีขึ้นอยู่กับการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้มีความเหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่ต้องมีการควบคุมประกอบด้วย ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน ความเร็วแรงแตรเวียน ค่าพีเอชของน้ำ และระยะเวลาในการกวนน้ำ

2.7.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า สารสร้างตะกอน หรือ โคแอกกูแลนต์ (coagulant) สารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ สารส้ม โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) และสารประกอบเหล็กบางชนิด เมื่อสารโคแอกกูแลนต์ถูกเติมลงไปนี้น้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบที่มีวาเลนซ์ (valence) สูง ไอออนบวกสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ OH^- ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก สารไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบ ทำให้อนุภาคกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคนั้นเอง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

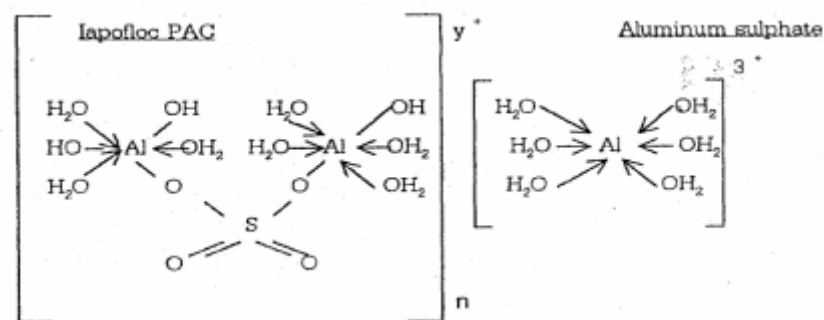
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอนหลักเนื่องจาก PACl ถูกเตรียมขึ้นจากอลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น AlCl_3 หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมโพลีเมอร์ ซึ่งเมื่อเติม

สารส้มลงไปในการละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือ 10–11 เปอร์เซ็นต์ และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อไปทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม PACl มีสูตรทั่วไปคือ $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ ลักษณะทั่วไปของ PACl อาจอยู่ในรูปสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อยและอาจอยู่ในรูปของผงสีขาวหรือสีเหลือง (การประปานครหลวง, 2552) คุณลักษณะทางเคมีของ PACl แสดงดังตารางที่ 2-11 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACl และ สารส้ม แสดงดังรูปที่ 2-10 (Hundt and O'Melia, 1988; Viraraghavan and Wimmer, 1988) เมื่อเติม PACl ลงในน้ำจะเกิดการไฮโดรไลซ์ทันทีที่เกิดเป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย ซึ่งตัวที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{+7}$ หรือ Al^{+13} การรวมตัวเป็นอลูมิเนียมตัวนี้ขึ้นอยู่กับระดับการรวมตัวของต่างกับสารละลายอลูมิเนียม ชนิดและความเข้มข้นของต่าง ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ และอุณหภูมิ ซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือปริมาณของต่างที่เติมลงไปและระดับของความเป็นกลางของน้ำ

ตารางที่ 2-11 คุณลักษณะทางเคมีของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ ตามมาตรฐานของ มอก. 2150-2546

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละโดยน้ำหนัก	10.0 ถึง 11.0
ความเป็นด่าง ร้อยละโดยน้ำหนัก	4.5 ถึง 65
ความเป็นกรด-ด่าง เมื่อทำเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร	3.5 ถึง 5.0
ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ร้อยละโดยน้ำหนัก	3.5

ที่มา: การประปานครหลวง (2552)



รูปที่ 2-10 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และ สารส้ม

ที่มา: Viraraghavan and Wimmer (1988)

ค่าพีเอชของน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชัน จากการวิจัยของ Dempsey *et al.* (1985) พบว่า PACl เป็นสารโคแอกกูแลนท์ที่ดีกว่าสารส้มเมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำ มีค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่าพีเอชที่เหมาะสมของสารส้ม และมีความเข้มข้นของคอลลอยด์ต่ำถึงปานกลาง โดยเฉพาะที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 5 และมากกว่า 7 นอกจากนี้คุณภาพของน้ำดิบก็มีผลต่อประสิทธิภาพของการโคแอกกูเลชันเช่นกัน โดยจากการวิจัยของ Kawamura and Trussel (1991) พบว่า PACl ใช้ได้ผลค่อนข้างดีในน้ำที่มีค่าความขุ่นสูง (>30 NTU) มีค่าความเป็นด่างต่ำ และมีอุณหภูมิต่ำ แต่ PACl มีข้อด้อยคือมีราคาสูงกว่าสารส้มแม้ว่าจะใช้ในปริมาณที่ต่ำกว่า

การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl เปรียบเทียบกับสารสร้างตะกอนชนิดอื่น เช่น สารส้ม เพอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) จากงานวิจัยที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น สารอินทรีย์ และสารตั้งต้นของ DBPs ได้ดีกว่าสารส้มและ $FeCl_3$ จากการศึกษาของ Ivancev-Tumbas *et al.* (2002) และ Rizzo *et al.* (2005) พบว่าการใช้ PACl เป็นสารสร้างตะกอนมีประสิทธิภาพในการลดโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (THMFP) ได้ดีกว่าการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน เพราะ PACl สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากน้ำดิบได้ดีกว่าสารส้ม โดย Rizzo *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม PACl และ $FeCl_3$ ในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำ Salerno Southern Italy พบว่า PACl สามารถกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติดีกว่า $FeCl_3$ และสารส้ม (PACl > $FeCl_3$ > สารส้ม) โดยการใช้ PACl ที่มีความเข้มข้น 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 6 สามารถกำจัดค่าความขุ่น DOC และ THMFP มีค่าเท่ากับ 84, 50 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สมศักดิ์ ปัสานานนท์ (2548) ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl สารส้ม และ $FeCl_3$ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในรูปของ UV-254 และ TOC ของน้ำดิบประปาที่มีความขุ่นต่ำและความขุ่นสูง จากระบบประปาบางเขน กรุงเทพมหานคร พบว่า PACl สามารถกำจัดค่า UV-254 และ TOC สูงสุด เท่ากับ 74 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และใช้ในปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารส้มและ $FeCl_3$ PACl จึงเป็นสารสร้างตะกอนที่มีความเหมาะสมมากที่สุดทั้งในน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำและความขุ่นสูง

Velasco *et al.* (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ Bakio Northern Spain โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารส้มและ PACl พบว่าการใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 6 สามารถลดค่า DOC, UV-254 และ THMFP ได้ดีกว่าการใช้สารส้ม โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถกำจัด DOC, UV-254 และ THMFP เท่ากับ 31 60 และ 64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Nagare *et al.* (2008) ศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl ในการกำจัดสารฮิวมิกของแม่น้ำในเมือง Kitami Japan พบว่าการใช้ PACl 30 mg/L สามารถลดค่าความขุ่นและสารฮิวมิกได้เท่ากับ 94 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Krasner *et al.* (2008) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและโอกาสการก่อตัวของผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-product formation potential, DBPFP) ในน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์

จากน้ำเสียโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มพบว่า การใช้สารส้มจนถึง 100 mg/L ลดค่า DOC และ DON ได้ต่ำกว่า 30 เพอร์เซ็นต์ และการใช้สารส้ม 40 หรือ 80 mg/L ลดค่า NDMAFP ได้ต่ำกว่า 10 เพอร์เซ็นต์

Kumsuvan (2013) ศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของ NDMA ในน้ำดิบประปาบางเขน และบางเลน กรุงเทพมหานคร โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และ สารส้ม พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดีกว่าสารส้มโดยการใช้สารส้ม 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดความขุ่นในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนจากค่าเริ่มต้น 50.4 และ 17.4 NTU ให้ลดลงเหลือ 2.1 และ 2.5 NTU คิดเป็น 93 และ 86 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl 20 และ 10 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดค่าความขุ่นในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนจากค่าเริ่มต้น 50.4 และ 17.4 NTU ให้ลดลงเหลือ 0.44 และ 3.74 NTU คิดเป็น 99 และ 79 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้สารส้ม 80 และ 150 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดค่า DOC ในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนจากค่าเริ่มต้น 4.2 และ 7.3 mg/L ให้ลดลงเหลือ 2.8 และ 5.1 mg/L คิดเป็น 33 และ 30 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl 80 และ 150 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดค่า DOC ในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนจากค่าเริ่มต้น 4.2 และ 7.3 mg/L ให้ลดลงเหลือ 2.4 และ 4.5 mg/L คิดเป็น 42 และ 38 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้ สารส้ม 80 และ 250 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดค่า DON ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้น 0.25 และ 0.34 mg/L ให้ลดลงเหลือ 0.14 และ 0.17 mg/L คิดเป็น 43 และ 50 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl 80 และ 150 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถลดค่า DON ในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนจากค่าเริ่มต้น 0.25 และ 0.34 mg/L ให้ลดลงเหลือ 0.14 และ 0.17 mg/L คิดเป็น 41 และ 51 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.7.3 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC)

การเกาะหรือดูดติดผิว (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้ถือเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดติดเรียกว่า adsorbate ของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent (มันส์น ตัณฑุลเวศม์, 2542)

กระบวนการดูดติดผิวมีบทบาทในระบบประปา คือ สามารถกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงชั้นโมเลกุลซึ่งไม่อาจกำจัดได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองแบบธรรมดา สารที่สามารถดูดติดโมเลกุลต่างมาติดผิวได้ (adsorbent) แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ (มันส์น ตัณฑุลเวศม์, 2542)

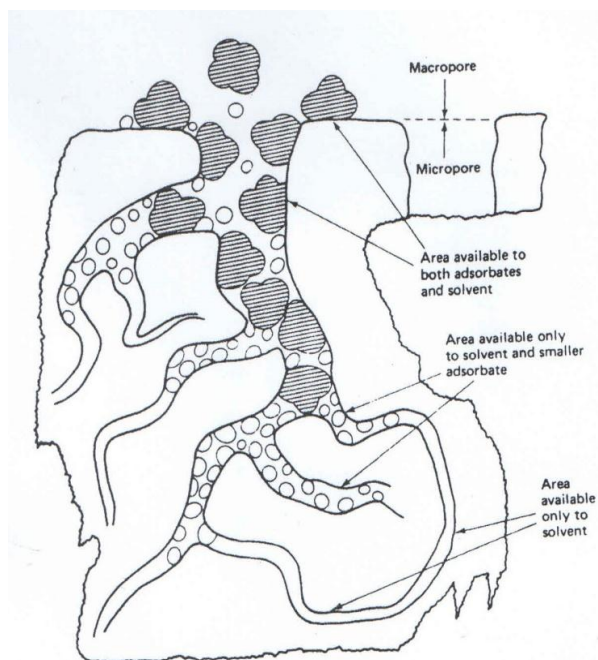
1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char)

2. ถ่านกัมมันต์ เป็น adsorbent ที่ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 600-1000 m²/g

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 m²/g

อย่างไรก็ตาม adsorbent ที่นิยมใช้ในระบบประปาคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (รูปที่ 2-11) รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม จนถึง 20000 อังสตรอม โดยวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ ได้แก่ กระดูกสัตว์ ถ่านหินบางชนิด กะลามะพร้าว เมล็ดในของผลไม้ เป็นต้น (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

การที่ถ่านกัมมันต์ต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ ซึ่งวิธีการวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจทำได้โดยการวัด Iodine Number หรือ Molass Number โดย Iodine Number แสดงถึงสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลเล็ก ส่วน Molass Number แสดงถึงสมรรถนะในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลใหญ่ ดังนั้นกระบวนการดูดติดผิวที่ใช้ในระบบประปานิยมใช้ค่า Iodine Number เพราะน้ำดิบประปามักมีสารโมเลกุลเล็กมากกว่าสารโมเลกุลใหญ่ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ถ่านกัมมันต์ ที่นิยมใช้ในระบบประปามี 2 ชนิดคือ ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) และชนิดเกร็ด (granular activated carbon, GAC) โดยถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า การเติมถ่านกัมมันต์ชนิดผงอาจทำพร้อมกับการเติมสารโคแอกกูแลนต์ซึ่งคาร์บอนที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดทรายกรองน้ำ แข็งแต่เปราะและเบากว่าทราย การใช้งานถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ดสามารถบรรจุถังให้น้ำไหลผ่านในลักษณะที่คล้ายกับการกรองน้ำปกติ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ดมีข้อดีคือเมื่อใช้แล้วสามารถนำไป Regeneration ได้โดยการนำไปเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงมาก แต่การทำ Regeneration ในแต่ละครั้งต้องมีการสูญเสียถ่านกัมมันต์ไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีข้อดีคือมีราคาถูกกว่าชนิดเกร็ดประมาณ 2-3 เท่า สามารถเพิ่มและลดปริมาณถ่านกัมมันต์ได้ทันทีและสะดวก ไม่ต้องมีการลงทุนเบื้องต้นสูง และการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)



รูปที่ 2-11 รูปตัดแสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายใน Activated carbon
ที่มา: มั่นสิน ตันทูลเวศม์ (2542)

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Powder Activated Carbon (PAC) ซึ่งโดยทั่วไประบบประปามีการใช้ PAC ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของกลิ่นและรสในน้ำ (Najm *et al.*, 1991) แต่อย่างไรก็ตามมีการวิจัยที่รายงานถึงประสิทธิภาพของ PAC ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ DBPs เช่นกัน ประสิทธิภาพของ PAC ขึ้นอยู่กับชนิดของ PAC ที่ใช้รวมถึงคุณภาพของน้ำดิบที่นำมาบำบัด โดยทั่วไปกระบวนการโคแอกกูเลชันกำจัดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีกว่าสารที่ไม่ใช่ฮิวมิกและสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (Amy *et al.*, 1992 อ้างอิงโดย Uyak *et al.*, 2007) ดังนั้นจึงมีการใช้ PAC เพื่อกำจัดสารที่ไม่ใช่ฮิวมิกและสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (Uyak *et al.*, 2007) ซึ่งการใช้ PAC โดยทั่วไปมักใช้ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ จากการศึกษาของ Uyak *et al.* (2007) พบว่าการโคแอกกูเลชันน้ำดิบจาก Turkish lake ด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ร่วมกับ PAC 40 mg/L สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า DOC จาก 45 เปอร์เซ็นต์ ให้เพิ่มขึ้นเป็น 76 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาของ Álvarez-Uriarte *et al.* (2010) พบว่าการเติม PAC ปริมาณเล็กน้อย (สูงสุด 50 mg/L) ในระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด THMFP จาก 40 เปอร์เซ็นต์ เป็น 70 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาของ Carrière *et al.* (2009) พบว่าการใช้ PAC 11 mg/L ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันในการบำบัดน้ำจากระบบประปาของแคนาดา สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า DOC ได้เพียง 7 เปอร์เซ็นต์ และไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า THMFP ได้

2.7.4 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การโคแอกกูเลชันที่มีประสิทธิภาพดี ขึ้นอยู่กับการควบคุมสภาวะต่างๆให้เหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่ต้องมีการควบคุม ได้แก่ ปริมาณและชนิดของสารสร้างตะกอน ระดับค่าพีเอชของน้ำ ความเร็วแกรเดียนท์ (G) และระยะเวลาในการกวนน้ำ แต่เนื่องจากมักมีการกำหนดความเร็วแกรเดียนท์และระยะเวลาการกวนน้ำไว้ก่อนแล้วในตอนออกแบบระบบ จึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงมุ่งหมายควบคุมปริมาณของสารสร้างตะกอนและระดับค่าพีเอชเป็นหลัก เพื่อให้กระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพสูงสุด การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดโคแอกกูเลชันมี 2 วิธี คือ วิธีจาร์เทสต์ และวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

จาร์เทสต์เป็นวิธีการที่ใช้กันมาอย่างยาวนานและได้รับความนิยมมากที่สุด การทดสอบจาร์เทสต์ทำได้โดยการทดสอบในบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ชุด ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารเคมีและมีการกำหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบระยะเวลาการกวนน้ำ และระยะเวลาในการตกตะกอน แล้วจึงทำการทดลองโดยเติมสารสร้างตะกอนที่มีระดับความเข้มข้นต่างๆลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ส่วนระดับพีเอชอาจมีค่าแปรเปลี่ยนหรือคงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายของการทำจาร์เทสต์นั้น จากการทดลองดังกล่าวจะได้ปริมาณของสารสร้างตะกอนและระดับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน ส่วนวิธีการวัดซีตาโพเทนเชียลเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งการเติมสารโคแอกกูแลนต์จะทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลของอนุภาคคอลลอยด์มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อซีตาโพเทนเชียลมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ การโคแอกกูเลชันจะเกิดได้ดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากอุปกรณ์ในการดำเนินการมีราคาสูงและต้องอาศัยความชำนาญอย่างมากในการวัด (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีจาร์เทสต์ในการควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl เป็นสารโคแอกกูแลนต์ และเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC โดยควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสภาวะในการโคแอกกูเลชันและการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันข้างต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ DBPs ในน้ำดิบประปาคลองอยู่-ตะเภาได้ดี จากการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และชัยศรี สุขสาโรจน์ (2551) พบว่าการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L และ Polymer ที่ระดับความเข้มข้น 1 mg/L ร่วมกับ PAC 80 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการลดสารอินทรีย์ในน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอยู่-ตะเภา โดยสามารถลดค่า DOC UV-254 THMFP ได้เฉลี่ย 75 68 83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่สภาวะเดียวกันสามารถลดค่า DOC_{HPI} DOC_{HPO} $THMFP_{HPI}$ $THMFP_{HPO}$ ได้เฉลี่ย 72 88 78 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ (2555) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอยู่-ตะเภาช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่ระดับความเข้มข้น 5 10 20 30 และ

40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 8.5 พบว่าการใช้ PACl เข้มข้น 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดีกว่าการใช้ PACl เข้มข้น 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ซึ่งการใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 8.5 สามารถลดค่า DOC ได้เฉลี่ย 64 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ลดค่า UV-254 ได้เฉลี่ย 59 และ 49 เปอร์เซ็นต์ และลดค่า THMFP ได้เฉลี่ย 51 และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 การตรวจวัดปริมาณ DON และสาร Nitrosamines

Chang *et al.* (2013) ศึกษาตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนในเขต Kinmen ประเทศไต้หวัน พบว่าระดับความเข้มข้นของ DON ในน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0.23-1.24 mg-N/L มีค่าใกล้เคียงกับค่า DON ที่ตรวจวัดได้ในแหล่งน้ำจากแม่น้ำและทะเลสาบซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.004-2.5 mg-N/L (Westerhoff and Mash, 2002) การทดสอบปริมาณการก่อตัวของสารกลุ่ม N-DBPs พบว่าปริมาณ amphiphilic bases/neutrals (AMPB/N) fraction (DON = 1.4 mg-N/L) ของน้ำดิบ Kinmen ที่ถูกบำบัดด้วยสารคลอรัامين (NH₂Cl) เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญต่อการก่อตัวของสาร N-nitrosodimethylamine (NDMA) ได้สูงถึง 9,238 ng/L

Qin *et al.* (2015) ศึกษา น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากชุมชนเมือง 2 แห่งที่ตั้งอยู่ในรัฐเวอร์จิเนีย (Virginia) และรัฐโคโลราโด (Colorado) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าปริมาณ DON ในน้ำมีค่า 0.33 mg-N/L และ 0.81 mg-N/L ตามลำดับ องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ของ DON อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) โดยมี hydrophilic DON คิดเป็นสัดส่วน 64 และ 72 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ DON ทั้งหมด ตามลำดับ โดยสรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ยืนยันแล้วว่าธรรมชาติของ DON ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภท hydrophilic

Zhang *et al.* (2015) ตรวจวัดสารอนินทรีย์ไนโตรเจนของน้ำดิบจากโรงงานบำบัดน้ำจากเมือง Pinghu ประเทศจีน ได้แก่ ปริมาณแอมโมเนีย (NH₄⁺-N) ไนไตรท์ (NO₂⁻-N) และไนเตรต (NO₃⁻-N) และค่า DON พบว่ามีค่าเฉลี่ยที่ 2.43 mg/L 0.29 mg/L 1.32 mg/L และ 0.53 mg/L ตามลำดับ โดยการทดลองบำบัดน้ำด้วยระบบกรองชีวภาพ (biofilter) ในคอลัมน์ที่ใช้ตัวกรองเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon biofilter) พบว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีแนวโน้มของค่า DON สูงขึ้นมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่า DON ของน้ำดิบเริ่มต้น ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากคุณสมบัติที่มีความพรุนที่ผิวอย่างถ่านกัมมันต์ส่งผลกระทบต่อปริมาณแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ตามรูพรุนของคาร์บอนและทำให้ส่งผลกระทบต่อความแปรเปลี่ยนของค่า DON ในระบบกรองชีวภาพได้โดยตรง ดังนั้นปริมาณ DON ในน้ำที่ผ่านระบบ biofilter จึงสามารถควบคุมได้โดยการเลือกชนิดของตัวกรองในระบบบำบัดน้ำที่มีความเหมาะสม

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ อรมาศ สุทธิสุน (2555) ศึกษาการปนเปื้อนของสารตั้งต้นของไนโตรซามีนและโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP) ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบ

ประปา และน้ำประปาบริเวณลุ่มน้ำคลองอยู่ตะเภา จังหวัดสงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากอ่างเก็บน้ำ สะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบของการประปาส่วนภูมิภาคสะเดา การประปาส่วนภูมิภาค พะตุง-พังลา และการประปาส่วนภูมิภาคหาดใหญ่ น้ำประปาจากการประปาทั้ง 3 แห่ง รวมถึงน้ำ บาดาลจากบ่อบาดาลบริเวณหลุมฝังกลบขยะแบบเปิด บ่อบาดาลบริเวณหลุมฝังกลบขยะแบบเปิด และบ่อบาดาลบริเวณชุมชนเทศบาลตำบลคองหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา จากการศึกษา พบว่า น้ำดิบประปามีค่า DOC สูงที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำจากแหล่งอื่น โดยมีค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 2.2-4.5 mg/L น้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีน และน้ำบาดาล มีค่า DOC อยู่ใน ช่วง 1.9-2.3, 1.5-2.7 และ 0.3-0.8 mg/L ตามลำดับ ส่วนค่า DON ของน้ำดิบประปามีค่าสูงสุด อยู่ใน ช่วง 0.04-0.88 mg/L รองลงมาคือน้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่า DON อยู่ใน ช่วง 0.01-1.47 mg/L น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DON อยู่ใน ช่วง 0.02-0.08 mg/L ส่วนในน้ำบาดาลตรวจไม่ พบค่า DON ผลการตรวจวัดการปนเปื้อนของสารไนโตรซามีน 9 ชนิดได้แก่ NDMA, NMEA, NPyr, NPip, NMor, NDEA, NDPA, NDBA และ NDPhA ไม่สามารถตรวจพบสารดังกล่าวที่ระดับต่ำสุดของ การตรวจวัดเท่ากับ 300 ng/L การตรวจวัดปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ผลที่ได้คือตรวจไม่ พบสารดังกล่าวที่ระดับต่ำสุดของการตรวจวัดที่ 17.4 ng/L ผลการตรวจวัดสารตั้งต้นของสารไนโตร ซามีนพบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกเอมีน ได้แก่ อนิซีน มีค่าอยู่ในช่วง ตรวจไม่ พบ-141 ng/L น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีนมีสาร อนิซีน อยู่ใน ช่วง 114-164 ng/L และ ตรวจพบสารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน ได้แก่ ไดเมทิลลามีน (dimethylamine, DMA), ไดเอทิลลามีน (diethylamine, DEA) และ ไดบูทิลลามีน (dibutylamine, DBA) โดยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบ ประปา น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีน และน้ำบาดาลมีผลรวมของสารตั้งต้น DMA DEA และ DBA อยู่ใน ช่วง 4.2-16.2, 5.6-22.9, 4.2-20.2 และ 5.6-17.6 µg DMA/L ตามลำดับ

Qian *et al.* (2014) ศึกษาการตรวจวัดสาร *N*-nitrosamines 14 ชนิด ประกอบด้วยสารแอลคิลไนโตรซามีน 9 ชนิดได้แก่ NDMA, NMEA, NPyr, NPip, NMor, NDEA, NDPA, NDBA, NDPhA และสารไนโตรซามีนในยาสูบ 5 ชนิดได้แก่ *N*-nitrosonornicotine (NNN), *N*-nitrosoanatabine (NAT), *N*-nitrosoanabasine (NAB), 4-(methylnitrosomino)-1-(3-pyridyl)-1-butanone (NNK) และ 4-(methylnitrosamino)-1-(3-pyridyl)-1-butanol (NNAL) ในน้ำดื่มและน้ำดิบประปาของประเทศแคนาดาและสหรัฐอเมริกาจากระบบผลิตน้ำ 8 แห่งและน้ำ สักระยะซึ่งมีส่วนประกอบของยาสูบ โดยการสกัดสารไนโตรซามีนทั้ง 14 ชนิดด้วยเทคนิคการสกัด ด้วยของแข็ง (solid phase extraction, SPE) และทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) ซึ่งมีค่าขีดจำกัดของ วิธีการตรวจวัดเท่ากับ 0.01-2.7 ng/L ค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน (recovery) ของสารไนโตรซามีน ทั้ง 14 ชนิดมีค่าเท่ากับ 53-93 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าเครื่องมือและวิธีการข้างต้นสามารถ ตรวจวัดสารไนโตรซามีนในน้ำดื่มได้ สารไนโตรซามีนที่ตรวจพบคือ NDMA, NDPhA และ NNAL ซึ่งมี ค่าความเข้มข้น 1.5-22, 0.2-1.0 และ 0.6 ng/L ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของไน

ไตรฮาโลเมทิลโดยการทำ chloramination ปรากฏว่าตรวจพบการก่อตัวของ NDMA และ TSNA มากที่สุดในน้ำชยะยาสูบ และน้ำดื่มที่มีการปนเปื้อนของน้ำเสีย นอกจากนี้ยังตรวจพบ NNN, NAB และ NNK ในปริมาณเล็กน้อย และจากการทำ Prechlorination เป็นเวลา 30 นาทีก่อนการเติมแอมโมเนียเพื่อให้เกิดการฟอร์มตัวของคลอรามิน สามารถลดการก่อตัวของ NDMA, NNN และ NAB ได้ประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ ลด NNK และ NNAL ได้ 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Xu *et al.* (2011) ทำการศึกษาคุณสมบัติของสารอินทรีย์ในไตรเจนละลายน้ำ (DON) ในน้ำดิบจากแม่น้ำ Huangpu และน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบผลิตน้ำดื่ม Yangshupu เชียงไฮ้ ประเทศจีน พบว่าน้ำดิบมีค่า DON, DOC และ UV-254 โดยเฉลี่ย 0.34 mg-N/L, 4.95 mg-C/L และ 0.117 cm^{-1} ตามลำดับ จากการแยกแพรกชั้นตามน้ำหนักโมเลกุลโดยกระบวนการ ultrafiltration membrane ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มได้แก่ >30, 10-30, 3-10, 1-3 และ <1 kDa พบว่าจากการตรวจวัดค่า DOC, UV-254 และ DON มีสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า 1 kDa เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งกลุ่มสารอินทรีย์ขนาดเล็กกว่า 1 kDa นี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการก่อตัวของสาร NDMA ในขณะเดียวกันจากการศึกษาน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบผลิตน้ำดื่ม Yangshupu พบว่าระบบดังกล่าวซึ่งประกอบด้วยกระบวนการ pre-ozonation, clarification และ sand filtration ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ขนาดเล็กกว่า 1 kDa ได้ ผลจากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่า DON มีความสัมพันธ์กับค่า DOC, UV-254 และค่าโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลเมทิล (THMFP) เล็กน้อย และมีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่าโอกาสการก่อตัวของสารฮาโลอะซีติกแอซิด (HAAFP) และ NDMAFP ดังนั้นค่า DON จึงสามารถใช้เป็นดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ละลายน้ำและโอกาสการก่อตัวของสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPFP) ได้

2.8.2 การก่อตัวของสาร Nitrosamines

Chen and Valentine (2007) ศึกษาการก่อตัวของ NDMA จาก humic substance ในแหล่งน้ำ โดยใช้ตัวอย่างน้ำจาก Iowa River Water (IRW) และศึกษาผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติต่อโอกาสการก่อตัวของสารเอ็นไนโตรโซไดเมทิลลามีน (NDMAFP) ในแหล่งน้ำที่ใช้ผลิตน้ำดื่ม NDMA 120 ng/L สามารถก่อตัวได้โดยไม่มีการเติมไดเมทิลลามีน โดยที่ไดเมทิลลามีน 0.5 $\mu\text{g/L}$ ก่อตัวเป็น NDMA ได้เพียง 20 ng/L คิดเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ ของการก่อตัวที่เกิดขึ้น ในขณะที่ NDMA ส่วนใหญ่ก่อตัวจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการก่อตัวของ NDMA มีผลมาจากสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นหลัก และจากการแยกแพรกชั้นของสารอินทรีย์ พบว่าส่วนของ hydrophilic base (HPIB) ก่อตัวเกิดเป็น NDMA ได้สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 77.5 ng/mg DOC รองลงมาคือ hydrophilic acid (HPIA) มีค่าการก่อตัวเท่ากับ 43.5 ng/mg DOC และ hydrophobic neutral (HPON) มีค่า NDMAFP ต่ำที่สุดคือ 22.4 ng/mg DOC

Huy *et al.* (2011) ศึกษาการปนเปื้อนและก่อตัวของ NDMA ในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินจากการเติมคลอรีนและคลอรามินโดย NDMAFP_{Cl2} ทำการทดลองโดยการเติมคลอรีนลงในน้ำ

ตัวอย่างและบ่มที่อุณหภูมิ 20 °C ในที่มีดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่ pH เท่ากับ 7.0 และ NDMAFP_{NH₂Cl} ทำการทดลองโดยการเติมโมโนคลอรามิน 140 mg_{Cl₂}/L ลงในน้ำตัวอย่างและบ่มที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 10 วัน ที่ pH เท่ากับ 6.8 พบว่าความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำใต้ดินมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำผิวดิน NDMAFP_{Cl₂} ของน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินมีค่าโดยเฉลี่ย 1.8 ng/L และ 2.3 ng/L ตามลำดับ NDMAFP_{Cl₂} มีค่าความเข้มข้นไม่เกินกว่าค่าความเข้มข้นของ NDMA ยกเว้นกรณีน้ำตัวอย่างบางแห่งที่มีความเข้มข้นของแอมโมเนียและสารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA สูง ส่วนค่าความเข้มข้นของ NDMAFP_{NH₂Cl} ในน้ำใต้ดินมีค่าอยู่ในช่วง 4-84 ng-NDMA eq/L และในน้ำผิวดินมีค่าอยู่ในช่วง 11-185 ng-NDMA eq/L จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นพบว่าค่าความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำใต้ดินมีค่าต่ำกว่าน้ำผิวดิน ซึ่งอธิบายได้ว่าน้ำใต้ดินสารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA น้อยกว่าน้ำผิวดินเนื่องจากสารตั้งต้นในน้ำผิวดินอาจเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ การดูดซับหรือเกิดการระเหยไประหว่างที่มีการซึมในชั้นใต้ดิน

Wang *et al.* (2011) ทำการตรวจวัดสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิด ได้แก่ NDMA, NMEA, NPyr, NPip, NMor, NDEA, NDPA, NDBA และ NDPhA ในแหล่งน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดจากระบบผลิตน้ำดื่ม 12 แห่งในประเทศจีน โดยใช้เทคนิค ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของวิธีการในการตรวจวัดสารประกอบไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิดสำหรับน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดมีค่าอยู่ในช่วง 0.2-0.9 ng/L และ 0.1-0.7 ng/L ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าในจำนวนสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิดที่ทำการวิเคราะห์ มีสารที่ตรวจพบจำนวน 6 ชนิดในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัด คือ NDMA, NDEA, NMor, NDBA, NMEA และ NDPhA โดยความเข้มข้นของสารไนโตรซามีนทั้ง 6 ชนิดที่ตรวจพบในน้ำดิบมีค่าอยู่ในช่วง N.D.-42.4 ng/L ซึ่ง NDMA ถูกตรวจพบในน้ำดิบ 4 แห่ง มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 6.4-13.9 ng/L NDEA และ NDEA ตรวจพบในน้ำดิบ 7 และ 6 แห่ง มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1.9-16.3 ng/L และ 1.0-19.9 ng/L ตามลำดับ NMor, NDPhA และ NMEA ตรวจพบในน้ำดิบ 6, 5 และ 2 แห่ง มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1.1-2.8 ng/L, 0.6-2.9 ng/L และ 1.0-1.2 ng/L ตามลำดับ ส่วนในน้ำที่ผ่านการบำบัดตรวจพบ NDMA, NDEA และ NDBA ในน้ำ 7, 9 และ 6 แห่ง มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 4.6-20.5 ng/L, 1.9-16.3 ng/L และ 0.4-3.4 ng/L ตามลำดับ และตรวจพบ NMor, NMEA และ NDPhA ในน้ำ 3, 1 และ 1 แห่ง โดยมีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1.1-1.7 ng/L, 1.1 ng/L และ 3.3 ng/L ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างน้ำดิบด้วยคลอรีน (chlorination) และคลอรามิน (chloramination) พบว่าสามารถตรวจวัดสารไนโตรซามีนได้ 4 ชนิด คือ NDMA, NDEA, NMor และ NDBA ซึ่งมีค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 108.5, 29.9, 20.2 และ 19.5 ng/L ตามลำดับ และพบว่าส่วนใหญ่ค่า NDMAFP จากการทำ chloramination มีค่าสูงกว่า chlorination

Knight *et al.* (2012) ศึกษาโอกาสการก่อตัวของสาร trihalomethanes (THMFP) และสาร N-nitrosodimethylamine (NDMAFP) ในน้ำจากแหล่งผลิตน้ำดื่มของ

Southeast Queensland จากการศึกษพบว่าตัวอย่างน้ำดิบและน้ำดื่มซึ่งมีค่า DON อยู่ในช่วงต่ำกว่า 0.1-2.6 mg-N/L มีค่า NDMAFP อยู่ในช่วงต่ำกว่า 5-21 ng/L โดยตัวอย่างน้ำดื่มทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์มีค่า NDMAFP ต่ำกว่า 5 ng/L ตัวอย่างน้ำดิบและน้ำดื่มที่มีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.1-7.4 mg/L มีค่า THMFP อยู่ในช่วง 2-151 µg/L ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐาน THMs ของ Australian Drinking Water Guideline ที่กำหนดไว้ควรมีค่าไม่เกิน 250 µg/L นอกจากนี้ จากการศึกษการลดค่า DOC DON THMFP และ NDMAFP ในน้ำดิบจาก Teviot Brook โดยการโคแอกกูเลชันด้วย ferric chloride, polyDADMAC และ Alum พบว่าการใช้ ferric chloride มีประสิทธิภาพในการกำจัด DON และ DOC ได้ดีที่สุดโดยเฉลี่ย 82 และ 60 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ Alum กำจัดได้เฉลี่ย 80 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ poly DADMAC กำจัดได้เฉลี่ย 75 และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการโคแอกกูเลชันในการลด THMFP และ NDMAFP พบว่าการใช้สารโคแอกกูแลนต์ทั้งสามชนิดคือ ferric chloride, polyDADMAC และ Alum ไม่มีประสิทธิภาพในการลด THMFP และ NDMAFP นอกจากนี้ น้ำตัวอย่างที่ผ่านโคแอกกูเลชันด้วย polyDADMAC ยังมีค่า NDMAFP เพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับค่า NDMAFP ในน้ำดิบ

2.8.3 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Homklin (2004) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำชนิดชอบน้ำ (hydrophilic, HPI) และชนิดไม่ชอบน้ำ (hydrophobic, HPO) ในน้ำดิบโดยการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม เพื่อหาโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทน (trihalomethane formation potential, THMFP) และการลดลงของโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนเนื่องจากการลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI โดยเก็บตัวอย่างน้ำจาก 3 แหล่งคือ อ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว เขื่อนแม่กวง และแม่น้ำแม่สา จ.เชียงใหม่ ผลจากการศึกษาพบว่าค่า THMFP ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว เขื่อนแม่กวง และแม่น้ำแม่สา มีค่าเท่ากับ 403.12, 235.87 และ 112.36 µg/L ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า THMFP_{HPI} ของแหล่งน้ำทั้งสามแห่งมีค่าเท่ากับ 162.30, 124.61 และ 77.0 µg/L ตามลำดับ ส่วนค่า THMFP_{HPO} มีค่าเท่ากับ 275.09, 156.82 และ 62.58 µg/L ตามลำดับ ผลจากการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้สารส้มความเข้มข้น 60 mg/L ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว โดยสามารถลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPI และ HPO ได้ 33 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้สารส้มความเข้มข้น 40 mg/L ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำจากเขื่อนแม่กวง โดยสามารถลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPI และ HPO ได้ 28 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้สารส้ม 40 mg/L ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำจากแม่น้ำแม่สา โดยสามารถลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPI และ HPO ได้ 51 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่สภาวะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันสามารถลดค่า THMFP_{HPO} จากอ่างเก็บน้ำอ่างแก้ว เขื่อนแม่กวง และแม่น้ำแม่สาได้ 69, 35 และ 43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถลดค่า THMFP_{HPI} จากแหล่งน้ำทั้งสามแห่งได้ 43, 23 และ 26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Janhom (2004) ศึกษาการลดสารไตรฮาโลมีเทนที่เกิดจากสารอินทรีย์ละลายน้ำ 6 กลุ่มโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำของการนิคมอุตสาหกรรมภาคเหนือ จ.ลำพูน ทำการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยใช้เรซิน 3 ชนิดคือ DAX-8, AG-MP-50 และ WA-10 ผลจากการทดลองพบว่าน้ำดิบมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม hydrophobic acid (HPOA) 41.6 เปอร์เซ็นต์, hydrophilic neutral (HPON) 12.1 เปอร์เซ็นต์, hydrophobic base (HPOB) 3.4 เปอร์เซ็นต์, hydrophilic acid (HPIA) 20.5 เปอร์เซ็นต์ hydrophilic neutral (HPIN) 17.7 เปอร์เซ็นต์ และ hydrophilic base (HPIB) 4.8 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าน้ำดิบมีสารอินทรีย์กลุ่ม HPOA และ HPIA เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณรวมกันเท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์ จากสัดส่วนของสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมด ค่า THMFP ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPOA มีค่าเท่ากับ 247.1 $\mu\text{g/L}$, HPIA มีค่าเท่ากับ 112.6 $\mu\text{g/L}$, HPIB มีค่าเท่ากับ 67.9 $\mu\text{g/L}$, HPIN มีค่าเท่ากับ 64.9 $\mu\text{g/L}$, HPOB มีค่าเท่ากับ 41.4 $\mu\text{g/L}$ และ HPON มีค่าเท่ากับ 68 $\mu\text{g/L}$ ผลการศึกษาการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้สารส้ม 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ ที่สภาวะดังกล่าวสามารถลดค่า THMFP ที่เกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม HPOA, HPON, HPOB, HPIA, HPIN และ HPIB ได้เท่ากับ 57, 54, 41, 41, 30 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย (2548) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม ทำการศึกษาตัวอย่างจากอ่างเก็บน้ำแม่เหียะ จ.เชียงใหม่ และ เขื่อนภูมิพล จ.ตาก จากการศึกษาพบว่า การใช้สารส้มปริมาณ 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่เหียะโดยสามารถลดค่า DOC และ UV-254 จากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 6.132 mg/L และ 0.1125 cm^{-1} ตามลำดับ ให้ลดลงเหลือ 3.461 mg/L และ 0.0527 cm^{-1} ตามลำดับ คิดเป็น 44 และ 53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้สารส้มปริมาณ 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำของน้ำจากเขื่อนภูมิพล โดยที่สภาวะดังกล่าวสามารถลดค่า DOC และ UV-254 จากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 2.501 mg/L และ 0.0754 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 1.391 mg/L และ 0.0301 cm^{-1} คิดเป็น 44 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการทดลองการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันที่สภาวะที่เหมาะสมพบว่าสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม HPI จากอ่างเก็บน้ำแม่เหียะและเขื่อนภูมิพลได้เท่ากับ 27 และ 44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่เหียะและเขื่อนภูมิพลได้เท่ากับ 60 และ 51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้กระบวนการโคแอกกูเลชันที่สภาวะที่เหมาะสมสามารถลดค่า THMFP ที่เกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม HPI ในอ่างเก็บน้ำแม่เหียะและเขื่อนภูมิพลได้เท่ากับ 33 และ 35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถลดค่า THMFP ที่เกิดจากสารอินทรีย์กลุ่ม HPO ในอ่างเก็บน้ำแม่เหียะและเขื่อนภูมิพลได้เท่ากับ 55 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Uyak *et al.* (2007) ศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs) ในน้ำจากทะเลสาบ Terkos เมืองอิสตันบูล โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย ferric chloride และการดูดติดด้วย powder activated carbon (PAC) จากการศึกษาพบว่าการใช้ ferric chloride ความเข้มข้น 100 mg/L เป็นสถานะที่ดีที่สุดในการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำ โดยสามารถลดค่า DOC, UV-254 และ THMFP ได้เท่ากับ 45, 63 และ 57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการโคแอกกูเลชันโดยใช้ ferric chloride ร่วมกับ PAC พบว่าการใช้ ferric chloride 80 mg/L ร่วมกับ PAC 80 mg/L สามารถลดค่า DOC และ UV-254 ได้สูงที่สุดเท่ากับ 76 และ 84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และที่สถานะดังกล่าวสามารถลดค่า THMFP จากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 301 $\mu\text{g/L}$ ให้เหลือต่ำกว่า 80 $\mu\text{g/L}$ คิดเป็น 82 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ ferric chloride อย่างเดียวที่สามารถลด THMFP จากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 301 $\mu\text{g/L}$ ให้เหลือ 155 $\mu\text{g/L}$ คิดเป็น 47 เปอร์เซ็นต์

Srimuang (2011) ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำและลดโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา โดยการโคแอกกูเลชันด้วย Poyaluminium chloride (PACl) และเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันโดยใช้ Cationic polymer และ Powder activated carbon (PAC) ที่สถานะควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 จากการศึกษาพบว่าน้ำดิบประปาช่วงฤดูฝนมีค่า UV-254, DOC และ THMFP เท่ากับ 0.414 cm^{-1} , 5.1 mg/L และ 729 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ ส่วนน้ำดิบประปาช่วงฤดูแล้งมีค่า UV-254, DOC และ THMFP เท่ากับ 0.159 cm^{-1} , 5.5 mg/L และ 509 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ ผลการแยกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation โดยใช้เรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4 เพื่อแยกสารอินทรีย์ออกเป็นกลุ่ม hydrophobic (HPO), transphilic (TPI) และ hydrophilic (HPI) พบว่าน้ำดิบฤดูฝนมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO, TPI และ HPI คิดเป็น 42, 27 และ 31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำดิบฤดูแล้งมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO, TPI และ HPI คิดเป็น 44, 23 และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการกำจัดสารอินทรีย์โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ polymer 1 mg/L และ PAC 80 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบได้ดีที่สุด โดยสามารถลดค่า DOC และ UV-254 ในน้ำดิบฤดูฝนจากค่าเริ่มต้น 5.2 mg/L และ 0.414 cm^{-1} ให้เหลือ 0.84 mg/L และ 0.128 cm^{-1} คิดเป็น 83 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่สถานะเดียวกันสามารถลดค่า DOC และ UV-254 ในน้ำดิบประปาฤดูแล้งจากค่าเริ่มต้น 5.5 mg/L และ 0.155 cm^{-1} ให้เหลือ 0.83 mg/L และ 0.046 cm^{-1} คิดเป็น 85 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ที่สถานะดังกล่าวสามารถลดค่า THMFP ให้มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน THMs สูงสุดของ U.S.EPA ซึ่งกำหนดไว้ที่ 80 $\mu\text{g/L}$ และเมื่อนำน้ำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ร่วมกับ polymer 1 mg/L และ PAC 80 mg/L มาผ่านกระบวนการ resin fractionation พบว่า ที่สถานะดังกล่าวสามารถกำจัดค่า DOC และลดศักยภาพการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนได้ดี โดยสามารถลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำฤดูฝนได้ 88, 81 และ 82

เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำฤดูแล้งได้ 89, 85 และ 85 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสามารถลดค่า THMFP ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำฤดูฝนได้ 88, 67 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลดค่า THMFP ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำฤดูแล้งได้ 89, 66 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ ชัยศรี สุขสาโรจน์ (2551) ศึกษาการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำ และโอกาสการก่อกำของสารไตรฮาโลมีเทนของสารอินทรีย์กลุ่ม hydrophobic (HPO) และ hydrophilic (HPI) โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย Poyaluminium chloride (PACl) และเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วย polymer, powder activated carbon (PAC) และ ozone โดยเก็บตัวอย่างน้ำดิบประปาจุดละ 3 ครั้ง จากระบบประปาคลองอู่ตะเภา และอ่างเก็บน้ำศรีตรัง มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา จากการศึกษาพบว่า น้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา มีค่า DOC และ UV-254 โดยเฉลี่ย 7.4 mg/L และ 0.193 cm^{-1} ตามลำดับ น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำศรีตรังมีค่า DOC และ UV-254 โดยเฉลี่ย 3.6 mg/L และ 0.076 cm^{-1} ตามลำดับ ผลการแยกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation พบว่าน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภา มีค่าเฉลี่ย DOC_{HPI} , DOC_{HPO} , $\text{THMFP}_{\text{HPI}}$ และ $\text{THMFP}_{\text{HPO}}$ เท่ากับ 3.7 mg/L, 3.3 mg/L, 361 $\mu\text{g/L}$ และ 273 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ การโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ร่วมกับ polymer 1 mg/L และ PAC 80 mg/L ที่พีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการลดสารอินทรีย์โดยลดค่า DOC_{HPI} และ DOC_{HPO} ได้เฉลี่ย 72 และ 88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลดค่า $\text{THMFP}_{\text{HPI}}$ และ $\text{THMFP}_{\text{HPO}}$ ได้เฉลี่ย 78 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำศรีตรังมีค่าเฉลี่ย DOC_{HPI} , DOC_{HPO} , $\text{THMFP}_{\text{HPI}}$ และ $\text{THMFP}_{\text{HPO}}$ เท่ากับ 1.4 mg/L, 2.3 mg/L, 213 $\mu\text{g/L}$ และ 291 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ การใช้ PACl 20 mg/L ร่วมกับ polymer 0.1 mg/L และ ozone อัตราค่าที่เท่ากับ 132 mg/h ระยะเวลาสัมผัส 30 นาทีที่พีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการลดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำศรีตรัง โดยลดค่า DOC_{HPI} และ DOC_{HPO} ได้เฉลี่ย 65 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดค่า $\text{THMFP}_{\text{HPI}}$ และ $\text{THMFP}_{\text{HPO}}$ ได้เฉลี่ย 77 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าคลอโรฟอร์ม 80-90 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารหลักที่ก่อตัวขึ้นจากการวิเคราะห์ THMFP ของน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาและอ่างเก็บน้ำศรีตรัง

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ สุรพงษ์ วัฒนจิระ (2555) ศึกษาการจำแนกลักษณะและการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม hydrophobic (HPO) และ hydrophilic (HPI) ในน้ำดิบประปาจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา จ.สงขลา โดยเก็บตัวอย่างน้ำในฤดูฝน 1 ครั้ง และฤดูแล้ง 1 ครั้ง จากบริเวณอ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา บ้านบางศาลา บ้านม่วงก้อง จุดสูบน้ำดิบประปา และบ้านหาดใหญ่ในตลอดจนเก็บตัวอย่างน้ำจากระบบประปาบริเวณหลังจากการตกตะกอน หลังจากการกรอง และน้ำประปา ผลจากการศึกษาพบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 4.2-4.9 mg/L น้ำจากคลองอู่ตะเภา มีค่า DOC อยู่ในช่วง 3.9-6.2 mg/L ค่า THMFP ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำและคลองอู่ตะเภา มีค่าอยู่ในช่วง 157-435 $\mu\text{g/L}$ แต่น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปามีค่า THMFP ค่อนข้างสูงเท่ากับ

729 $\mu\text{g/L}$ และ 508 $\mu\text{g/L}$ ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ตามลำดับ ผลการจำแนกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation พบว่า น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีสารอินทรีย์กลุ่ม HPO เป็นสารอินทรีย์กลุ่มหลัก คิดเป็นสัดส่วนโดยเฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่ม HPI มีค่าสัดส่วนโดยเฉลี่ย 46 เปอร์เซ็นต์ ส่วนน้ำดิบจากคลองอยู่ตะกามีสารอินทรีย์กลุ่ม HPI เป็นสารอินทรีย์กลุ่มหลัก คิดเป็นสัดส่วนโดยเฉลี่ย 55 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่ม HPO คิดเป็นสัดส่วนโดยเฉลี่ย 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ไปทำการวิเคราะห์ THMFP พบว่า ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำ สารอินทรีย์กลุ่ม HPO ก่อให้เกิด THMFP ได้สูงกว่าสารอินทรีย์กลุ่ม HPO ส่วนในน้ำจากคลองอยู่ตะกามีสารอินทรีย์กลุ่ม HPI ก่อให้เกิด THMFP ได้สูงกว่าสารอินทรีย์กลุ่ม HPO ส่วนผลการโคแอกกูเลชันพบว่าการใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสถานะที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชันน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปา ที่สถานะดังกล่าวสามารถลดค่า DOC และ UV-254 ในน้ำดิบฤดูฝนจากค่าเริ่มต้น 5.1 mg/L และ 0.414 cm^{-1} ตามลำดับ ให้ลดลงเหลือ 1.8 mg/L และ 0.200 cm^{-1} ตามลำดับ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเท่ากับ 63 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในฤดูแล้งที่สถานะเดียวกัน สามารถลดค่า DOC และ UV-254 จากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 5.5 mg/L และ 0.155 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 1.9 mg/L และ 0.059 cm^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงเท่ากับ 65 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการตรวจวัด Fluorescent excitation – emission matrix (FEEM) และ Fourier Transforms Infrared (FTIR) ตรวจพบพีคของสารกลุ่ม humic และ fulvic acid ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ ส่วนน้ำคลองอยู่ตะกามีตรวจพบพีคของสารกลุ่ม humic fulvic acid และสารกลุ่ม tryptophan นอกจากนี้พบว่าสารกลุ่ม HPO มีสารอินทรีย์กลุ่ม aliphatic และ aromatic hydrocarbon เป็นสารกลุ่มหลัก ส่วนสารกลุ่ม HPI มีสารอินทรีย์กลุ่ม aliphatic hydrocarbon และ กลุ่ม organic nitrogen เป็นสารกลุ่มหลัก

Kumsuvan (2013) ศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของ NDMA ในน้ำดิบประปาบางเขน และบางเลน กรุงเทพมหานคร โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC และกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และทำการดูดซับด้วย PAC จากการทดลองพบว่าน้ำดิบประปาบางเขนมีค่า DOC 4.2 mg/L, UV-254 0.135 cm^{-1} , SUVA 3.2 L $\text{mg}^{-1} \text{m}^{-1}$ และ DON 0.24 mg-N/L การใช้ PACl 80 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสถานะที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชันน้ำดิบประปาบางเขนโดยสามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ให้เหลือ 2.4 mg/L, 0.035 cm^{-1} , 1.4 L $\text{mg}^{-1} \text{m}^{-1}$ และ 0.14 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 42, 74, 55 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำดิบประปาบางเลนมีค่า DOC 7.3 mg/L, UV-254 0.228 cm^{-1} , SUVA 3.1 L $\text{mg}^{-1} \text{m}^{-1}$ และ DON 0.34 mg-N/L การใช้ PACl 150 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ให้เหลือ 4.6 mg/L, 0.081 cm^{-1} , 1.8 L $\text{mg}^{-1} \text{m}^{-1}$ และ 0.17 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 38, 64 43 และ 52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC พบว่าการใช้ PACl 80 mg/L ร่วมกับ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON

ในน้ำดิบประปาบางเขนให้เหลือ 1.0 mg/L, 0.008 cm⁻¹, 0.008 L mg⁻¹ m⁻¹ และ 0.08 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 77, 94, 75 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้ PACl 150 mg/L ร่วมกับ PAC 10 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนให้เหลือ 1.4 mg/L, 0.025 cm⁻¹, 0.018 L mg⁻¹ m⁻¹ และ 0.12 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 88, 95, 68 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และทำการดูดติดด้วย PAC พบว่า การใช้ PACl 80 mg/L และ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนให้เหลือ 0.87 mg/L, 0.011 cm⁻¹, 1.3 L mg⁻¹ m⁻¹ และ 0.11 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 79, 92, 59 และ 54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้ PACl 150 mg/L และ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถลดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนให้เหลือ 0.95 mg/L, 0.012 cm⁻¹, 1.3 L mg⁻¹ m⁻¹ และ 0.104 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 87, 95, 58 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากการลดกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันพบว่า การโคแอกกูเลชันน้ำดิบประปาบางเขนด้วย PACl 80 mg/L สามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI จาก 2.0 และ 2.2 mg/L ให้เหลือ 1.1 และ 1.4 mg/L คิดเป็น 31 และ 41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl 80 mg/L ร่วมกับ PAC 20 mg/L สามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI ในน้ำดังกล่าวจาก 2.0 และ 2.2 mg/L ให้เหลือ 0.4 และ 0.5 mg/L คิดเป็น 75 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการโคแอกกูเลชันน้ำดิบประปาบางเขนด้วย PACl 80 mg/L สามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI จาก 3.7 และ 3.9 mg/L ให้เหลือ 1.8 และ 2.2 mg/L คิดเป็น 42 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl 80 mg/L ร่วมกับ PAC 20 mg/L สามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI ในน้ำดังกล่าวจาก 3.7 และ 3.9 mg/L ให้เหลือ 0.4 และ 0.6 mg/L คิดเป็น 83 และ 89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และไม่สามารถตรวจวัดค่า NDMAFP ในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดเท่ากับ 450 ng/L

Lee and Westerhoff (2006) ศึกษาการกำจัด DON โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย aluminum sulfate และ cationic polymer ในน้ำผิวดินจากแหล่งน้ำ 3 แห่ง ได้แก่ Harwood Reservoir, Huron River และ Salt River ประเทศสหรัฐอเมริกา จากการศึกษพบว่า การโคแอกกูเลชันโดยใช้ aluminum sulfate สามารถลดค่า DON ได้เท่ากันหรือต่ำกว่าค่า DOC เพียงเล็กน้อย เมื่อทำการโคแอกกูเลชันโดยการเติม aluminum sulfate จนถึง 5 mg/mg DOC ร่วมกับ cationic polymer ปริมาณเล็กน้อยพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON ได้เพิ่มขึ้น 15-20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใช้ aluminum sulfate เพียงอย่างเดียว และเมื่อเติม aluminum sulfate ปริมาณสูง (มากกว่า 8 mg/mg DOC) ร่วมกับ cationic polymer พบว่า cationic polymer กำจัด DON ได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนผลจากการศึกษาการกำจัด DON ในน้ำ

ก่อนและหลังกระบวนการโคแอกกูเลชันที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ตามน้ำหนักโมเลกุล พบว่าการเติม cationic polymer สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC และ DON ได้ โดยกำจัดส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 10,000 dalton ได้ดีที่สุด

Dwyer *et al.* (2009) ทำการตรวจวัดและจำแนกสาร melanoidin ในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัด และศึกษาถึงประสิทธิภาพของการโคแอกกูเลชันด้วย alum ต่อการกำจัดสี และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกับ melanoidin เนื่องจาก melanoidin เป็นสารที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เพราะมีโครงสร้างเป็นวงแหวนที่ซับซ้อน ดังนั้น melanoidin จึงเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารประกอบไนโตรเจนที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียชุมชน ผลจากการศึกษาพบว่า การใช้ alum ที่ระดับความเข้มข้น 30 mg/L as aluminium เป็นสถานะที่เหมาะสมในการกำจัด melanoidin โดยสามารถกำจัดค่าสี และ DON ในน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการบำบัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ที่สถานะดังกล่าวสามารถกำจัดค่าสี, DON และ DOC ได้ 75, 42 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และนอกจากนี้ที่สถานะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการกำจัด DON ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 10 kDa ได้ดีกว่า DON ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

Arnaldos and Pagilla (2010) ศึกษาการกำจัด DON และ dissolved phosphorus (DP) โดยการโคแอกกูเลชันด้วย alum และกรองผ่านเมมเบรนชนิด microfiltration (pore size 0.22 μm) จากการทดลองพบว่าการเติม alum 3.2 mg Al(III)/L ซึ่งมีค่าตรงกับอัตราส่วนโมลาร์ของ 1.5 Al(III)/initial DON-N และ 3.8 Al(III)/initial DP-P มีประสิทธิภาพในการกำจัด DON และ DP จากน้ำทิ้งซึ่งมีค่า 1.0 mg N/L และ 0.9 mg P/L ให้ลดลงเหลือ 0.3 mg N/L และ 0.25 mg P/L ตามลำดับ คิดเป็น 69 และ 72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Pramanik *et al.* (2015) ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการ biological aerated filter (BAF), sand filter (SF), biological activated carbon (BAC) และการโคแอกกูเลชันด้วย alum และ *Moringa Oleifera* (สารสกัดเมล็ดมะรุม) เพื่อกำจัด DON ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำ พบว่ากระบวนการ BAC, BAF, SF, alum coagulation และ *M. oleifera* coagulation มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้น 5.8 mg/L ให้ลดลงเหลือ 2.6, 2.9, 3.2, 4.3 และ 4.5 mg/L คิดเป็น 56, 51, 45, 27 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการกำจัด DOC โดยกระบวนการ BAC, BAF, SF, alum coagulation และ *M. oleifera* coagulation มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้น 0.92 mg/L ให้ลดลงเหลือ 0.16, 0.26, 0.35, 0.78 และ 0.84 mg/L คิดเป็น 83, 71, 62, 15 และ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากค่าประสิทธิภาพข้างต้นแสดงให้เห็นว่า กระบวนการ BAC มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถทำลายจุลินทรีย์และดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์บางส่วนไว้ในอนุภาคของถ่านได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการโคแอกกูเลชันด้วย alum มีประสิทธิภาพดีกว่าการโคแอกกูเลชันด้วย *M. oleifera* ผลจากการแพร่พันธุ์ตามน้ำหนักโมเลกุลพบว่าไม่มีโมเลกุลที่

ขนาดเล็กกว่า 10 kDa คิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ของ DOC ทั้งหมด และมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของ DON ทั้งหมด กระบวนการกรองมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ในทุกช่วงขนาดโมเลกุล ในขณะที่กระบวนการโคแอกกูเลชันมีประสิทธิภาพดีในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (>10 kDa)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำและสถานที่ดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เก็บตัวอย่างน้ำจากลุ่มน้ำคลองอุตะเถา ซึ่งเป็นแหล่งน้ำสายหลักของจังหวัดสงขลา มีการใช้ประโยชน์ที่สำคัญคือการผลิตน้ำประปา ตลอดช่วงลุ่มน้ำคลองอุตะเถามีระบบผลิตน้ำประปาตั้งอยู่ 3 แห่งบริเวณต้นน้ำ ลำน้ำช่วงกลาง และท้ายน้ำ โดยระบบประปาที่มีกำลังการผลิตสูงสุด 100,000 – 150,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันคือระบบประปาขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำ ซึ่งผลิตน้ำประปาเพื่อจ่ายน้ำให้แก่พื้นที่ในเขตเทศบาลนครหาดใหญ่ อำเภอเมืองสงขลา และบริเวณใกล้เคียง

จุดเก็บตัวอย่างน้ำดิบในการศึกษาครั้งนี้ คือ อ่างเก็บน้ำสะเดา (รูปที่ 3-1) จุดสูบน้ำดิบของการประปาสะเดาบริเวณต้นน้ำ (รูปที่ 3-2) จุดสูบน้ำดิบของการประปาพะตง-พังลาบริเวณกลางลำน้ำ (รูปที่ 3-3) อ่างเก็บน้ำคลองหลา (รูปที่ 3-4) จุดสูบน้ำดิบของการประปาขนาดใหญ่บริเวณท้ายน้ำ (รูปที่ 3-5) รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำประปาจากระบบประปาทั้ง 3 แห่งคือ การประปาสะเดา การประปาพะตง-พังลา และการประปาขนาดใหญ่ ซึ่งมีรายละเอียดพิกัดจุดเก็บตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 พิกัดจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

ลำดับที่	ชื่อจุดเก็บตัวอย่าง	พิกัด UTM E	พิกัด UTM N
1	อ่างเก็บน้ำสะเดา	665469	728235
2	อ่างเก็บน้ำคลองหลา	646655	759382
3	จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา	658010	734295
4	จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา	660502	749673
5	จุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่	661706	772710
6	ท่อจ่ายน้ำประปาสะเดา	658010	734295
7	ท่อจ่ายน้ำประปาพะตง-พังลา	660502	749673
8	ท่อจ่ายน้ำประปาขนาดใหญ่	661706	772710



รูปที่ 3-1 อ่างเก็บน้ำสะเดา



รูปที่ 3-2 จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา



รูปที่ 3-3 จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา



รูปที่ 3-4 อ่างเก็บน้ำคลองหลา



รูปที่ 3-5 จุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่

งานวิจัยนี้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 เก็บวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ. 2555 ครั้งที่ 2 เก็บวันที่ 26 เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2556 โดยวิธีการดำเนินการวิจัยของการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสองครั้งดำเนินการเหมือนกันคือ วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี การวิเคราะห์อนุพันธ์ของสาร Nitrosamines การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสาร N-nitrosodimethyl amine (NDMA formation potential, NDMAFP) การแจกแจงลักษณะสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation และการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) การดำเนินการวิจัย ทำการทดลองที่สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ส่วนการวิเคราะห์สาร Nitrosamines, NDMA และ NDMAFP ด้วยเทคนิค Gas chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) และการวิเคราะห์ Total Dissolved Nitrogen (TDN) ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ High performance TOC/TN_b analyzer ดำเนินการที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

3.2 กระบวนการทดลอง

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน การทดลองส่วนที่ 1 คือการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะสารอินทรีย์ การทดลองส่วนที่ 2 คือการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเก็บตัวอย่างน้ำวันเดียวกันกับการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัยดังนี้

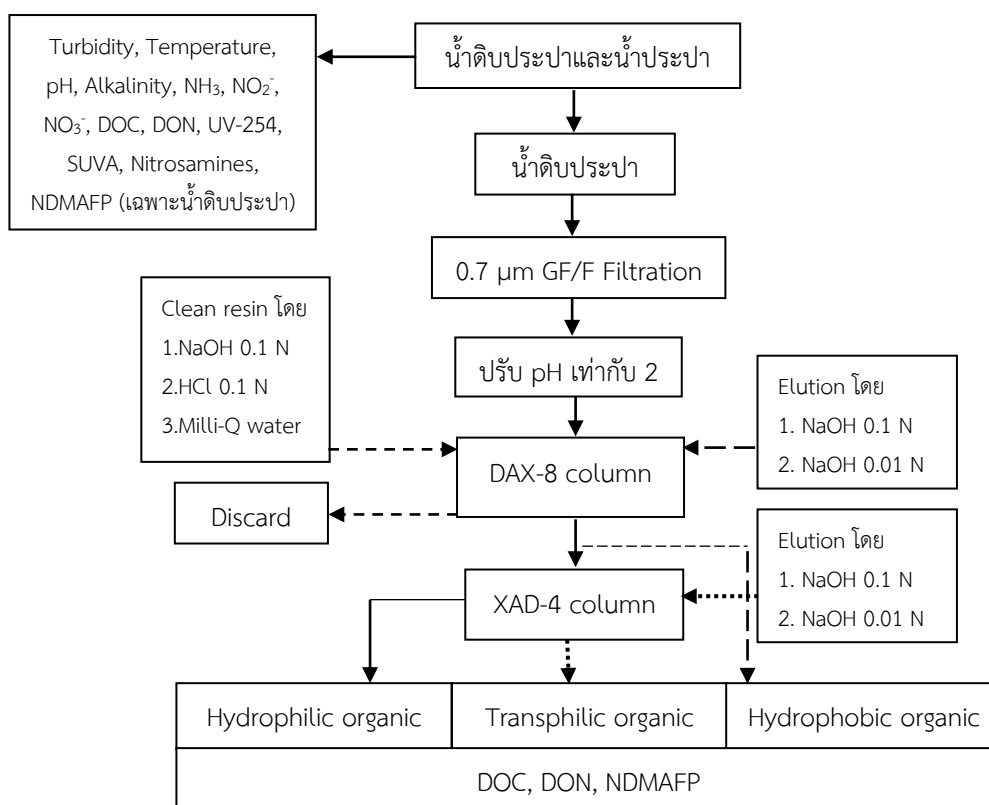
3.2.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะสารอินทรีย์

1. ทำการวิเคราะห์ ค่าความขุ่น อุณหภูมิ พีเอช ความเป็นด่าง แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรต์ DOC DON UV-254 SUVA และ NDMAFP ของน้ำดิบประปาทั้ง 5 จุด และน้ำประปาทั้ง 3 จุด โดยการวิเคราะห์ NDMAFP ทำเฉพาะในน้ำดิบ

2. หาอนุพันธ์ของสาร Nitrosamines โดยการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการสกัดด้วยวิธี Solid Phase Extraction ตามวิธีมาตรฐาน EPA521 และทำการตรวจวัดด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) โดยทำการตรวจวัดสารในกลุ่ม Nitrosamines 9 ชนิดคือ เอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลลามีน (*N*-nitrosodimethylamine, NDMA), เอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอทิลลามีน (*N*-nitrosomethyl ethylamine, NMEA), เอ็น-ไนโตรโซไดเอทิลลามีน (*N*-nitrosodiethylamine, NDEA), เอ็น-ไนโตรโซ-ไดโพรพิลลามีน (*N*-nitroso-*n*-dipropylamine, NDPA), เอ็น-ไนโตรโซ-ได-เอ็น-บิวทิลลามีน (*N*-nitrosodi-*n*-butylamine, NDBA), เอ็น-ไนโตรโซ-ไดฟีนิลลามีน (*N*-nitroso-diphenylamine, NDPhA), เอ็น-ไนโตรโซไพโรลิดีน (*N*-nitrosopyrrolidine, NPyr), เอ็น-ไนโตรโซมอร์โฟลีน (*N*-nitrosomorpholine, NMor) และ เอ็น-ไนโตรโซไพเพอริดีน (*N*-nitrosopiperidine, NPip) ในน้ำดิบและน้ำที่ออกจากระบบประปา

3. แยกกลุ่มสารอินทรีย์ในน้ำดิบ 5 จุดคือ อ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ โดยแยกออกเป็น 3 กลุ่มคือ สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fractions, HPO) สารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fractions, TPI) และสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fractions, HPI)

4. วิเคราะห์หาค่า NDMAFP DOC DON ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI โดยแผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาคุณลักษณะของน้ำทางกายภาพ เคมี และการแจกแจงลักษณะของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

3.2.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

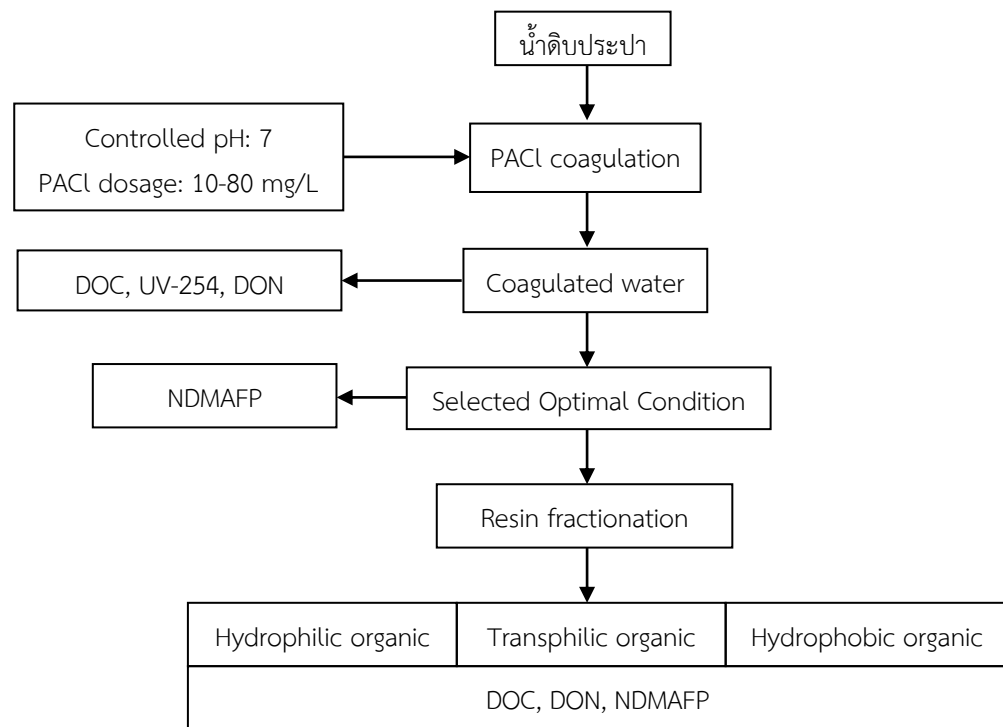
กระบวนการโคแอกกูเลชันทำการทดลองโดยใช้น้ำตัวอย่างจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ คลองอุตะเกาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2

1. การโคแอกกูเลชันทำการทดลองโดยใช้เครื่องจาร์เทส ด้วยสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน 5 ค่าระหว่าง 10 ถึง 80 mg/L และควบคุมค่าพีเอชที่ 7 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดสารอินทรีย์ ด้วยการวิเคราะห์ค่า DOC UV-254 และ DON ในน้ำที่ผ่านการบำบัด

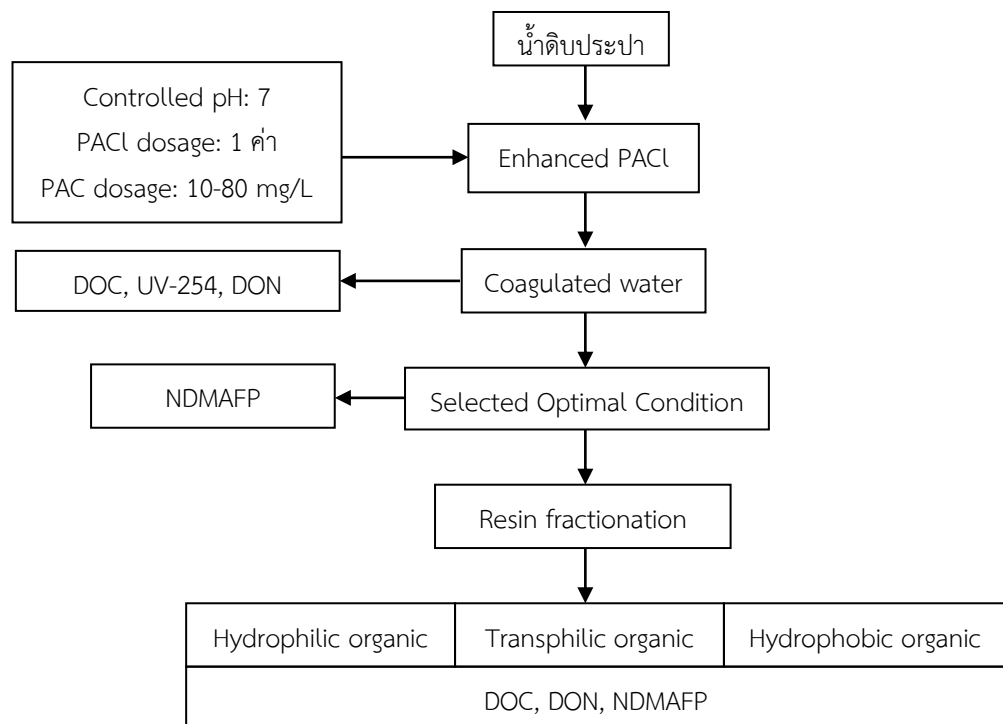
2. ทำการโคแอกกูเลชันโดยเลือกความเข้มข้นของ PACl ที่สภาวะที่เหมาะสม 1 ค่า ร่วมกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ค่าระหว่าง 10 ถึง 80 mg/L เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดสารอินทรีย์ด้วยการวิเคราะห์ค่า DOC, UV-254 และ DON ในน้ำที่ผ่านการบำบัด

3. น้ำตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการก่อนหน้าดังข้อที่ 1 และ 2 ที่สภาวะที่เหมาะสม มาทำการวิเคราะห์ NDMAFP และแยกสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ HPO TPI และ HPI

4. ทำการวิเคราะห์ DOC, DON และ NDMAFP ของสารอินทรีย์ทั้ง 3 กลุ่มโดยแผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3-7 และ 3-8



รูปที่ 3-7 แผนผังแสดงขั้นตอนการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl



รูปที่ 3-8 แผนผังแสดงขั้นตอนการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)

3.3 วิธีการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี

ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีตัวอย่างน้ำดิบและน้ำประปาจากการเก็บตัวอย่างทั้ง 2 ครั้ง โดยพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
พีเอช (pH)	-	อ่านค่าโดยตรงจากเครื่อง pH meter
อุณหภูมิ (Temperature)	(°C)	อ่านค่าโดยตรงจาก Thermometer
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	(mg/L as CaCO ₃)	ไทเทรตตามวิธีจาก Standard method ในส่วน 2320 B. Titration method
ความขุ่น (Turbidity)	(NTU)	อ่านค่าโดยตรงจากเครื่อง Turbidity meter ผลิตภัณท์ HACH รุ่น 2100 N
แอมโมเนีย (NH ₃)	mg-N/L	วิเคราะห์โดยวิธี Salicylate method โดยใช้เครื่อง Portable Spectrophotometer ผลิตภัณท์ HACH รุ่น DR 2700 TM
ไนเตรต (NO ₃ ⁻)	mg-N/L	วิเคราะห์โดยวิธี Cadmium Reduction method โดยใช้เครื่อง Portable Spectrophotometer ผลิตภัณท์ HACH รุ่น DR 2700 TM
ไนไตรต์ (NO ₂ ⁻)	mg-N/L	วิเคราะห์โดยวิธี Diazotization method โดยใช้เครื่อง Portable Spectrophotometer ผลิตภัณท์ HACH รุ่น DR 2700 TM

หมายเหตุ: (-) หมายถึง ไม่มีหน่วย

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ ศึกษาโดยใช้ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ ได้แก่ DOC, TDN, DON, UV-254 และ SUVA ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC)

กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการวิเคราะห์ตามวิธีจาก Standard method ในส่วน 5310B. High-Temperature Combustion Method โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอน Total Organic Carbon Analyzer (TOC) อย่างไรก็ตามเนื่องจาก Standard method ในส่วน 5310B. High-Temperature Combustion Method กำหนดให้กรองน้ำตัวอย่างโดยใช้แผ่นกรองที่มีขนาดรูเปิด 0.45 μm แต่กระดาษกรองดังกล่าวโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์และไม่สามารถอบที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้แผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm

ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved nitrogen, TDN)

กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm และทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ High performance TOC/TN_b analyzer, multi N/C 3100, Analytic Jena AG. Germany ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON)

การวิเคราะห์ค่า DON ยังไม่มีวิธีการหรือเครื่องมือที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง แต่สามารถหาค่าได้จากผลต่างระหว่าง TDN และ dissolved inorganic nitrogen (DIN) ($\text{NH}_3 + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) ดังสมการที่ (3-1)

$$\text{DON} = \text{TDN} - (\text{NH}_3 + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-) \quad (3-1)$$

โดย DIN คือ สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ ซึ่งคำนวณได้จากผลรวมของ แอมโมเนีย (NH_3) ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO_2^-) แต่เนื่องจากการคำนวณโดยใช้สมการข้างต้นพบว่า ค่า DON ที่ได้มีค่าเป็นลบซึ่งเกิดจากการที่ค่า DIN มีค่าสูงกว่าค่า TDN จากสาเหตุดังกล่าวจึงต้องศึกษาหาวิธีการเพิ่มเติมในการวิเคราะห์ค่า DON ซึ่งจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Xu *et al.* (2011) ได้มีการศึกษาการลดอัตราส่วนระหว่าง DIN/TDN โดยการกรองผ่านนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน 3 ชนิดคือ NF90, NF270 และ HL พบว่า NF270 มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจาก DIN สามารถซึมผ่านได้ดีและสามารถกักเก็บ DON ไว้ได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีการนำวิธีการข้างต้นมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาค่า DON โดยใช้ชุดอุปกรณ์ dead-end filtration ดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 ชุดอุปกรณ์ dead-end filtration



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3-10 ขั้นตอนการกรองน้ำด้วยชุดอุปกรณ์ dead-end filtration

ขั้นตอนการกรองด้วยชุดอุปกรณ์ dead-end filtration แสดงดังรูปที่ 3-10 ทำโดยการตัดแผ่นเมมเบรน NF270 เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm (รูป ก) นำไป วางในชุดกรอง (รูป ข) จากนั้นนำส่วนประกอบของชุดอุปกรณ์ทั้ง 3 ส่วน (รูป ค) มาต่อเข้าด้วยกัน (รูป ง) จากนั้นเติมน้ำตัวอย่างปริมาณ 200 mL ลงในชุดกรอง (รูป จ) ต่อแก๊สไนโตรเจนเข้ากับชุดกรอง เพื่อให้ความดันโดยปรับระดับความดันที่ 40 psi (รูป ฉ) และปล่อยให้ตัวอย่าง ไหลผ่านเมมเบรน จนกระทั่งเหลือน้ำส่วนที่ไม่ถูกกรองผ่านเมมเบรน (retentate) ประมาณ 50 mL จึงหยุดการเดินระบบและเก็บตัวอย่างน้ำส่วนที่ไม่ถูกกรองผ่านเมมเบรน (retentate) มาทำการวิเคราะห์ค่า TDN, NO_3^- , NO_2^- และ NH_3 เพื่อคำนวณหาค่า DON ซึ่งการกรองแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง โดยแต่ละตัวอย่างจะทำการกรอง 2 ครั้ง เพื่อให้ได้ตัวอย่างน้ำที่เพียงพอในการวิเคราะห์

การหาค่า DON สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Xu *et al.*, 2010)

$$C_F = \frac{C_R V_R + C_P V_P}{V_F} \approx \frac{C_R (V_F - V_P)}{V_F} \quad (3-2)$$

โดย C_F คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำที่เข้าระบบ (mg-N/L)

V_F คือ ปริมาตรของน้ำที่เข้าระบบ (mL)

C_R คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำส่วน retentate (mg-N/L)

โดยที่ $C_R = \text{TDN}_R - (\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_3)_R$

V_R คือ ปริมาตรของน้ำส่วน retentate (mg-N/L)

C_P คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำส่วน permeate (mg-N/L)

V_P คือ ปริมาตรของน้ำส่วน permeate (mg-N/L)

ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ 254 นาโนเมตร (UV absorbance at wavelength 254-nm, UV-254)

กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาด 0.7 μm และทำการวิเคราะห์ตามวิธีการจาก Standard method ในส่วน 5910 B. Ultraviolet Absorption Method โดยการใช้เครื่อง UV/VIS spectrophotometer ของ spectrophotometer spectronic unicam Genesys 10 UV

ค่าการดูดกลืนแสง UV จำเพาะ (specific ultraviolet absorption, SUVA)

SUVA เป็นค่าดัชนีชี้วัดของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่อยู่ในน้ำ สามารถคำนวณได้จากค่าของ UV-254 (ในหน่วย cm^{-1}) ทหารด้วยค่า DOC (ในหน่วย mg/L)

3.3.3 การวิเคราะห์ห่อนุพันธ์ของสาร Nitrosamines และปริมาณสาร

N-nitrosodimethylamine (NDMA)

การวิเคราะห์ห่อนุพันธ์ของสาร Nitrosamines และปริมาณสาร NDMA ทำโดยการสกัดด้วยวิธีมาตรฐาน EPA 521 และทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-NPD ในการตรวจวัดสารไนโตรซามีนและสาร NDMA โดยใช้บริการเครื่องมือที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เครื่องที่ใช้คือ Gas Chromatograph ยี่ห้อ Hewlette Packard รุ่น 6890 สารมาตรฐาน Nitrosamines ที่ใช้ในการทดสอบคือ Supelco EPA 8270/Appendix IX Nitrosamine Mix ซึ่งประกอบด้วยสารในกลุ่ม Nitrosamines 9 ตัวคือ *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethylamine (NDEA), *N*-nitrosodi-n-propylamine (NDPA), *N*-nitroso-di-n-butylamine (NDBA), *N*-nitroso-diphenylamine (NDPhA), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPyr), *N*-nitrosopiperidine (NPip), *N*-nitrosomorpholine (NMor) และสารมาตรฐาน NDMA ที่ใช้คือ Supelco *N*-Nitrosodimethylamine solution จากการทดสอบพบว่าเครื่อง GC-NPD มีสภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3-3

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของ NDMA ทำโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐาน NDMA นำไปฉีดเข้าเครื่อง GC-NPD ด้วยปริมาตร 5 μ L และสร้างกราฟมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีค (peak area) ของ NDMA ต่อ Internal standard (*N*-nitroso-di-n-propylamine-d14, NDPA-d14) กับค่าความเข้มข้นของ NDMA และคำนวณโดยใช้ linear regression equation ($y = ax+b$)

ในขั้นตอนของการเตรียมสารละลายมาตรฐานควรเตรียมด้วยความระมัดระวังสูง ต้องสวมหน้ากากป้องกันสารเคมีที่สามารถกรองสารอินทรีย์ได้ สวมเสื้อผ้าให้มิดชิด สวมถุงมือชนิดป้องกันสารเคมีและสวมแว่นครอบตาป้องกันสารเคมี ขณะปฏิบัติการทุกครั้งต้องทำในตู้ดูดควัน (fume hood) และห้องมืดเนื่องจากสาร NDMA สลายตัวได้เมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเล็ต

ขั้นตอนที่ 3 เก็บตัวอย่างน้ำใส่ในขวดสีชาปริมาตร 1 ลิตรโดยเก็บน้ำตัวอย่างเต็มขวดไม่ให้มี headspace free และทำการ dechlorination ทันที ณ จุดเก็บตัวอย่างโดยเติมผลึกของ sodium thiosulphate 80-100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนึ่งลิตร นำน้ำตัวอย่างเก็บในที่เย็นทันทีและขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการแล้วนำไปเก็บในห้องรักษาความเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจนกว่าจะทำการสกัด ทั้งนี้หากน้ำมีตะกอนควรกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μ m ก่อนนำมาสกัด เนื่องจากตะกอนในน้ำจะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายในขั้นตอนการสกัดด้วยวิธี solid phase extraction (SPE)

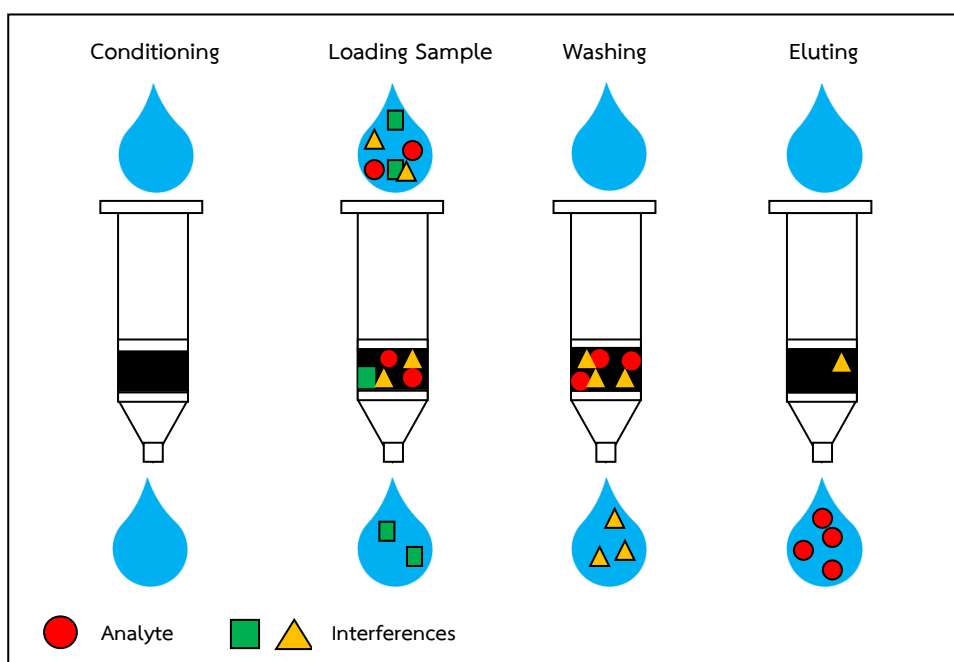
ตารางที่ 3-3 สภาวะที่เหมาะสมของเครื่อง GC-NPD ในการวิเคราะห์ Nitrosamines และ NDMA

Program/mode	Conditions
Inlet conditions	Mode: splitless Gas type: Helium Injector temperature: 220°C Pressure: 19.33 psi Split vent: 60 mL/min @ 0.75 min Total flow: 64.8 min
Column	Stabilwax (Carbowax polyethylene glycol) Length: 30 m Diameter: 250 µm Film thickness: 0.25 µm Mode: constant flow Pressure: 19.33 psi Flow: 2.0 mL/min Average velocity: 41 cm/sec
Detector	NPD temperature 250°C H ₂ (fuel gas) flow 2.0 mL/min Air (oxidant gas) flow 60 mL/min N ₂ (make up gas) flow 30 mL/min
Oven	NDMA: Initial temp 60 °C time 0 min 7 °C/min to 110 °C 0 min Post Run 200 °C 2 min 9 mixed Nitrosamines: Initial temp 40 °C time 0 min 7 °C/min to 100 °C 0 min 15 °C/min to 240 °C 3 min

ขั้นตอนที่ 4 การสกัดสารไนโตรซามีนและ NDMA ดำเนินการเหมือนกันโดยสกัดด้วยสกัดแบบ Solid phase extraction (SPE) โดยใช้ชุดสกัด Resprep EPA 521 solid phase extraction ดังรูปที่ 3-11 ซึ่ง SPE เป็นเทคนิคการสกัดโดยใช้ของแข็งเป็นตัวดูดซับสารที่สนใจ (analyte) โดยมีของเหลวเป็นตัวพา ซึ่งอาศัยหลักการแบ่งละลายของ analyte ระหว่างของแข็ง (sorbent) กับของเหลว (solvent) ที่ใช้ในการชะ แผนภาพหลักการสกัดแสดงดังรูปที่ 3-12



รูปที่ 3-11 ชุดอุปกรณ์สกัด Resprep EPA 521 solid phase extraction



รูปที่ 3-12 แผนภาพแสดงหลักการสกัดด้วยวิธี Solid phase extraction (SPE)

ขั้นตอนการสกัดสารกลุ่มไนโตรซามีนด้วยวิธี Solid phase extraction ตามวิธีมาตรฐาน EPA521
การเตรียม cartridges

1. ล้าง cartridge โดยเติม methylene chloride ประมาณ 3 mL ลงใน SPE cartridge ขนาด 6 mL ที่บรรจุด้วย coconut activated charcoal ปริมาณ 1.8-2.2 กรัมเรียบร้อยแล้ว และเปิดปั๊มสุญญากาศให้ methylene chloride ถูกดูดจนหมด จากนั้นทำซ้ำอีก 1 ครั้ง

2. เติม methanol ประมาณ 3 mL ลงใน cartridge และเปิดปั๊มสุญญากาศให้ methanol ถูกดูดจนหมด จากนั้นทำซ้ำอีก 1 ครั้ง

3. เติม methanol ประมาณ 3 mL ลงใน cartridge และเปิดปั๊มสุญญากาศให้ methanol ถูกดูด และสุดท้ายปล่อยให้ methanol เหลืออยู่ใน cartridge เล็กน้อย จากนั้นทำซ้ำอีก 1 ครั้ง

4. เติมน้ำ Milli-Q ประมาณ 3 mL ลงใน cartridge และเปิดปั๊มสุญญากาศให้น้ำถูกดูด และสุดท้ายปล่อยให้ น้ำเหลืออยู่ใน cartridge เล็กน้อย จากนั้นทำซ้ำอีก 5 ครั้ง

การสกัดตัวอย่าง

1. เติมตัวอย่างลงใน cartridge และเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดสารให้ไหลผ่าน cartridge โดยปรับอัตราการไหลให้อยู่ที่ประมาณ 10 มิลลิลิตรต่อนาที

2. เมื่อตัวอย่างถูกดูดผ่าน cartridge หมดแล้ว ปล่อยให้อากาศไหลผ่าน cartridge เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงปิดปั๊มสุญญากาศ

การชะตัวอย่าง

1. นำหลอดเก็บตัวอย่างมารองรับตัวอย่างจาก cartridge จากนั้นเติม methylene chloride และเปิดปั๊มสุญญากาศ (ใช้ความดันต่ำ) เพื่อให้ methylene chloride ชะตัวอย่างผ่าน cartridge รอจนมี methylene chloride เหลืออยู่บน cartridge เพียงเล็กน้อย จากนั้นจึงปิดปั๊มสุญญากาศ

2. ปล่อยให้ตัวดูดซับ (sorbent) แช่อยู่ใน methylene chloride เป็นเวลา ประมาณ 1 นาที จากนั้นเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูด methylene chloride ให้ไหลผ่าน cartridge จนหมด แล้วจึงเติม methylene chloride ไปเรื่อยๆจนได้สารสกัดที่ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 13 mL

3. นำสารสกัดที่ได้มาทำการกำจัดน้ำโดยการนำมาผ่านในคอลัมน์ขนาด 6 mL ซึ่งบรรจุ anhydrous sodium sulfate โดยก่อนนำ anhydrous sodium sulfate มาใช้ต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. ก่อนนำสารสกัดมาผ่านในคอลัมน์ที่บรรจุ anhydrous sodium sulfate ต้องเติม methylene chloride ลงไปเล็กน้อยเพื่อให้ anhydrous sodium sulfate ชุ่ม จากนั้นจึงค่อยๆเติม สารสกัดลงในคอลัมน์และพร้อมกันนั้นก็เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดสารสกัดผ่านคอลัมน์ anhydrous sodium sulfate (Na_2SO_4) เมื่อสารสกัดไหลผ่านคอลัมน์จนหมด จากนั้นเติม methylene chloride อย่างน้อย 3 mL เพื่อชะสารสกัดที่อาจตกค้างอยู่ในคอลัมน์ จะได้สารสกัดที่ปราศจากน้ำ

5. นำสารสกัดที่ผ่านการกำจัดน้ำออกแล้วมาทำการระเหย methylene chloride ออกโดยการ purge ด้วยแก๊สไนโตรเจนชนิดบริสุทธิ์สูงจนเหลือปริมาตรสุดท้ายประมาณ 0.9 mL (ห้ามเหลือต่ำกว่า 0.5 mL) จากนั้นนำไปปรับปริมาตรให้เป็น 1 mL ด้วย methylene chloride เก็บใส่ขวด vial สีขาขนาด 2 mL โดยเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส และนำไป

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) โดยใช้สภาวะของเครื่องมือดังรายละเอียดในตารางที่ 3-3

3.3.4 การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA formation potential, NDMAFP)

ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการในการวิเคราะห์ THMFP เป็นพื้นฐานประยุกต์ร่วมกับวิธีของ Mitch *et al.* (2003); Lee *et al.* (2007); Chen and Valentine (2007); Gerecke and Sedlak (2003) และ Mitch and Sedlak (2002) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือ (free chlorine residual)

การหาปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำตัวอย่าง เริ่มต้นจากการนำน้ำตัวอย่าง (pH = 7±0.2) ปริมาณ 1000 mL มาเติมสารคลอรีน (chlorine) และเติมสารละลายฟอสเฟต (phosphate solution) เพื่อรักษาสภาพน้ำให้เป็นกลาง นำไปบ่มในตู้บ่มอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นวัดปริมาณคลอรีนที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างซึ่งต้องอยู่ในช่วง 3-5 mg/L ตามวิธีการใน Standard method ในส่วน 4500-Cl G. DPD Colorimetric method

2. การตรวจวัดปริมาณคลอรามินคงเหลือ (chloramine residual)

การหาปริมาณคลอรามินคงเหลือในน้ำตัวอย่าง เริ่มต้นจากการนำน้ำตัวอย่าง (pH = 7±0.2) ปริมาณ 1000 mL มาเติมสารโมโนคลอรามิน (monochloramine) และเติมสารละลายฟอสเฟต (phosphate solution) เพื่อรักษาสภาพน้ำให้เป็นกลาง นำไปบ่มในตู้บ่มอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นวัดปริมาณคลอรามินที่คงเหลือในน้ำตัวอย่างซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 3.0 mg/L (WHO, 1998) ตามวิธีการใน Standard method ในส่วน 4500-Cl G. DPD Colorimetric method

3. เมื่อทำการวัดปริมาณคลอรีนอิสระและคลอรามินคงเหลือในน้ำตัวอย่างแล้ว เติม Sodium thiosulphate เพื่อหยุดปฏิกิริยาของคลอรีนและคลอรามิน

4. ทำการสกัดน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง โดยวิธีสกัดแบบ SPE ดังขั้นตอนที่ได้กล่าวในขั้นตอนที่ 4 หัวข้อที่ 3.3.3 และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) โดยใช้สภาวะของเครื่องมือดังแสดงในตารางที่ 3-3

3.3.5 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารโคแอกกูแลนต์

โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ชนิดเดียวกันกับที่ใช้งานจริงในระบบการผลิตน้ำประปาที่ใช้น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา โดยได้รับความอนุเคราะห์จากการประปาเพื่อนำมาใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์หลักในกระบวนการโคแอกกูเลชันเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำ ดังคุณลักษณะที่แสดงดังในตารางที่ 3-4

คุณลักษณะทั่วไป

- ลักษณะเป็นผงหรือเป็นเกล็ด สีขาวหรือสีเหลือง
- เป็นสารสร้างตะกอนชนิดอินทรีย์สาร
- เป็นสารสร้างตะกอน ที่ไม่มีพิษภัยต่อมนุษย์ สัตว์และสิ่งแวดล้อม เมื่อนำไปใช้เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำบริโภค
- เป็นสารสร้างตะกอน ที่สามารถนำไปละลายน้ำเพื่อเตรียมเป็นสารละลายสำหรับ นำไปใช้ในระดัความเข้มข้นต่างๆ ตามที่ต้องการได้ง่าย

ตารางที่ 3-4 คุณลักษณะทางเคมีของโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

สารประกอบ	หน่วย	ค่า
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่น้อยกว่า 29
Basicity	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ตั้งแต่ 65 ถึง 85
ความเป็นกรด-ด่าง	กรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร	ระหว่าง 3.5 ถึง 5.0
ซิลเฟต	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่เกิน 10.5
เหล็ก (Fe)	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่เกิน 1.0
เกลือแอมโมเนียม	(คำนวณเป็น N) มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่เกิน 300
สารหนู (As)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่เกิน 3.0
แคดเมียม (Cd)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่เกิน 3.0
ตะกั่ว (Pb)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่เกิน 15
โครเมียม (Cr)	มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม	ไม่เกิน 15

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC)

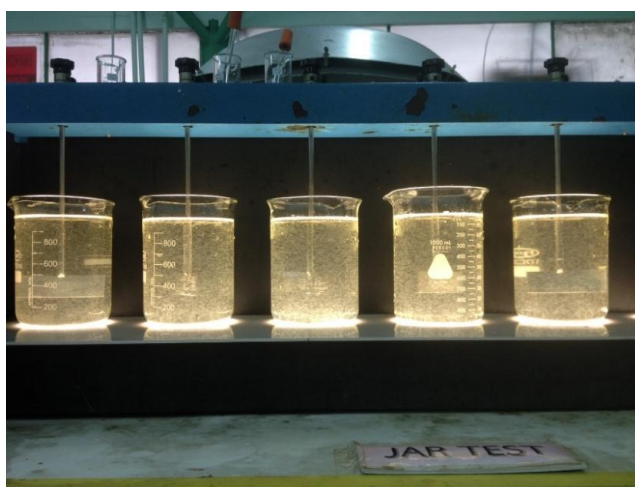
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Coconut Shell Base Powdered Activated Carbon เกรด HRO M325-60 ผลิตโดย บริษัท คาร์โบกายูจน์ จำกัด โดยมีคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)

Physical properties	Specification
Particle Size Distribution: Under 325 mesh (.045 mm) (ASTM MESH/MM)	MIN. 60%
Apparent Density (g/cc)	MIN. 0.50
Moisture (%w/w)	MAX. 10
Ash (%w/w)	MAX. 8
pH	9-11
Surface Area (m ² /g) (Calculated)	MIN. 1000
Iodine Number (mg/g) (AWWA B 604)	MIN. 950

การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชันใช้น้ำตัวอย่างจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 นำมาทำการทดลองโคแอกกูเลชันโดยวิธีจาร์เทสต์ (รูปที่ 3-13) ตามวิธีการของ USEPA (1999) และ Masschelein (1992) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการลดสารอินทรีย์ ด้วยการใช้ค่า DOC UV-254 และ DON ในน้ำที่ผ่านการบำบัด สภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 3-6



รูปที่ 3-13 การโคแอกกูเลชันด้วยวิธีจาร์เทสต์

ตารางที่ 3-6 ขอบเขตการทดลองการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)

การทดลอง	สถานะที่ทำการทดลอง
(1) PACl	ความเข้มข้น PACl ระหว่าง 10 ถึง 80 mg/L ค่า pH 7
(2) PACl + PAC	ความเข้มข้น PACl และ pH 7 สถานะที่เหมาะสมจาก (1) และความเข้มข้น PAC 10 ถึง 80 mg/L

ขั้นตอนการทดลองของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

ทำการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยการใช้น้ำดื่มที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 10, 20, 40, 60 และ 80 mg/L ตามลำดับ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เติมน้ำตัวอย่าง 1,000 mL ลงในบีกเกอร์
2. ใช้ปิเปตดูดสารละลาย PACl (stock PACl solution) ที่เตรียมไว้ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 10 20 40 60 และ 80 g/L อย่างละ 1 mL ใส่ลงในแต่ละบีกเกอร์ จะได้ความเข้มข้นของสารละลายโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ ในแต่ละบีกเกอร์เป็น 10 20 30 40 และ 50 mg/L ตามลำดับ
3. ทำการกวนเร็วโดยใช้อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงกวนช้าด้วยอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และควบคุมระดับพีเอชของน้ำเท่ากับ 7 ด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ NaOH
4. ตั้งทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที
5. นำน้ำใส (supernatant) ส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์ความขุ่น ความเป็นต่าง และอีกส่วนหนึ่งนำไปกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในรูปของ DOC UV-254 และ DON โดยเลือกสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันจากค่าประสิทธิภาพในการกำจัด DOC UV-254 และ DON ได้สูงที่สุด
6. เลือกสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl มาทดลองจาร์ทดสอบอีกครั้งให้ได้น้ำตัวอย่างเท่ากับ 10 L และกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณ NDMA, NDMAFP รวมถึงใช้ในกระบวนการ resin fractionation สำหรับแยกสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม

กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)

ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยการใช้ PACl ที่ระดับความเข้มข้น 1 ค่าจากสภาวะที่เหมาะสมร่วมกับการเติม PAC ที่ปริมาณแตกต่างกัน 5 ค่า ได้แก่ 10, 20, 40, 60 และ 80 mg ตามลำดับ ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เติมน้ำตัวอย่าง 1,000 mL ลงในบีกเกอร์
2. ใช้ปิเปตดูดสารละลาย PACl (stock PACl solution) ที่ระดับความเข้มข้นจากสภาวะที่เหมาะสมปริมาณ 1 mL ใส่ลงในแต่ละบีกเกอร์
3. ทำการกวนเร็วโดยใช้อัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นจึงกวนช้าด้วยอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยเติม PAC ที่เตรียมไว้เท่ากับ 10, 20, 40, 60 และ 80 mg ลงในแต่ละบีกเกอร์ระหว่างการกวนช้า และควบคุมระดับพีเอชของน้ำเท่ากับ 7 ด้วยสารละลาย H_2SO_4 และ NaOH
4. ตั้งทิ้งให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที
5. นำน้ำใส (Supernatant) ส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์ความขุ่น ความเป็นต่าง และอีกส่วนหนึ่งนำไปกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด $0.7 \mu m$ เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในรูปของ DOC UV-254 และ DON โดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันจากค่าประสิทธิภาพในการกำจัด DOC UV-254 และ DON ได้สูงที่สุด
6. เลือกสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl มาทดลองจาร์ทดสอบอีกครั้งให้ได้น้ำตัวอย่างเท่ากับ 10 L และกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด $0.7 \mu m$ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณ NDMA, NDMAFP รวมถึงใช้ในกระบวนการ resin fractionation สำหรับแยกสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม

3.3.6 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation

ทำการการศึกษาการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation ในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 โดยแยกสารอินทรีย์ในน้ำออกเป็น 3 กลุ่มคือ สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) สารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fraction, TPI) และสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) ประกอบด้วย 7 ชุดการทดลองดังนี้

1. การแยกสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำดิบประปา 5 ชุดการทดลอง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองทลา จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่

2. การแยกสารอินทรีย์กลุ่ม HPO TPI และ HPI ในน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปา
หาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และ PACl ร่วมกับ PAC ที่สภาวะที่เหมาะสม 2
ชุดการทดลอง

ขั้นตอนการเตรียมเรซินสำหรับกระบวนการ resin fractionation

การเตรียมเรซินเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการ resin fractionation เพื่อแยก
สารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ HPO TPI และ HPI โดยใช้เรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4 โดย เรซิน
ชนิด DAX-8 เป็นเรซินที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.6 (superlite™ DAX-8, supelco park,
bellefonte, PA) ขั้นตอนในการล้างเรซิน DAX-8 เริ่มจากการนำเรซินมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮ-
ดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (N) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินมาทำความสะอาด
สะอาดโดยใช้เครื่องมือ soxhlet extraction โดยใช้ acetone และ hexane กลับทำความสะอาดเร
ซินอย่างละ 24 ชั่วโมง (รูปที่ 3-14) จากนั้นนำเรซินที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาแช่ใน
methanol เพื่อรักษาสภาพ ส่วนเรซินชนิด XAD-4 เป็นเรซินที่มีค่าความพรุนเท่ากับ 0.5 (amberlite®
XAD4) ขั้นตอนในการล้างเรซิน XAD-4 เริ่มจากการนำเรซินมาแช่ในสารละลาย NaOH ที่มีความ
เข้มข้น 0.1 N เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเรซินมาทำความสะอาดโดยใช้เครื่องมือ soxhlet
extraction โดยใช้ methanol และ acetonitrile กลับทำความสะอาดเรซินอย่างละ 24 ชั่วโมง
จากนั้นนำเรซินที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วมาแช่ใน methanol เพื่อรักษาสภาพ ในส่วนของ
ขั้นตอนการบรรจุเรซิน DAX-8 และ XAD-4 ลงในคอลัมน์มีวิธีการดำเนินการเหมือนกันคือ นำเรซิน
ไปใส่ในคอลัมน์ (ขนาด 2.5×120 cm) ที่มี glass wool บรรจุอยู่ โดย glass wool ต้องผ่านการทำ
ความสะอาดด้วย methanol โดยกลับด้วยเครื่องมือ soxhlet extraction เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อน
นำมาบรรจุในคอลัมน์ เมื่อบรรจุเรซินลงในคอลัมน์เรียบร้อยแล้วจึงล้างเรซินด้วย NaOH เข้มข้น 0.1
N และ HCl เข้มข้น 0.1 N เป็นปริมาณเท่ากับ 2.5 เท่า bed volume ตามลำดับ ส่วนในขั้นตอน
สุดท้ายจะนำเรซินมาล้างด้วยน้ำ Milli-Q จนกระทั่งมีค่าการนำไฟฟ้าต่ำกว่า 10 ไมโครซีเมนต่อ
เซนติเมตร ($\mu\text{S}/\text{cm}$) และมีค่า DOC ต่ำกว่า 0.2 mg/L (Leenheer, 1981; Marhaba *et al.*, 2003)



รูปที่ 3-14 การทำความสะอาดเรซินด้วยวิธีการ soxhlet extraction

ขั้นตอนการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation

นำน้ำตัวอย่างแต่ละชุดการทดลองมาชั่งตวง 5 L และทำการกรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 μm จากนั้นปรับพีเอชเป็น 2 ด้วย H_2SO_4 เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการ fraction แยกสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI ด้วยเรซินชนิด DAX-8 ที่บรรจุในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ โดยให้มีอัตราเร็วในการไหลผ่านเรซินต่ำกว่า 12 bed volumes/hr น้ำส่วนที่ไหลผ่านเรซิน DAX-8 จะเป็นส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI จากนั้นล้างเรซินด้วยน้ำ Milli-Q เป็นปริมาณ 1 bed volumes และปล่อยทิ้ง จากนั้นเติมสารละลาย NaOH 0.1 N ปริมาณเท่ากับ 0.25 bed volumes และ NaOH 0.01 N ปริมาณเท่ากับ 1.25 bed volumes ปล่อยให้ไหลผ่านเรซินด้วยความเร็วไม่เกิน 2 bed volumes/hr จะได้ส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO จากนั้นนำส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI มาผ่านเรซิน XAD-4 ที่บรรจุในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้ไหลผ่านเรซินโดยให้มีอัตราเร็วในการไหลต่ำกว่า 15 bed volumes/hr น้ำที่ไหลผ่านเรซิน XAD-4 จะเป็นส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI จากนั้นเติมสารละลาย NaOH 0.1 N ปริมาณเท่ากับ 0.25 bed volumes และ NaOH 0.01 N ปริมาณเท่ากับ 1.25 bed volumes ปล่อยให้ไหลผ่านเรซินด้วยความเร็วไม่เกิน 1 bed volumes/hr จะได้ส่วนของสารอินทรีย์กลุ่ม TPI ซึ่งน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ fraction ต้องปรับพีเอชเท่ากับ 7 ก่อนนำไปวิเคราะห์ DOC DON และ NDMAFP การแยกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ fraction ด้วยเรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4 แสดงดังรูปที่ 3-15 (ก) และ 3-15 (ข) ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-15 การแยกกลุ่มสารอินทรีย์โดยกระบวนการ resin fractionation ด้วยเรซินชนิด DAX-8 และ XAD-4

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบและน้ำประปา

ลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ สะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา (บริเวณต้นน้ำ) จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา (บริเวณกลางน้ำ) และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ (บริเวณท้ายน้ำ) จากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้งแสดงดังตารางที่ 4-1 น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีสภาพค่อนข้างเป็นกลางโดยมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.2-6.9 อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 26-33 องศาเซลเซียส น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่าความเป็นด่างค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 8-30 mg/L as CaCO₃ โดยค่าความเป็นด่างมีผลต่อการโคแอกกูเลชัน น้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำประปามีค่าความเป็นด่างที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 30-500 mg/L as CaCO₃ (มันสิน ตัณสุลเวศม์, 2542) ความเป็นด่างของน้ำดิบประปามีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 9-26 mg/L as CaCO₃ จึงจำเป็นต้องเพิ่มความเป็นด่างระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน (AWWA, 1999) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าความเป็นด่างของน้ำตัวอย่างข้างต้นมีค่าสอดคล้องกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ (2555) ที่พบว่าค่าความเป็นด่างของน้ำดิบจากกลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกษามีค่าอยู่ในช่วง 12-27 mg/L as CaCO₃ เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นพบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำทั้งสองแห่งมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.0-33.3 NTU โดยน้ำจากอ่างเก็บน้ำคลองหลามีความขุ่นสูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาเนื่องจากพื้นที่รอบบริเวณอ่างเก็บน้ำคลองหลาอยู่ติดกับภูเขาเมื่อมีฝนตกอาจชะตะกอนดินและสารแขวนลอยลงสู่อ่างเก็บน้ำ ส่วนน้ำดิบประปาทั้งสามแห่งมีค่าความขุ่นอยู่ในช่วง 2.3-52.1 NTU

ค่าไนเตรตในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.2 mg-N/L ซึ่งต่ำกว่าน้ำดิบประปาที่มีค่าไนเตรตอยู่ในช่วง 0.2-1.6 mg-N/L ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ (2555) ที่พบว่าค่าไนเตรตในน้ำดิบจากกลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกษามีค่าอยู่ในช่วง 0.1-4.3 mg/L เนื่องจากมีการกำหนดค่ามาตรฐานไนเตรตในน้ำผิวดินให้ต้องมีค่าไม่เกิน 5 mg-N/L (มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน, 2537) จึงกล่าวได้ว่าไนเตรตในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปามีค่าต่ำ เมื่อพิจารณาค่าไนไตรต์ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.002-0.004 mg-N/L ซึ่งต่ำกว่าน้ำดิบประปาที่มีค่าไนไตรต์อยู่ในช่วง 0.002-0.203 mg-N/L แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานไนไตรต์ในน้ำผิวดินไว้ ค่าแอมโมเนียในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.05-0.22 mg-N/L น้ำดิบประปาจากคลองอุต๊ะเกษามีค่าแอมโมเนียอยู่ในช่วง 0.11-0.98 mg-N/L และจากการศึกษาพบว่าน้ำดิบประปาพะตง-พังลาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และน้ำดิบประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าแอมโมเนียสูงเกินค่ามาตรฐานโดยมีค่า

เท่ากับ 0.67, 0.74 และ 0.98 mg-N/L ตามลำดับ เนื่องจากมีการกำหนดค่ามาตรฐานแอมโมเนียในน้ำผิวดินให้ต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 mg-N/L (มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน, 2537)

ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ละลายน้ำ ได้แก่ dissolved organic carbon (DOC) ultraviolet adsorption at wavelength 254 nm (UV-254) และ dissolved organic nitrogen (DON) ค่า DOC เป็นพารามิเตอร์ตัวแทนของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกและอะโรมาติก ค่า UV-254 ใช้ในการตรวจวัดสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติก โดยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 254 nm ได้ดีที่สุด ส่วนค่า DON เป็นพารามิเตอร์ตัวแทนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด เมื่อพิจารณาค่า DOC ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำพบว่า มีค่า DOC ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 1.8-2.3 mg/L สอดคล้องกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ อรมาศ สุทธิสุน (2555) ที่พบว่าค่า DOC ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำบริเวณคลองอู่ตะเภา มีค่าอยู่ในช่วง 1.9-2.3 mg/L ส่วนน้ำดิบประปามีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.9-3.9 mg/L โดยค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากบริเวณต้นน้ำไปยังบริเวณท้ายน้ำ กล่าวคือค่า DOC มีค่าเพิ่มขึ้นจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดาบริเวณต้นน้ำ จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลาบริเวณลำน้ำช่วงกลาง และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่บริเวณท้ายน้ำ สอดคล้องกับการศึกษาของ Musikavong *et al.* (2015) ที่พบว่าน้ำดิบประปาคองอู่ตะเภา มีค่า DOC เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากบริเวณต้นน้ำไปยังบริเวณท้ายน้ำ โดยค่า DOC ของน้ำดิบบริเวณต้นน้ำและบริเวณท้ายน้ำมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.3 และ 5.6 mg/L ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ อรมาศ สุทธิสุน (2555) ที่พบว่าน้ำดิบประปาคองอู่ตะเภา มีค่า DOC เพิ่มขึ้นจากบริเวณต้นน้ำไปยังท้ายน้ำ ซึ่งค่า DOC ของน้ำดิบประปาบริเวณต้นน้ำ ลำน้ำช่วงกลาง และท้ายน้ำมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.5, 3.4 และ 4.4 mg/L ตามลำดับ

ค่า UV-254 ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปามีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.039-0.244 cm^{-1} เมื่อพิจารณาค่า DON ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำพบว่า มีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.04-0.11 mg-N/L น้ำดิบประปามีค่า DON อยู่ในช่วง ตรวจไม่พบ-1.12 mg-N/L ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ อรมาศ สุทธิสุน (2555) ที่พบว่าน้ำดิบประปาคองอู่ตะเภา มีค่า DON อยู่ในช่วง ตรวจไม่พบ-0.8 mg-N/L จากผลการตรวจวัดค่า DON ของงานวิจัยนี้ กล่าวได้ว่ามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำหลังจากบริเวณต้นน้ำในปริมาณสูง และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำดังกล่าวยังคงอยู่จนถึงบริเวณปลายน้ำ

จากผลการวิเคราะห์สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำและสารอนินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved inorganic nitrogen, DIN) ซึ่งหมายถึงผลรวมของ ค่าไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนีย กล่าวได้ว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีปริมาณไนโตรเจนละลายน้ำในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ต่ำกว่าน้ำดิบประปาคองอู่ตะเภา และน้ำดิบประปาคองอู่ตะเภา มีการปนเปื้อนของสารดังกล่าวเพิ่มขึ้นจากบริเวณต้นน้ำไปยังท้ายน้ำ กล่าวคือจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา ไปยังจุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่

เนื่องจากคลองอุต๊ะเกาเป็นลำน้ำที่ไหลผ่านชุมชน พื้นที่ทำการเกษตร และโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท ทำให้มีโอกาสปล่อยน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจากกิจกรรมข้างต้นลงสู่คลองอุต๊ะเกา ลักษณะน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัดจากกิจกรรมดังกล่าวจึงมีผลต่อลักษณะน้ำดิบประปาจากคลองอุต๊ะเกา โดยลักษณะของน้ำเสียชุมชนโดยทั่วไปมีไนโตรเจนปนเปื้อนอยู่ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) นอกจากนี้การปลูกพืชน้ำในลำคลองซึ่งมีการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบทำให้มีไนโตรเจนปนเปื้อนในน้ำ โดยไนโตรเจนในปุ๋ยจะอยู่ในรูปของไนเตรตหรือแอมโมเนียมหรือยูเรีย น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมยางซึ่งมีแอมโมเนียปนเปื้อนอยู่เนื่องจากแอมโมเนียเป็นสารเคมีที่ใช้ในการรักษาสภาพน้ำยาง จากการศึกษาของ อารมณ์ รักเกิด (2542) พบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตของโรงงานยางมีไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียสูงที่สุด รองลงมาคือสารอินทรีย์ไนโตรเจน ส่วนไนไตรต์และไนเตรตพบว่ามีน้อยมาก น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเลมีไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียและเอมีน กิจกรรมเหล่านี้ล้วนส่งผลให้แหล่งน้ำมีการปนเปื้อนของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นทั้งในรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและสารอนินทรีย์ไนโตรเจน จุดสูบน้ำดิบประปาพะตงและจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ซึ่งตั้งอยู่ช่วงกลางและท้ายของลำน้ำ ตามลำดับ จึงมีการปนเปื้อนของสารไนโตรเจนละลายน้ำทั้งในรูปของสารอินทรีย์และอนินทรีย์สูง เนื่องจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ตั้งอยู่ช่วงบริเวณหลังจากต้นน้ำมาจนถึงช่วงท้ายน้ำ

specific ultraviolet adsorption (SUVA) เป็นดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมด ค่า SUVA เป็นอัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิก (Peuravuori and Pihlaja, 1997) ต่อสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (UV-254/DOC) ดังนั้น SUVA จึงเป็นดัชนีชี้วัดความเหมาะสมของการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการใช้กำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากน้ำดิบ (James *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2003; Kanokkantapong *et al.*, 2006) โดยกรณีที่อัตราส่วนของสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมดมีค่าสูงโอกาสที่จะลดสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันได้ก็มีค่าสูงเช่นกัน (U.S.EPA., 1999; AWWA., 1999) ส่วนในกรณีที่น้ำตัวอย่างมีค่า SUVA ต่ำกว่า 2 L/mg-m กล่าวได้ว่าน้ำนั้นประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Edzwald *et al.*, 1985) อาจจะไม่เหมาะสมที่จะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียว เมื่อพิจารณาค่า SUVA ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำทั้งสองแห่งพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 1.8-7.8 L/mg-m โดยน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำสะเตาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 2.3 และ 1.8 L/mg-m ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และคณะ (2555) ที่พบว่าค่า SUVA ของอ่างเก็บน้ำสะเตามีค่าอยู่ในช่วง 1.4-2.0 L/mg-m น้ำจากอ่างเก็บน้ำคลองหลาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 มีค่า SUVA เท่ากับ 3.8 และ 7.8 L/mg-m ตามลำดับ ส่วนน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาทั้งสามแห่งมีค่าอยู่ในช่วง 3.4-8.7 L/mg-m จากข้อมูลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำคลองหลาและน้ำดิบประปาทั้งสามแห่งมีค่า SUVA สูงกว่า 2 L/mg-m หมายถึงน้ำตัวอย่างนั้น

มีสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกเป็นองค์ประกอบหลักจึงมีความเหมาะสมในการใช้กระบวนการโคแอกกูเลชัน ในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ ส่วนน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำสะเดามีค่า SUVA ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการโคแอกกูเลชันน้ำดิบดังกล่าวด้วยสารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ จำเป็นต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและจุดสูบน้ำดิบประปา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์									
	อ่างเก็บน้ำสะเดา		อ่างเก็บน้ำคลองหลา		จุดสูบน้ำดิบสะเดา		จุดสูบน้ำดิบพะตง-พังงา		จุดสูบน้ำดิบหาดใหญ่	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
พีเอช	6.2	6.8	6.6	6.9	6.6	6.6	6.3	6.6	6.3	6.5
อุณหภูมิ (°C)	30	31	31	33	26	29	27	29	27	31
ความเป็นด่าง	10	8	30	24	13	9	16	13	19	26
ความขุ่น (NTU)	2.5	2.0	18.7	33.3	22.8	2.3	52.1	17.7	38.5	9.4
ไนเตรต (mg-N/L)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.8	1.1	0.6	1.6
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.003	0.051	0.031	0.040	0.203
แอมโมเนีย (mg-N/L)	0.06	0.05	0.16	0.22	0.11	0.19	0.67	0.25	0.74	0.98
DOC (mg/L)	1.8	2.2	2.3	2.2	1.9	1.9	2.8	2.9	2.0	3.9
UV-254 (cm ⁻¹)	0.041	0.039	0.087	0.172	0.120	0.078	0.244	0.103	0.143	0.132
SUVA (L/mg-m)	2.3	1.8	3.8	7.8	6.3	4.1	8.7	3.6	7.2	3.4
DON (mg-N/L)	0.04	0.08	0.08	0.11	0.07	N.D.	0.22	1.10	0.31	1.12
DOC/DON	45	28	29	20	27	N.A.	13	3	6	3

หมายเหตุ: ความเป็นด่าง หน่วย mg/L as CaCO₃, N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้), N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้)

เมื่อพิจารณาค่าดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ได้แก่ DOC UV-254 และ DON ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำกับน้ำดิบประปาจากคลองอุตะเถาซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.8-2.3 mg/L, 0.039-0.172 cm^{-1} , 0.04-0.11 mg-N/L และ 1.9-3.9 mg/L, 0.078-0.244 cm^{-1} , ตรวจไม่พบ -1.12 mg-N/L ตามลำดับ กล่าวได้ว่าน้ำดิบประปาคลองอุตะเถามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์คาร์บอนและสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำสูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำ ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Musikavong and Wattanachira (2013) ที่พบว่าน้ำดิบจากคลองอุตะเถามีสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำ โดยน้ำดิบจากคลองอุตะเถาและน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC และ UV-254 อยู่ในช่วง 3.9-5.5 mg/L และ 0.159-0.414 cm^{-1} และ 2.9-4.9 mg/L และ 0.058-0.189 cm^{-1} ตามลำดับ

นอกจากนี้ Musikavong *et al.* (2015) พบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา น้ำดิบประปาคลองอุตะเถาบริเวณต้นน้ำและบริเวณท้ายน้ำมีค่า DOC โดยเฉลี่ยเป็น 4.1, 4.0, 4.3 และ 5.6 mg/L ตามลำดับ การที่น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำต่ำกว่าน้ำดิบจากคลองอุตะเถาเนื่องมาจากอ่างเก็บน้ำรองรับน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ จึงมีเพียงการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เกิดจากการย่อยสลายของซากพืช ซากสัตว์ การไหลบ่าของน้ำฝนซึ่งชะหน้าดินจากภูเขาสูงสู่แหล่งน้ำ เป็นต้น ส่วนคลองอุตะเถาเป็นลำน้ำที่รับน้ำจากอ่างเก็บน้ำแล้วไหลผ่านชุมชน ตลอดช่วงลำน้ำมีทั้งบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการทำเกษตรกรรม กิจกรรมเหล่านี้ส่งผลให้น้ำดิบประปาคลองอุตะเถามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ละลายน้ำสูงกว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำรวมถึงทำให้ค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากบริเวณต้นน้ำไปยังบริเวณท้ายน้ำด้วยเช่นกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า DOC ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำในการศึกษาคั้งนี้กับค่าดังกล่าวของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำแหล่งอื่นๆในประเทศไทย พบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำในการศึกษาคั้งนี้ซึ่งมีค่า DOC โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 mg/L มีค่าใกล้เคียงกับ DOC ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำอ่างแก้วและอ่างเก็บน้ำแม่กวัง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.4 และ 2.2 mg/L ตามลำดับ (Homklin, 2004) แต่มีค่าต่ำกว่าน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำเชียงใหม่และอ่างเก็บน้ำแม่เหิยะ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งมีค่า DOC ค่อนข้างสูงเท่ากับ 5.4 และ 6.4 mg/L ตามลำดับ (Janhom *et al.*, 2005; อัครวินท์ พุ่มไพศาลชัย, 2548) ส่วนค่า DOC ของน้ำดิบประปาคลองอุตะเถาจากการศึกษาคั้งนี้ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.6 mg/L มีค่าต่ำกว่าน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา จุดสูบน้ำดิบประปาบางเขน และจุดสูบน้ำดิบประปาบางเลน กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่า DOC เท่ากับ 4.7, 4.2 และ 7.3 mg/L ตามลำดับ (Panyapinyopol *et al.*, 2005; Kumsuvan, 2013)

เมื่อเปรียบเทียบค่า DON ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปาคลองอุตะเถาในการศึกษาคั้งนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำในการศึกษาคั้งนี้มีค่า DON เฉลี่ยเท่ากับ 0.08 mg-N/L มีค่าต่ำกว่าค่า DON ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำ Harwood ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีค่า DON เท่ากับ 0.27 mg-N/L (Lee and Westerhoff, 2006) และน้ำดิบประปาจากทะเลสาบ Kinmen Tai ประเทศไต้หวันที่มีค่า DON เฉลี่ยเท่ากับ 0.54 mg-N/L (Chang *et al.*, 2013) ส่วน

น้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.56 mg-N/L มีค่าใกล้เคียงกับน้ำดิบจากแม่น้ำ Haiyantang ประเทศจีน ที่มีค่า DON เฉลี่ยเท่ากับ 0.53 mg-N/L (Zhang *et al.*, 2015) แต่ น้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา มีค่า DON สูงกว่า ค่า DON ของน้ำดิบประปาบางเขนและน้ำดิบประปาบางเลน กรุงเทพมหานคร น้ำดิบจากแม่น้ำ Huron และน้ำดิบจากแม่น้ำ Salt ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีค่า DON เท่ากับ 0.24 0.34 0.35 และ 0.25 mg-N/L ตามลำดับ (Lee and Westerhoff, 2006; Kumsuvan, 2013) และน้ำดิบจากระบบประปา Moorhead ที่มีค่า DON โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.33 mg-N/L (Wadhawan *et al.*, 2014)

เมื่อพิจารณาค่า DOC/DON ของน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำพบว่า มีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 20-45 ส่วนน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภา มีค่า DOC/DON ต่ำกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำโดยมีค่าอยู่ในช่วง ไม่สามารถหาค่าได้-27 โดยน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาช่วงลำน้ำช่วงกลางและท้ายน้ำมีค่า DOC/DON ต่ำกว่าบริเวณต้นน้ำ ค่าอัตราส่วนระหว่าง DOC และ DON สามารถบ่งบอกถึงสัดส่วนของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำและสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำได้ กล่าวคือ หากค่า DOC/DON มีค่าสูงหมายถึงน้ำตัวอย่างมีสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ในทางกลับกันหากค่า DOC/DON มีค่าต่ำหมายถึงในน้ำตัวอย่างนั้นมีสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำตัวอย่างนั้นมีค่าโอกาสการก่อตัวของสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nitrogenous disinfection by-products, N-DBPs) ได้สูง จึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภา มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำปนเปื้อนสูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำและมีความเข้มข้นของสารดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นจากต้นน้ำไปยังท้ายน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบค่า DOC/DON พบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและคลองหลามีค่าเฉลี่ย 37 และ 25 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าดังกล่าวของน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนที่มีค่าเท่ากับ 18 และ 21 ตามลำดับ (Kumsuvan, 2013) ส่วนน้ำดิบประปาสะเดา, พะตุง-พังลา และหาดใหญ่มีค่า DOC/DON เฉลี่ยเท่ากับ ไม่สามารถหาค่าได้, 5 และ 6 ซึ่งต่ำกว่าค่าดังกล่าวของน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลน จากข้อมูลข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำค่อนข้างต่ำ แต่ น้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภา มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลน ที่ผ่านงานวิจัยที่ใช้ น้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาในการทดลองมุ่งเน้นศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ จากผลการศึกษาข้างต้นที่ตรวจพบสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำในปริมาณสูงจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาหาวิธีการในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำประปาสะเดา น้ำประปาพะตุง-พังลา และน้ำประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้งแสดงดังตารางที่ 4-2 ค่าพีเอชของน้ำประปาทั้งสามแห่งมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 5.2-6.4 เนื่องจากมีการกำหนดค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับน้ำประปาควรอยู่ในช่วง 6.5-8.5 (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550) สาเหตุที่น้ำประปามีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำอาจเนื่องมาจากการเติมค่าที่ไม่เพียงพอในระหว่าง

กระบวนการโคแอกกูเลชัน อุณหภูมิของน้ำประปามีค่าอยู่ในช่วง 27-31 องศาเซลเซียส ความเป็นต่างมีค่าอยู่ในช่วง 2-24 mg/L as CaCO₃ เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.3-2.0 NTU ซึ่งเป็นค่าความขุ่นที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปา เนื่องจากการประปาส่วนภูมิภาค (2550) ได้มีการกำหนดค่าความขุ่นของน้ำประปาที่ยอมรับได้ไม่เกิน 5 NTU ไนเตรตมีค่าอยู่ในช่วง 0.1-1.2 mg-N/L และไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของไนเตรตสำหรับน้ำประปาไว้ ส่วนค่าไนไตรต์ของน้ำประปามีค่าอยู่ในช่วง 0.002-0.004 mg-N/L แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลรวมของไนเตรตและไนไตรต์ในน้ำประปาจากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้งพบว่ามีความผ่านมาตรฐานน้ำดื่ม เนื่องจากมีการกำหนดค่ามาตรฐานน้ำดื่มไม่ควรมีไนเตรตและไนไตรต์รวมกันสูงกว่า 10 mg-N/L (มันสิน ตันตุลเวศม์, 2542) ส่วนแอมโมเนียมีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.75 mg-N/L เนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานของแอมโมเนียในน้ำประปาไว้ แต่ได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานแอมโมเนียสำหรับน้ำผิวดินต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 mg-N/L (มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน, 2537) น้ำประปาพะตง-พังลาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 มีค่าแอมโมเนียเท่ากับ 0.75 mg-N/L จึงถือเป็นค่าที่สูงเกินมาตรฐาน เมื่อพิจารณาค่าดัชนีตัวแทนสารอินทรีย์ธรรมชาติพบว่าค่า DOC ของน้ำประปามีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 1.4-3.2 mg/L ค่า UV-254 มีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.018-0.055 cm⁻¹ ค่า DON มีค่าอยู่ในช่วง 0.06-1.07 mg-N/L ค่า DOC และ DON ข้างต้นมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์ และ อรมาศ สุทธิณุ่น (2555) ที่พบว่าน้ำประปาคลองอู่ตะเภาหลังการเติมคลอรีนมีค่า DOC และ DON มีค่าอยู่ในช่วง 1.6-2.5 mg/L และ 0-1.3 mg-N/L ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า SUVA ของน้ำประปาทั้งสามแห่งพบว่ามีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง 0.9-2.1 L/mg-m ส่วน DOC/DON มีค่าอยู่ในช่วง 2-35 โดยน้ำประปาสะเตาจากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 มีค่า DOC/DON เท่ากับ 23 และ 35 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าน้ำประปาพะตง-พังลาและน้ำประปาหาดใหญ่ที่มีค่า DOC/DON อยู่ในช่วง 2-5 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าน้ำประปาพะตง-พังลาและน้ำประปาหาดใหญ่มีสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON) เป็นองค์ประกอบหลักสูงกว่าน้ำประปาสะเตา

ตารางที่ 4-2 ลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำประปา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์					
	น้ำประปาเสเดา		น้ำประปาพะตง-พังลา		น้ำประปาหาดใหญ่	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
พีเอช	6.2	6.2	5.2	6.3	5.4	6.4
อุณหภูมิ (°C)	27	29	27	30	29	31
ความเป็นด่าง	13	5	2	8	2	24
ความขุ่น (NTU)	0.5	1.4	2	0.4	0.9	0.3
ไนเตรท (mg-N/L)	0.2	0.1	1.2	1	1.1	1
ไนไตรต์ (mg-N/L)	0.002	0.002	0.003	0.004	0.002	0.002
แอมโมเนีย (mg-N/L)	0.06	0.06	0.75	0.04	0.01	0.09
DOC (mg/L)	1.4	2.8	1.6	2.0	1.6	3.2
UV-254 (cm ⁻¹)	0.024	0.028	0.034	0.018	0.027	0.055
SUVA (L/mg-m)	1.7	1.0	2.1	0.9	1.7	1.7
DON (mg-N/L)	0.06	0.08	0.37	0.92	0.32	1.07
DOC/DON	23	35	4	2	5	3

หมายเหตุ: ความเป็นด่าง หน่วย mg/L as CaCO₃

4.1.1 การกระจายมวลของสารอินทรีย์ละลายน้ำ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการ resin fractionation โดยใช้ เรซิน DAX-8 และ XAD-4 แยกสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) สารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fraction, TPI) และสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ จากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้ง

ประสิทธิภาพของกระบวนการ resin fractionation หาได้จากการทำสมดุลมวล (mass balance) โดยเปอร์เซ็นต์ผลต่างระหว่างมวล DOC ของน้ำก่อนกระบวนการ resin fractionation กับผลรวมมวล DOC ของน้ำหลังกระบวนการ resin fractionation ที่ยอมรับได้ต้องมีค่าอยู่ในช่วง 10-15 เปอร์เซ็นต์ (Marhaba, 2000) หรือระหว่าง 8-12 เปอร์เซ็นต์ (Croue *et al.*, 1993) มวล DOC ที่หายไปหลังจากกระบวนการ resin fractionation อาจเกิดจากในขั้นตอนของการชะสารอินทรีย์ออกมาได้ไม่หมด เป็นผลให้ยังคงมีสารอินทรีย์บางส่วนติดอยู่ในเรซิน ส่วนในกรณีที่ผลรวมมวล DOC หลังกระบวนการ resin fractionation มีค่าสูงกว่ามวล DOC ก่อนกระบวนการ resin fractionation อาจเป็นผลจากการทดลองในขั้นตอนของการล้างเรซินโดยใช้น้ำกลั่นที่มีค่า DOC ต่ำ สารอินทรีย์ตกค้างในน้ำกลั่นที่นำมาล้างอาจถูกดูดซับอยู่ในเรซิน เมื่อทำการชะสารอินทรีย์เหล่านี้จึงถูกชะออกมาพร้อมกับสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างซึ่งเป็นผลให้มวล DOC ของน้ำตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ผลต่างระหว่างมวล DOC ก่อนกระบวนการ resin fractionation กับผลรวมมวล DOC หลังกระบวนการ resin fractionation ของน้ำดิบในการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสองครั้ง แสดงดังตารางที่ 4-3 เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวล DOC พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 2.9-13.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

จากตารางที่ 4-3 เมื่อพิจารณาค่ามวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (DOC_{HPI}) จากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้ง พบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดามีค่า DOC_{HPI} เฉลี่ยเป็น 0.8 mg/L อ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่า DOC_{HPI} เฉลี่ยเป็น 0.9 mg/L น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดาบริเวณต้นน้ำมีค่า DOC_{HPI} เฉลี่ยเป็น 0.7 mg/L น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลาบริเวณกลางน้ำมีค่า DOC_{HPI} เฉลี่ยเป็น 1.1 mg/L และน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่บริเวณท้ายน้ำมีค่า DOC_{HPI} เฉลี่ยเป็น 1 mg/L ค่า DOC_{HPI} ของน้ำในอ่างเก็บน้ำและน้ำบริเวณคลองอุตะแกมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่า DOC_{HPI} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากอ่างเก็บน้ำ ไปยังบริเวณต้นน้ำ กลางน้ำ และบริเวณปลายน้ำ สัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่าเฉลี่ยเป็น 35 และ 34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา พะตง-พังลา และหาดใหญ่ มีสัดส่วนของ DOC_{HPI} โดยเฉลี่ย 30, 34 และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 การกระจายมวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (HPI) กิ่งชอบน้ำ (TPI) และไม่ชอบน้ำ (HPO) ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปา

ตัวอย่างน้ำ	กลุ่มสารอินทรีย์					
	HPI	TPI	HPO	HPI+TPI+HPO	Total	%Diff
อ่างเก็บน้ำสะเดา (ครั้งที่ 1)	0.8 (36)	0.5 (23)	0.9 (41)	2.2	2.0	9.1
อ่างเก็บน้ำสะเดา (ครั้งที่ 2)	0.8 (33)	0.6 (25)	1.0 (42)	2.4	2.2	8.3
อ่างเก็บน้ำคลองหลา (ครั้งที่ 1)	1.0 (36)	0.5 (18)	1.3 (46)	2.8	2.5	10.7
อ่างเก็บน้ำคลองหลา (ครั้งที่ 2)	0.8 (32)	0.6 (24)	1.1 (44)	2.5	2.3	8.0
จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา (ครั้งที่ 1)	0.6 (27)	0.5 (23)	1.1 (50)	2.2	1.9	13.6
จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา (ครั้งที่ 2)	0.7 (32)	0.5 (23)	1.0 (45)	2.2	2.1	4.5
จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา (ครั้งที่ 1)	1.1 (31)	0.6 (17)	1.8 (52)	3.5	3.4	2.9
จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลา (ครั้งที่ 2)	1.0 (36)	0.6 (21)	1.2 (43)	2.8	2.9	3.4
จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ (ครั้งที่ 1)	0.8 (31)	0.5 (19)	1.3 (50)	2.6	2.3	11.5
จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ (ครั้งที่ 2)	1.2 (35)	0.6 (18)	1.6 (47)	3.4	4.0	15

หมายเหตุ : HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, Total หมายถึง DOC ก่อน fraction, %Diff = (Total-(HPI+TPI+HPO))*100/Total, () หมายถึง เปอร์เซ็นต์การกระจายตัว

จากข้างต้นกล่าวได้ว่าสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} จากการศึกษาเปรียบเทียบกับแหล่งน้ำอื่นๆและงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 4-4 พบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} ใกล้เคียงกับน้ำจากอ่างเก็บน้ำ Bultiere ประเทศฝรั่งเศส, ทะเลสาบ Cazau ประเทศฝรั่งเศส, อ่างเก็บน้ำ Miyun ประเทศจีน และทะเลสาบ Weishan ประเทศจีน ซึ่งมีสัดส่วนของ DOC_{HPI} เท่ากับ 31, 35, 35 และ 39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Lee *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2014) ส่วนน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาที่มีสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} ใกล้เคียงกับน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาจากการศึกษาของ Srimuang, (2011) ที่พบว่าน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาฤดูฝนและฤดูแล้งมีสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} เท่ากับ 31 และ 33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีค่าใกล้เคียงกับน้ำจาก แม่น้ำ Marne, แม่น้ำ Huangpu และแม่น้ำ Ulu Pontian มีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPI} เท่ากับ 35, 39 และ 38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Pernet-Courier *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2014; Zularisam *et al.*, 2007)

เมื่อพิจารณาค่ามวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มกิ่งชอบน้ำ (DOC_{TPI}) จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 พบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่า DOC_{TPI} เฉลี่ย

เท่ากับ 0.6 และ 0.6 mg/L ตามลำดับ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดาบริเวณ จุดสูบน้ำดิบประปา พะตง-พังลา และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ มีค่า DOC_{TPI} เฉลี่ยเท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.6 mg/L ตามลำดับ ค่า DOC_{TPI} ของน้ำในอ่างเก็บน้ำและน้ำบริเวณคลองอุตะแกมมีค่าไม่แตกต่างกัน จากข้างต้นกล่าวได้ว่า สารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำในน้ำดิบประปาบริเวณต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำมาจากน้ำในอ่างเก็บน้ำเป็นหลัก สัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่าเฉลี่ย 24 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา พะตง-พังลา และหาดใหญ่ มีสัดส่วนของ DOC_{TPI} โดยเฉลี่ย 23, 19 และ 19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นพบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำสูงกว่าน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอุตะแกมเล็กน้อย เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} จากการศึกษาเปรียบเทียบกับแหล่งน้ำอื่นๆและงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 4-4 พบว่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำจาก Cazue Lake, แม่น้ำ Miyan, ทะเลสาบ Weishan และทะเลสาบ Hongze ที่มีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} เท่ากับ 25, 27, 19 และ 16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Lee *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2014) และค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} ในน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอุตะแกมจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำจากแม่น้ำ Marne, แม่น้ำ Seine, Myrtle Beach, แม่น้ำ Huangpu และแม่น้ำ Ulu Pontian ที่มีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{TPI} เท่ากับ 22, 15, 19, 19 และ 25 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (Lee *et al.*, 2004; Pernet-Courier *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2014; Zularisam *et al.*, 2007)

ส่วนค่ามวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (DOC_{HPO}) จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 น้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่า DOC_{HPO} เฉลี่ยเท่ากับ 1.0 และ 1.2 mg/L ตามลำดับ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดาบริเวณต้นน้ำ จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลาบริเวณกลางน้ำ และจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่บริเวณท้ายน้ำ มีค่า DOC_{HPO} เฉลี่ยเท่ากับ 1.1, 1.5 และ 1.5 mg/L ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำดิบประปาคลองอุตะแกมมีค่า DOC_{HPO} สูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำ คิดเป็นร้อยละ 21 และน้ำดิบประปาคลองอุตะแกมมีค่า DOC_{HPO} มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจากต้นน้ำไปยังท้ายน้ำ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นหลังจากบริเวณต้นน้ำไปยังบริเวณกลางน้ำ และยังคงปนเปื้อนไปยังบริเวณท้ายน้ำ เมื่อพิจารณาสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและอ่างเก็บน้ำคลองหลาพบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยเป็น 42 และ 45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา พะตง-พังลา และหาดใหญ่ มีสัดส่วนของ DOC_{HPO} โดยเฉลี่ยเป็น 48, 48 และ 49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากค่าเปอร์เซ็นต์ สัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} ข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำดิบประปาคลองอุตะแกมมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำสูงกว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำ สารอินทรีย์ที่ถูกทิ้งลงสู่คลองอุตะแกมมีลักษณะไม่ชอบน้ำในปริมาณที่สูงกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} จากการศึกษาเปรียบเทียบกับแหล่งน้ำอื่นๆและงานวิจัยที่ผ่านมาดังตารางที่ 4-4 พบว่า

สัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำจากทะเลสาบ Cazau, อ่างเก็บน้ำ La Bultiere, อ่างเก็บน้ำ Miyun , ทะเลสาบ Weishan ซึ่งมีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} เท่ากับ 39, 44, 38 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Lee *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2014) และค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} ในน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอุตะเภาจากการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำจากแม่น้ำ Marne, แม่น้ำ Yffiniac และ Myrtle Beach ที่มีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของ DOC_{HPO} เท่ากับ 50, 48 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Lee *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2010)

ตารางที่ 4-4 การกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI TPI และ HPO ในน้ำดิบจากแหล่งน้ำในประเทศไทยและต่างประเทศ

แหล่งน้ำดิบ	DOC (mg/L)	เปอร์เซ็นต์สัดส่วน(%)			แหล่งที่มา
		HPI	HPO	TPI	
Cazau Lake	5.0	35	39	25	Lee et al. (2004)
Bultiere Reservoir	6.9	31	44	26	Lee et al. (2004)
Miyun Reservoir	3.0	35	38	27	Li et al. (2014)
Weishan Lake	8.5	39	42	19	Li et al. (2014)
Hongze Lake	5.5	27	56	16	Li et al. (2014)
Yffiniac River	8.4	25	50	25	Lee et al. (2004)
Marne River	2.7	28	50	22	Lee et al. (2004)
Marne River	2.0	35	42	23	Pernet-Courier et al. (2011)
Seine River	4.1	23	62	15	Pernet-Courier et al. (2011)
Myrtle Beach	5.6	26	55	19	Hu et al. (2010)
Huangpu River	4.3	39	42	19	Lin et al. (2014)
Ulu Pontian River	6.7	38	35	25	Zularisam et al. (2007)
U-Tapao canal (rainy)	5.1	31	42	27	Srimuang (2011)
U-Tapao canal (summer)	5.5	33	44	23	Srimuang (2011)

หมายเหตุ: HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction

จากการพิจารณาการกระจายมวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ ในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและจุดสูบน้ำดิบประปาในการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งสองครั้ง ดังตารางที่ 4-3 พบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำโดยเฉลี่ยเป็น 35 23 และ 44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนสารอินทรีย์ข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมา

คือสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกึ่งชอบน้ำ ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Musikavong *et al.* (2015) ซึ่งพบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำลุ่มน้ำคลองอุตะเถาประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเป็นหลัก โดยมีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 29 23 และ 53 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษาของ Martin-Mousset *et al.* (1997); Mash *et al.* (2004) และ Velasco *et al.* (2007) พบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำสูงกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ โดยมีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำประมาณ 50-65 เปอร์เซ็นต์ และ Sharp *et al.* (2006) พบว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำประมาณ 53-76 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาการกระจายมวลสารอินทรีย์ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาคลองอุตะเถาพบว่ามีส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำโดยเฉลี่ย 32 20 และ 48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งจากค่าเปอร์เซ็นต์ข้างต้นกล่าวได้น้ำดิบประปาคลองอุตะเถามีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกึ่งชอบน้ำตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Srimuang (2011) ที่พบว่าน้ำดิบคลองอุตะเถามีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำมากที่สุด รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกึ่งชอบน้ำตามลำดับ โดยมีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 32 26 และ 43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้การศึกษาของ Musikavong *et al.* (2015) พบว่าน้ำดิบจากคลองอุตะเถาประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเป็นหลัก โดยมีค่าสัดส่วนการกระจายมวลของสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 32 23 และ 45 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากผลการศึกษากล่าวได้ว่าการมีปริมาณสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำในปริมาณสูงมีความเป็นไปได้สูงที่จะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสารดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำถูกกำจัดได้ดีโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Musikavong *et al.*, 2013)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษา DON ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ก่อให้เกิดสารไนโตรซามีน ดังนั้นนอกจากต้องพิจารณาการกระจายมวลของสารอินทรีย์จากค่า DOC แล้วจึงจำเป็นต้องพิจารณาจากค่า DON ด้วย แต่เนื่องจากค่า DON ไม่มีเครื่องมือหรือวิธีการที่สามารถใช้ตรวจวัดได้โดยตรง การวิเคราะห์ DON ต้องวิเคราะห์ค่าไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด ค่าแอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ แล้วคำนวณค่า DON จากผลต่างของค่าไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดกับค่าแอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ ในบางครั้งค่าผลรวมของค่าแอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ จากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าค่าไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถหาค่า DON ได้ งานวิจัยนี้จึงใช้ชุดเมมเบรน NF 270 dead-end filtration ในการบำบัดเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารไนโตรเจนอินทรีย์ออกจากน้ำ แล้วนำน้ำส่วนที่ไม่ถูกกรองผ่านเมมเบรน (retentate) ไปวิเคราะห์ค่าผลต่างของค่าไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมดกับค่าแอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ เพื่อหาค่า DON เมื่อนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation มาทำการกรองด้วยชุดเมมเบรนพบว่าน้ำตัวอย่างกลุ่ม HPO และ

TPI สามารถกรองด้วยชุดเมมเบรนได้และเมื่อนำน้ำส่วน retentate มาวิเคราะห์ค่าแอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์พบว่าสามารถวิเคราะห์ค่าดังกล่าวได้ แต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ค่า TDN พบว่ามีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดของเครื่องมือ (limit of quantitation, LOQ) ที่มีค่าเท่ากับ 0.12 mg-N/L ซึ่งกรณีดังกล่าวอาจเกิดเนื่องจากค่า TDN ในน้ำก่อนนำมาผ่านกระบวนการ resin fractionation มีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง ตรวจไม่พบ- 3.9 mg-N/L ซึ่งเมื่อนำมาแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่มโดยกระบวนการ resin fractionation ทำให้ค่า TDN ของสารอินทรีย์แต่ละกลุ่มมีค่าต่ำ จากการที่สารอินทรีย์บางส่วนถูกดูดติดอยู่กับเรซินและทำการชะออกมาไม่หมดจึงทำให้ค่า TDN ของน้ำที่ผ่านกระบวนการแฟร็กชันมีค่าต่ำมากในระดับที่เครื่องมือไม่สามารถตรวจวัดได้ ส่วนน้ำตัวอย่างกลุ่ม HPI ไม่สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้ ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าเมมเบรนชนิด NF270 เป็นเมมเบรนที่มีประจุของชั้นผิวเป็นลบในสถานะที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงเป็นกลางถึงเป็นด่าง (Beyer *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2010) เมื่อนำน้ำส่วน HPI ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 7 มากรองด้วยชุดเมมเบรนจึงทำให้ชั้นผิวของเมมเบรนมีลักษณะเป็นประจุลบ สารอินทรีย์กลุ่ม HPI ซึ่งหมายถึงสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ สารอินทรีย์ดังกล่าวมีลักษณะโมเลกุลที่มีความเป็นขั้ว ทำให้สามารถละลายน้ำได้ดี จากคุณสมบัติความเป็นขั้วของสารอินทรีย์กลุ่ม HPI จึงอาจส่งผลให้ขั้วของสารอินทรีย์ส่วนที่เป็นบวกเกิดการดูดติดกับผิวของเมมเบรนที่มีประจุเป็นลบ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตัน (fouling) ที่ผิวของ เมมเบรน นอกจากนี้ตัวอย่างกลุ่ม HPI มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 จำเป็นต้องปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7 ก่อนนำมาวิเคราะห์ ซึ่งการปรับพีเอชดังกล่าวต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง ดังนั้นจากการแตกตัวของ NaOH ในน้ำอาจทำให้อนุภาคของโซเดียม (Na⁺) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุบวกเกิดการดูดติดที่ผิวของเมมเบรนซึ่งมีสภาพพื้นผิวเป็นประจุลบ เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เมมเบรนเกิดการอุดตันได้เช่นกัน จึงทำให้ไม่สามารถกรองน้ำตัวอย่างกลุ่ม HPI ผ่านเมมเบรนได้ จากสาเหตุดังกล่าวข้างต้นส่งผลให้ไม่สามารถหาค่า DON ของน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องพิจารณาการกระจายมวลของสารอินทรีย์จากค่า DOC เพียงอย่างเดียว

4.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาขนาดใหญ่

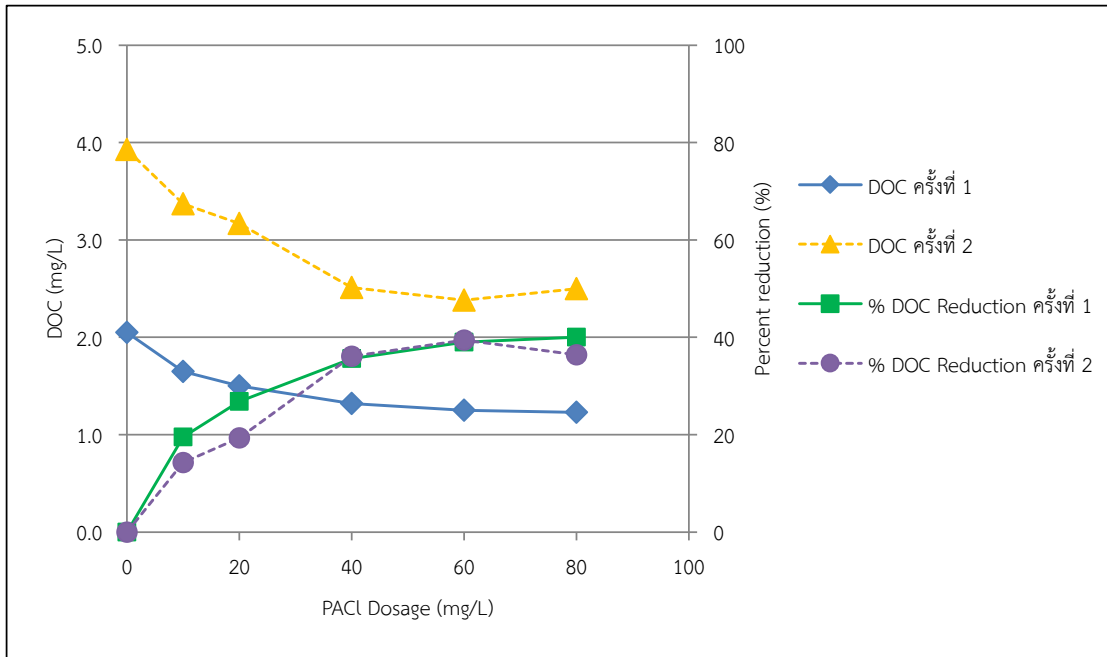
4.2.1 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

การลด DOC, UV-254 และ DON

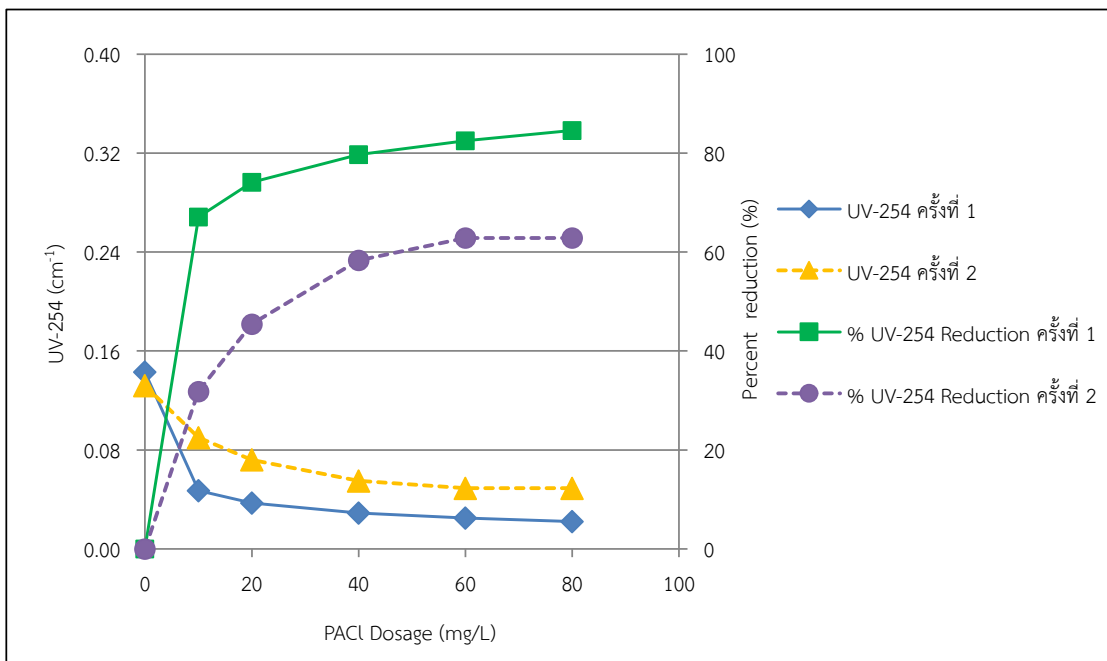
กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) สามารถกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดี เนื่องจากโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มีองค์ประกอบของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้เกิดกลไกในการทำละลายประจุของคอลลอยด์ให้เป็นกลางทางไฟฟ้า (charge-neutralization) และการห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก (sweep-flocculation) ทำให้คอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพ (destabilization) (Wu *et al.*, 2007) อนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดการรวมตัวกันหลายๆ อนุภาคจนกลายเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ (forming) ตกตะกอนได้ง่าย ความขุ่นและสารอินทรีย์บางส่วนจึงถูกกำจัดไปพร้อมกับการตกตะกอน นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นของสารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์และการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้อีกด้วย

ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันให้เท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-1 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl ส่งผลให้ค่า DOC มีค่าลดลง โดยที่ความเข้มข้นของ PACl 40 mg/L ลดค่า DOC ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 2.1 mg/L ให้ลดลงเหลือ 1.3 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DOC ที่ลดลงได้เท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 2 ที่สภาวะเดียวกันลดค่า DOC จากค่าเริ่มต้น 3.9 mg/L ให้ลดลงเหลือ 2.5 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DOC ที่ลดลงได้เท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์

ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ UV-254 ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันให้เท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl ส่งผลให้ค่า UV-254 มีค่าลดลง โดยที่ความเข้มข้นของ PACl 40 mg/L ลดค่า UV-254 ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 0.143 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 0.029 cm^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ UV-254 ที่ลดลงได้เท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ที่สภาวะเดียวกันสามารถลดค่า UV-254 จากค่าเริ่มต้น 0.132 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 0.055 cm^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ UV-254 ที่ลดลงได้เท่ากับ 58 เปอร์เซ็นต์ การลดลงของค่า UV-254 ซึ่งเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติก มีค่าสูงกว่าค่าการลดลงของค่า DOC ซึ่งเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกและอะลิฟาติก

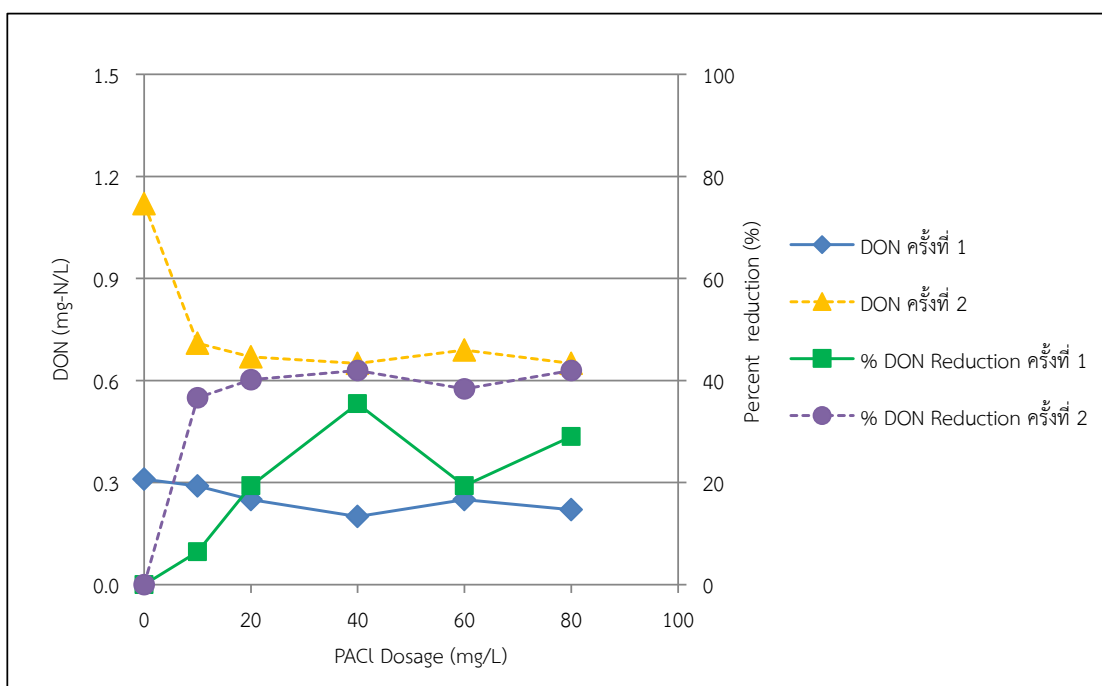


รูปที่ 4-1 ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DOC reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACL ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2



รูปที่ 4-2 ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ UV-254 reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACL ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2

ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ DON ในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย PACl ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันให้เท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-3 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PACl ส่งผลให้ค่า DON มีค่าลดลงโดยที่ความเข้มข้นของ PACl 40 mg/L ลดค่า DON ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 0.31 mg-N/L ให้ลดลงเหลือ 0.20 mg-N/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DON ที่ลดลงได้เท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ที่สภาวะเดียวกันสามารถลดค่า DON จากค่าเริ่มต้น 1.12 mg-N/L ให้ลดลงเหลือ 0.65 mg-N/L คิดเป็น เปอร์เซ็นต์ DON ที่ลดลงได้เท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์ การลดลงของค่า DON มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าการลดลงของค่า DOC อาจกล่าวได้ว่าสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็งกลุ่มที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็งกลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบถูกกำจัดออกจากน้ำได้ในปริมาณใกล้เคียงกันโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน



รูปที่ 4-3 ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DON reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2

จากการทดลองพบว่าการใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการลดค่า DOC UV-254 และ DON ของน้ำดิบจากการเก็บตัวอย่างทั้งสองครั้ง นอกจากนี้ค่าพีเอช 7 มีค่าใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.3 ทำให้ไม่สิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอชมากนัก สอดคล้องกับการทดลองของ Srimuang (2011) ที่พบว่า

การใช้ PACl ที่ระดับความเข้มข้น 40 mg/L ควบคุมค่า พีเอชเท่ากับ 7 เป็นสถานะที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชันน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในฤดูฝนและฤดูร้อน

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัด DOC กับ UV-254 จากการทดลองนี้กล่าวได้ว่าการลดค่า UV-254 มีค่าสูงกว่าการกำจัด DOC เนื่องจากค่า UV-254 เป็นดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างเป็นอะโรมาติก มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสง UV-254 ได้ดี (Janhom *et al.*, 2004; Yan *et al.*, 2008; Yan *et al.*, 2009) ด้วยลักษณะเฉพาะของสารดังกล่าวทำให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายและถูกกำจัดได้ดีด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Marhaba and Pipada, 2000; Marhaba and Van, 2000; Nissinen *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2006; Ji *et al.*, 2008) ในขณะที่ค่า DOC บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งรวมถึงโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก (non-humic) และยังมีโมเลกุลของน้ำหอม หุ้ม จึงเป็นเสมือนสิ่งขัดขวางป้องกันไม่ให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน (AWWA, 1993; Julie *et al.*, 2004; มั่นสิน ตันทุลเวศม์, 2542) สารอินทรีย์ดังกล่าวจึงถูกกำจัดได้ยากด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด DOC มีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพการกำจัด UV-254 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl เพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยเฉพาะกลุ่ม non-humic ออกจากน้ำได้อย่างเพียงพอ การใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวจะไม่ให้ผลดีเนื่องจากน้ำมีเป่าสัมผัสน้อยเกินไปอนุภาคต่างๆ จึงเข้าใกล้และจับตัวกันได้น้อย จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชัน โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงในการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชัน

4.2.2 การลดสารอินทรีย์ละลายน้ำโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)

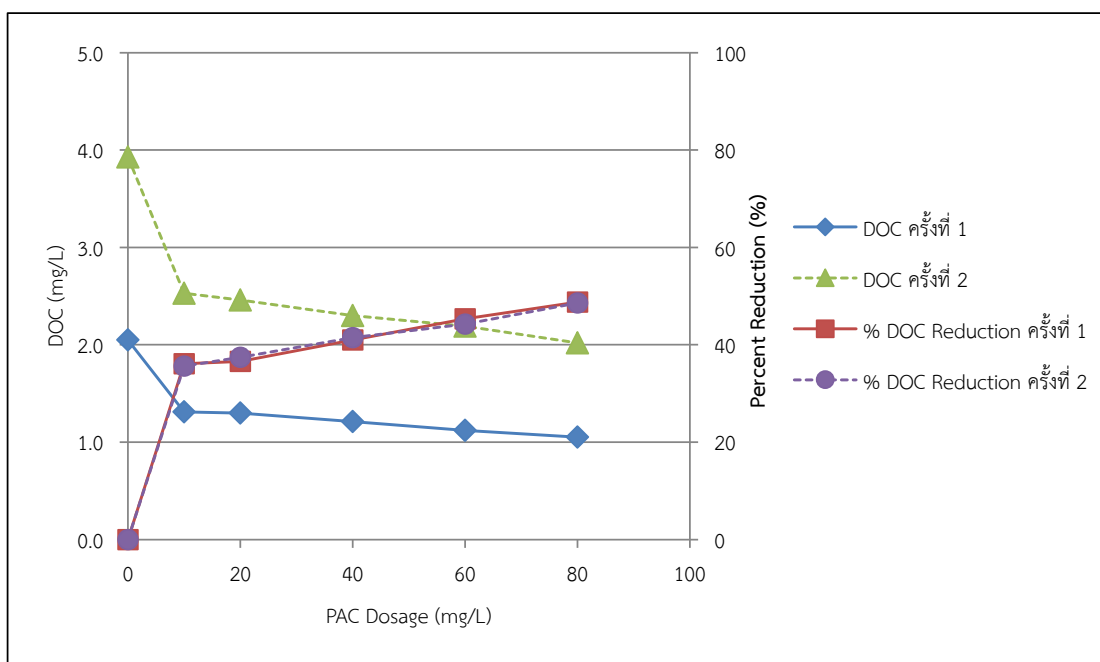
การลด DOC, UV-254 และ DON

ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วย PAC ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันเท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-4 การใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L สามารถลดค่า DOC ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 2.1 mg/L ให้เหลือ 1.12 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DOC ที่ลดลงได้เท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ที่สภาวะเดียวกัน ลดค่า DOC จากค่าเริ่มต้น 3.9 mg/L ให้ลดลงเหลือ 2.2 mg/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DOC ที่ลดลงได้เท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์

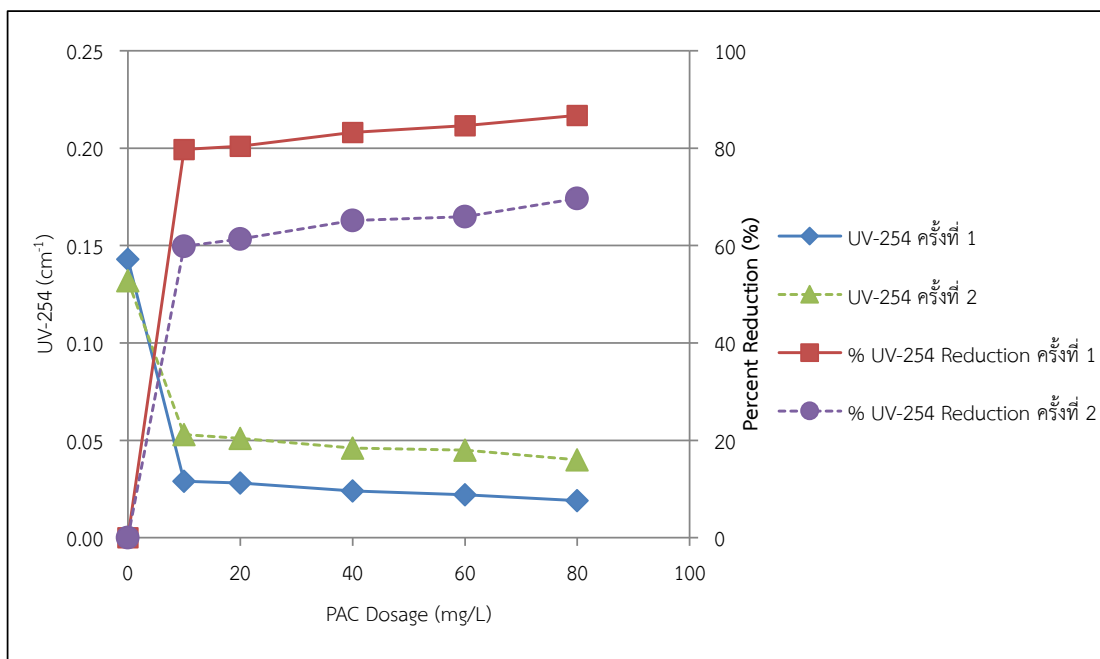
ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ UV-254 ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วย PAC ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันเท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บ

ตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-5 การใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L ลดค่า UV-254 ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 0.143 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 0.022 cm^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ UV-254 ที่ลดลงได้เท่ากับ 85 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ลดค่า UV-254 จากค่าเริ่มต้น 0.132 cm^{-1} ให้ลดลงเหลือ 0.045 cm^{-1} คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ UV-254 ที่ลดลงได้เท่ากับ 66 เปอร์เซ็นต์

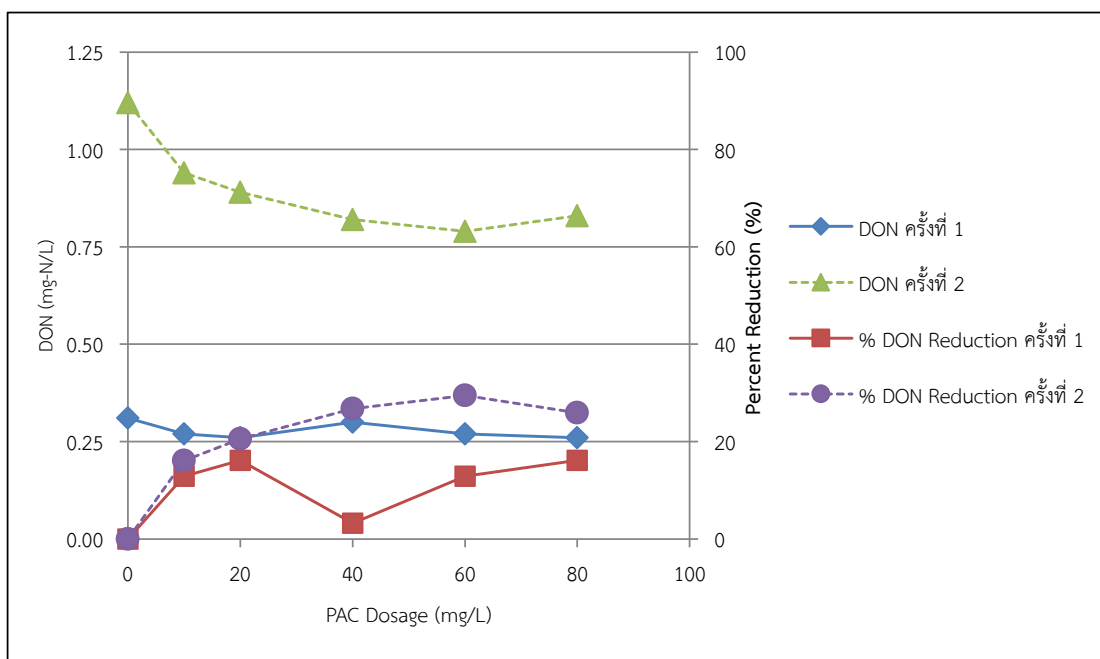
ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์การลดลงของ DON ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วย PAC ที่สภาวะควบคุมค่าพีเอชระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชันเท่ากับ 7 ของน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ในการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4-6 การใช้ PACl ที่ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L สามารถลดค่า DON ในน้ำดิบของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 จากค่าเริ่มต้น 0.31 mg-N/L ให้เหลือ 0.27 mg-N/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DON ที่ลดลงได้เท่ากับ 13 เปอร์เซ็นต์ ครั้งที่ 2 ที่สภาวะเดียวกันสามารถลดค่า DON จากค่าเริ่มต้น 1.12 mg-N/L ให้ลดลงเหลือ 0.79 mg-N/L คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ DON ที่ลดลงได้เท่ากับ 29 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4-4 ค่า DOC คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DOC reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2



รูปที่ 4-5 ค่า UV-254 คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ UV-254 reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PAC ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2



รูปที่ 4-6 ค่า DON คงเหลือและเปอร์เซ็นต์ DON reduction ในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PAC ความเข้มข้น 40 mg/L ร่วมกับ PAC ที่พีเอชเท่ากับ 7 ของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่สภาวะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และ PACl ร่วมกับ PAC แสดงดังตารางที่ 4-5 จากข้อมูลดังตารางสามารถสรุปได้ว่าการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้ดี สามารถกำจัดค่า DOC, UV-254, SUVA และ DON ได้เฉลี่ย 37, 70, 58 และ 40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าการใช้ PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC และ DON ได้ดีกว่าการโคแอกกูเลชันด้วย Alum และ *M. oleifera* (สารสกัดเมล็ดมะรุม) จากงานวิจัยของ Pramanik *et al.* (2015) ที่พบว่า การโคแอกกูเลชันน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำด้วย Alum และ *M. oleifera* (สารสกัดเมล็ดมะรุม) สามารถลดค่า DOC ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 5.8 mg/L ให้เหลือ 4.3 และ 4.5 mg/L ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการลด DOC คิดเป็น 27 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดค่า DON ในน้ำดิบจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0.92 mg/L ให้เหลือ 0.78 และ 0.84 mg/L ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการลด DON คิดเป็น 15 และ 9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับกระบวนการดูดติดด้วย PAC 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 พบว่าสามารถกำจัดค่า DOC UV-254 และ SUVA ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 6, 5 และ 2 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว เนื่องจาก PAC เป็นสารดูดติดผิวสามารถดูดติดผิวโมเลกุลหรืออนุภาคสารอินทรีย์จำนวนมากมาเกาะติดที่ผิวคาร์บอน โดยเฉพาะสารอินทรีย์กลุ่ม non-humic ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ มักสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี (Jacangelo *et al.*, 1995; Uyak *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008) ดังนั้นสารอินทรีย์จึงถูกกำจัดไปพร้อมกับการตกตะกอนได้ในปริมาณมากขึ้น

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดค่า DOC และ DON ของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับการศึกษาของ Kumsuvan (2013) ที่พบว่า การใช้ PACl 80 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 กำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนได้ 42 และ 41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การใช้ PACl 150 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเลนได้ 38 และ 52 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันโดยการใช้ PACl 80 mg/L ร่วมกับ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนได้ 77 และ 68 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และ การใช้ PACl 150 mg/L ร่วมกับ PAC 10 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเลนได้ 88 และ 70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลจากกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และทำการดูดติดด้วย PAC พบว่า การใช้ PACl 80 mg/L และ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเขนได้ 79 และ 54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ การใช้ PACl 150 mg/L และ PAC 20 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาบางเลนได้ 87 และ 69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการใช้ PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC และ DON ในน้ำดิบประปาขนาดใหญ่และน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนได้ใกล้เคียงกัน แต่การใช้ PACl ร่วมกับ PAC รุ่น HRO M325-60 ซึ่งเป็น PAC ชนิด

เดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถกำจัดค่า DON ในน้ำดิบประปาบางเขนและบางเลนได้ดีกว่าน้ำดิบประปาหาดใหญ่

จากข้างต้นกล่าวได้ว่าค่า DON เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำซึ่งประกอบด้วย amino acids, proteins, amino sugars, amides, nitriles, pyrroles, purines และ pyrimidines เป็นต้น น้ำในแหล่งน้ำแต่ละแห่งอาจมีกลุ่มสารดังกล่าวที่แตกต่างกันเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่ต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและแหล่งกำเนิดของสารมลพิษที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ การใช้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดติดสารแต่ละชนิดได้มากน้อยต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของ PAC จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON มีความแตกต่างกัน และเนื่องจากงานวิจัยนี้รวมถึงงานวิจัยของ Kumsuvan (2013) ไม่ได้ทำการจำแนกลักษณะและตรวจวัดปริมาณสารกลุ่ม DON แต่ละชนิดในน้ำดิบและน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุได้ว่า PAC รุ่น HRO M325-60 สามารถกำจัดสารในกลุ่ม DON ชนิดใดได้ดีที่สุด

ผลการใช้ PACI ร่วมกับ PAC ของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON ได้เพียง 26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการใช้ PACI อย่างเดียวประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ย สาเหตุของกรณีดังกล่าวส่วนหนึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และอาจเกิดจากการเติม PAC ในระหว่างกระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากในขั้นตอนการทดลองทำการเติม PACI แล้วทำการกวนจนกระทั่งอนุภาครวมตัวกันเป็น floc แล้วจึงเติม PAC ลงไป ซึ่ง PAC ที่เติมไปในขั้นตอนดังกล่าวอาจมีผลต่อกลไกในการกำจัด DON ของ PACI จึงทำให้ PACI กำจัด DON ได้ไม่ดีนัก นอกจากนี้คุณสมบัติการดูดติดของ PAC รุ่น HRO M325-60 อาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด DON เช่นกัน เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดค่า DOC และ DON จากงานวิจัยของ Kumsuvan (2013) ที่พบว่าการใช้ PACI ร่วมกับ PAC และการโคแอกกูเลชันด้วย PACI แล้วทำการดูดติดด้วย PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC สูงกว่า DON จึงกล่าวได้ว่า PAC รุ่น HRO M325-60 สามารถดูดติดสารอินทรีย์คาร์บอนได้ดีกว่าสารอินทรีย์ไนโตรเจน ดังนั้นจากคุณสมบัติการดูดติดของ PAC รุ่น HRO M325-60 ข้างต้น รวมถึงชนิดของสารกลุ่ม DON ที่ปนเปื้อนในน้ำดิบประปาหาดใหญ่ซึ่ง PAC ดังกล่าวอาจดูดติดได้ไม่ดี จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การใช้ PACI ร่วมกับ PAC รุ่น HRO M325-60 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DON ในน้ำดิบประปาหาดใหญ่มีค่าค่อนข้างต่ำ

งานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการโคแอกกูเลชันน้ำดิบประปาหาดใหญ่ด้วย PACI มีประสิทธิภาพในการกำจัด DON ได้ดีกว่าการใช้ PACI ร่วมกับ PAC รุ่น HRO M325-60 และการใช้ PAC รุ่น HRO M325-60 ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการโคแอกกูเลชันโดยการเติมร่วมกับ PACI เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำในน้ำดิบประปาหาดใหญ่

ตารางที่ 4-5 ค่า DOC, UV-254, SUVA, DON และประสิทธิภาพในการกำจัด

สภาวะ	DOC (mg/L)			Inc. red.* (%)	UV-254 (cm ⁻¹)			Inc. red.* (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
น้ำดิบ	2.1	3.9	3.0	N.A.	0.143	0.132	0.138	N.A.
PACl 40 mg/L	1.3 (36)	2.5 (36)	1.9 (37)	N.A.	0.029 (80)	0.055 (58)	0.042 (70)	N.A.
PACl 40 mg/L + PAC 60 mg/L	1.1 (45)	2.2 (44)	1.7 (43)	6	0.022 (85)	0.045 (66)	0.034 (75)	5

สภาวะ	SUVA (L/mg m)			Inc. red.* (%)	DON (mg-N/L)			Inc. red.* (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย	
น้ำดิบ	7.0	3.4	5.2	N.A.	0.31	1.12	0.72	N.A.
PACl 40 mg/L	2.2 (69)	2.2 (36)	2.2 (58)	N.A.	0.20 (35)	0.65 (42)	0.43 (40)	N.A.
PACl 40 mg/L + PAC 60 mg/L	2.0 (72)	2.1 (40)	2.1 (60)	2	0.27 (13)	0.79 (29)	0.53 (26)	N.A.

หมายเหตุ: *Inc.red. = Increase reduction หมายถึง ประสิทธิภาพการกำจัดที่เพิ่มขึ้น
() หมายถึง ประสิทธิภาพการกำจัด, N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้)

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC (ตารางที่ ค-1) พบว่าน้ำมีความขุ่นสูงกว่าน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl เพียงอย่างเดียวเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาคของ PAC บางส่วนที่ตกตะกอนได้ไม่หมดเหลือตกค้างอยู่ในน้ำ อย่างไรก็ตามค่าความขุ่นคงเหลือในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันจากทั้งสองสภาวะมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากมีการกำหนดค่าความขุ่นในน้ำประปาควรมีค่าไม่เกิน 5 NTU (การประปาส่วนภูมิภาค, 2550) และเมื่อพิจารณาค่าสารอนินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved inorganic nitrogen, DIN) ได้แก่ค่า แอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ ของน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันทั้งสองสภาวะ (ตารางที่ ค-2) พบว่าการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC สามารถกำจัดค่า DIN ได้ดีกว่าการใช้ PACl อย่างเดียว จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการใช้ PAC สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด DIN แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นในน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ กรณีที่มีการนำ PAC ดังสภาวะที่ได้จากงานวิจัยนี้มาใช้งานจริงในระบบประปาขนาดใหญ่ พบว่าระบบประปาจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูง เนื่องจาก PAC รุ่น HRO M325-60 ราคาประมาณกิโลกรัมละ 50 บาท ระบบประปาขนาดใหญ่ซึ่งมีกำลังในการผลิต 194,400 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ใช้ PAC ความเข้มข้น 60 mg/L จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการซื้อ PAC สูงถึงประมาณ 583,200 บาทต่อวัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัด DOC DON DIN ค่าความขุ่น และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของการใช้ PAC สรุปได้ว่า PAC รุ่น HRO M325-60 ไม่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้กำจัดความขุ่นและ DON แต่เหมาะสมสำหรับการกำจัด DOC และ DIN ระบบผลิตน้ำประปาขนาดใหญ่ควร

เลือกใช้ในช่วงที่น้ำดิบมีค่า DOC และ DIN สูงเท่านั้น อย่างไรก็ตามในอนาคตอาจมีการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันด้วยถ่านกัมมันต์รุ่นอื่น หรือสารชนิดอื่นที่มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการกำจัด DOC DON และ DIN ได้ดีกว่า PAC รุ่น HRO M325-60 เพื่อหาสารเพิ่มประสิทธิภาพที่ลดโอกาสในการก่อตัวของสารก่อมะเร็งกลุ่ม C-DBPs และ N-DBPs ในน้ำประปาได้ดียิ่งขึ้น

4.2.3 การแยกกลุ่มของสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ประสิทธิภาพของกระบวนการ resin fractionation และการกระจายมวลของสารอินทรีย์ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

เปอร์เซ็นต์ผลต่างระหว่างมวล DOC ของน้ำก่อนกระบวนการ resin fractionation กับผลรวมมวล DOC ของน้ำหลังกระบวนการ resin fractionation เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ resin fractionation จากตารางที่ 4-6 พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L และ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 มีค่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวล DOC อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เท่ากับ 6.7 และ 4.3 ตามลำดับ ส่วนน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L และ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวล DOC สูงกว่าค่าโดยทั่วไปโดยมีค่าเป็น 20 และ 31.3 ตามลำดับ เนื่องจากมีการรายงานถึงเปอร์เซ็นต์ผลต่างของ DOC จากการแยกโดยกระบวนการ resin fractionation มีค่าอยู่ในช่วง 8-12 เปอร์เซ็นต์ (Croue *et al.*, 1993) เช่นเดียวกับ Marhaba (2000) รายงานค่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของ DOC จากกระบวนการ resin fractionation ที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ 10-15 เปอร์เซ็นต์ จากข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำหลังจากกระบวนการโคแอกกูเลชันมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ โดยมีค่า DOC ต่ำกว่า 2.0 mg/L เมื่อนำตัวอย่างน้ำดังกล่าวมาแยกสารอินทรีย์ออกเป็น 3 กลุ่มส่งผลต่อการการดูดติดสารอินทรีย์ของเรซินรวมถึงเกิดความคลาดเคลื่อนจากการวิเคราะห์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้จึงส่งผลให้ค่าผลรวมมวล DOC ของน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation มีค่าสูงกว่าน้ำก่อนกระบวนการ resin fractionation

เมื่อพิจารณาการกระจายมวล DOC พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L มีสัดส่วนสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 31 25 และ 44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L มีสัดส่วนสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 28 29 และ 44 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และ PACl ร่วมกับ PAC จากการศึกษาครั้งนี้มีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ และกึ่งชอบน้ำ ตามลำดับ ยกเว้นน้ำจากการโคแอกกูเลชันด้วย PACl ร่วมกับ PAC ของการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 ที่มีสัดส่วนของกลุ่มสารอินทรีย์เรียงจากมากไปน้อยคือสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ กึ่งชอบน้ำ และชอบน้ำ ตามลำดับ ผลจาก

การศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Srimuang (2011) ที่พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl และ PACl ร่วมกับ PAC ของน้ำจากกลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกษามีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำสูงที่สุด

ตารางที่ 4-6 เปอร์เซนต์ความต่างและการกระจายมวลของ DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตัวอย่างน้ำ	กลุ่มสารอินทรีย์					
	HPI	TPI	HPO	HPI+TPI+HPO	Total	%Diff
PACl 40 mg/L (ครั้งที่ 1)	0.6 (30)	0.5 (25)	0.9 (45)	2.0	1.6	20.0
PACl 40 mg/L (ครั้งที่ 2)	0.9 (32)	0.7 (25)	1.2 (43)	2.8	3.0	6.7
PACl40mg/L+PAC60 mg/L (ครั้งที่ 1)	0.4 (25)	0.5 (32)	0.7 (43)	1.6	1.1	31.3
PACl40mg/L+PAC60 mg/L (ครั้งที่ 2)	0.7 (30)	0.6 (26)	1.0 (44)	2.3	2.2	4.3

หมายเหตุ: HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, Total หมายถึง DOC ก่อน fraction, %Diff = (Total-(HPI+TPI+HPO))*100/Total, () หมายถึง เปอร์เซนต์การกระจายมวล

การลดลงของค่า DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC ของกลุ่มสารอินทรีย์ ดังตารางที่ 4-7 และตารางที่ 4-8 พบว่าจากการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 การใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ ได้มากที่สุดเท่ากับ 31 เปอร์เซนต์ กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำได้ 25 เปอร์เซนต์ และไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำได้ เมื่อใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 พบว่ากำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำได้มากที่สุดเท่ากับ 50 เปอร์เซนต์ กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำได้ 46 เปอร์เซนต์และไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นจากการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว 25 และ 15 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2 พบว่าการใช้ PACl 40 mg/L กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำและกลุ่มชอบน้ำได้เท่ากันคือ 25 เปอร์เซนต์ และไม่สามารถหาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำได้เนื่องจากค่ามวล DOC ของสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันมีค่าสูงกว่าค่ามวล DOC ของน้ำดิบเล็กน้อย ส่วนการใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำได้ดีที่สุดเท่ากับ 42 เปอร์เซนต์ กำจัดสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำได้ 38 เปอร์เซนต์ และไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำได้ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกลุ่มไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้นจากการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว 17 และ 13 เปอร์เซนต์ตามลำดับ

จากผลการศึกษาค้นคว้าได้ว่าการใช้ PACl 40 mg/L สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำได้ดีกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำเล็กน้อย เนื่องจากสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกและมีมวลโมเลกุลสูงกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ การโคแอกกูเลชันจึงแยกสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำออกจากน้ำได้ง่ายกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ ซึ่งมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอนุภาคไว้เป็นเสมือนสิ่งกีดขวางไม่ให้อนุภาครวมตัวกัน อนุภาคจึงถูกกำจัดไปพร้อมกับการตกตะกอนได้น้อย (AWWA, 1993; Julie *et al.*, 2004; มั่นสิน ตันทุลเวศม์, 2542) เมื่อใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกลุ่มไม่ชอบน้ำได้สูงขึ้น โดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำได้ดีกว่าสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำเป็นสารอินทรีย์กลุ่ม non-humic ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต โปรตีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำและกรดอะมิโน Polysaccharides; low MW alkyl alcohols, aldehydes and ketones ซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติก มีมวลโมเลกุลต่ำ มักเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี (Jacangelo *et al.*, 1995; Uyak *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008) สารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำจึงถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้นโดยการถูกดูดติดและตกตะกอนไปพร้อมกัน อนุภาคของ PAC อย่างไรก็ตามแม้ว่าสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำจะถูกกำจัดได้โดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน แต่น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันยังคงมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำดิบมีสัดส่วนของสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำมากกว่าสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและกลุ่มกึ่งชอบน้ำ จึงส่งผลให้สารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำยังคงเป็นสารอินทรีย์กลุ่มหลักในน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพการกำจัด DOC ในน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สภาวะ	ประสิทธิภาพการกำจัด DOC (%)		
	HPI	TPI	HPO
PACl 40 mg/L (ครั้งที่ 1)	25	0	31
PACl 40 mg/L (ครั้งที่ 2)	25	N.A.	25
PACl 40 mg/L + PAC 60 mg/L (ครั้งที่ 1)	50 (25)	0 (N.A.)	46 (15)
PACl 40 mg/L + PAC 60 mg/L (ครั้งที่ 2)	42 (17)	0 (N.A.)	38 (13)

หมายเหตุ: HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), () หมายถึง ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ PACl อย่างเดียว

4.3 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines ปริมาณสาร *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) และโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP)

4.3.1 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines และปริมาณสาร NDMA ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

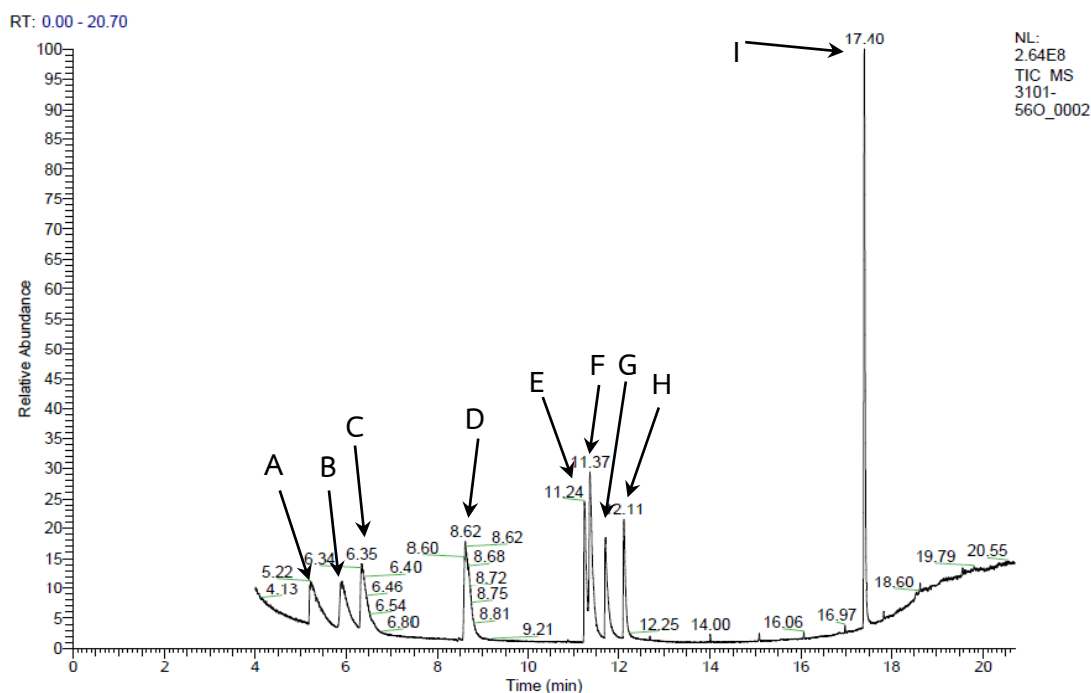
การวิเคราะห์เพื่อยืนยันตำแหน่งของสาร Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) โดยส่งตัวอย่างสารมาตรฐาน Nitrosamines ผสม 9 ชนิด ความเข้มข้น 10 mg/L ไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ กำหนดสภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS สำหรับการวิเคราะห์สารกลุ่ม Nitrosamines 9 ชนิดและสาร NDMA

Gas Chromatograph		Mass Spectrometer	
Manufacture name/model :	Trace GC Ultra/ISQ MS, Thermo Scientific: GC-ISQMS	Ionization mode :	Electron Ionization
Inlet temperature :	250°C, Splitless 75 ml/min @ time 1.0 min	Acquisition mode :	Scan, 35-500 amu
Oven temperature :	Initial temperature 40°C Ramp to 110°C at 7 °C/min Ramp to 240°C at 15 °C/min, hold for 2 min	Ion source temp. :	240 °C
Solvent delay time :	4.0 min	Transferline temp. :	240 °C
Column :	TR-WaxMS, 30 m., film 0.25 µm, ID. 0.25 mm	Constant Flow :	1.0 ml/min
Detector temperature :	250°C		

ผลการวิเคราะห์สารมาตรฐาน Nitrosamines ปรากฏพีคของสารทั้ง 9 ชนิดแสดงดังโครมาโทแกรมในรูปที่ 4-7 โดยจากโครมาโทแกรมแสดงพีคของสาร 9 ชนิดได้แก่ *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethyl

amine (NDEA), *N*-nitrosodi-*n*-propylamine (NDPA), *N*-nitrosopiperidine (NPip), *N*-nitroso di-*n*-butylamine (NDBA), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPyr), *N*-nitrosomorpholine (NMor) และ *N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) ซึ่งมี retention time (RT) เท่ากับ 5.23, 5.91, 6.35, 8.61, 11.25, 11.36, 11.71, 12.12 และ 17.40 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4-7 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน Nitrosamines 9 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L วิเคราะห์โดยเครื่อง GC-MS

การวิเคราะห์ยืนยันสาร Nitrosamines 9 ชนิด ได้แก่ NDMA, NMEA, NDEA, NDPA, NPip, NDBA, NPyr, NMor และ NDPhA โดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Wiley โดยน้ำหนักมวลต่อประจุที่ใช้ยืนยันคือ 74, 88, 102, 130, 114, 158, 100, 116 และ 169 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-9 ส่วนการทดสอบเพื่อหาขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่อง GC-MS ในการตรวจวัดสาร Nitrosamines โดยวิเคราะห์สารมาตรฐาน Nitrosamines ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่เครื่อง GC-MS สามารถตรวจวัดได้มีค่าได้เท่ากับ 10 mg/L ซึ่งถือว่ามีความสูง เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมามีการตรวจพบสารกลุ่ม Nitrosamines ที่ปนเปื้อนในน้ำในระดับนาโนกรัมต่อลิตร (ng/L) ดังนั้นจึงต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อเลือกใช้เครื่อง GC ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสาร Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดในลำดับต่อไป

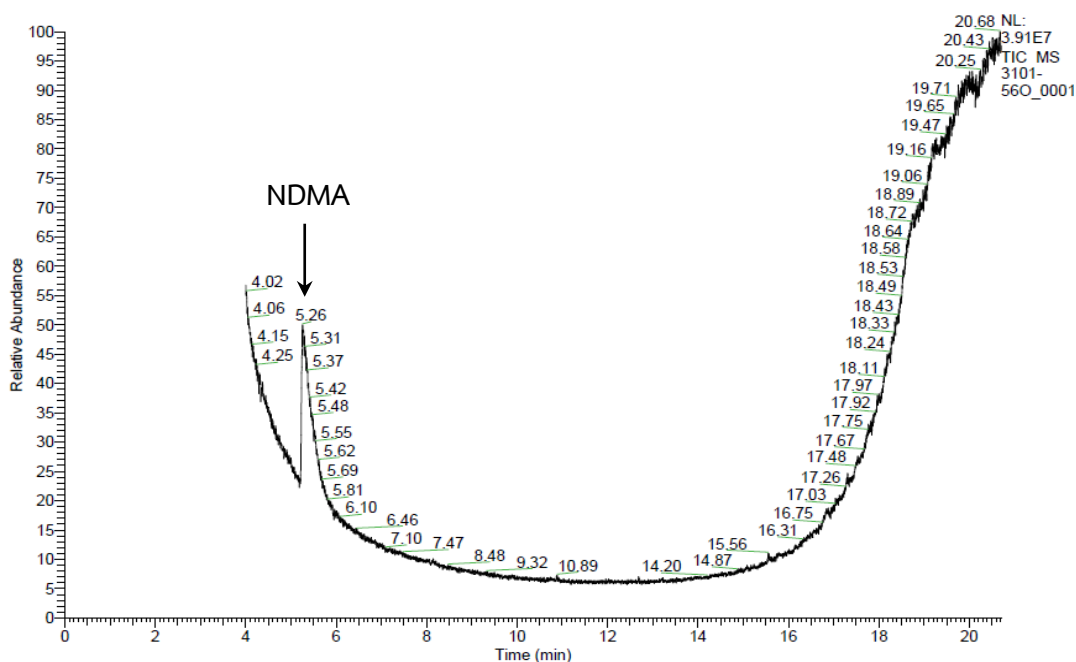
ตารางที่ 4-9 ค่าแมสสเปกตรัม (m/z) ของสารประกอบ Nitrosamines 9 ชนิด

RT (นาที)	พีค	สารประกอบ	ชื่อย่อ	m/z
5.23	A	N-nitrosodimethylamine	NDMA	74
5.91	B	N-nitrosomethylethylamine	NMEA	88
6.35	C	N-nitrosodiethylamine	NDEA	102
8.61	D	N-nitrosodi-n-propylamine	NDPA	130
11.25	E	N-nitrosopiperidine	NPip	114
11.36	F	N-nitrosodi-n-butylamine	NDBA	158
11.71	G	N-nitrosopyrrolidine	NPyr	100
12.12	H	N-nitrosomorpholine	NMor	116
17.40	I	N-nitrosodiphenylamine	NDPhA	169

อย่างไรก็ตาม จากรายงานการตรวจวัดสาร Nitrosamines ในแหล่งน้ำจากงานวิจัยที่ผ่านมา แม้ว่าสาร Nitrosamines ถูกตรวจวัดได้ในระดับนาโนกรัมต่อลิตรซึ่งเป็นระดับความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ แต่พบว่า NDMA เป็นสารที่ตรวจพบได้บ่อย (Nawrocki and Andrzejewski, 2011) และมีความเข้มข้นสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารชนิดอื่นๆในกลุ่ม Nitrosamines จากรายงานของ Russell *et al.* (2012) พบว่าสาร Nitrosamines ชนิดอื่นนอกเหนือจาก NDMA นั้นทำการตรวจวิเคราะห์ได้ค่อนข้างยาก ทั้งนี้เนื่องจากสารดังกล่าวมีความเข้มข้นในระดับที่ต่ำมากๆ จากการศึกษาการก่อตัวของสารผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (disinfection by-products, DBPs) พบว่า NDMA ก่อตัวได้จากการเติมคลอรีนหรือคลอรีนในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Mitch and Sedlak, 2002; Choi and Valentine, 2002) แต่ยังไม่มียารายงานการตรวจพบสาร Nitrosamines ชนิดอื่นนอกเหนือจาก NDMA ว่าเป็นผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าการทำการวิเคราะห์ปริมาณสาร Nitrosamines ชนิดอื่นนอกเหนือจาก NDMA นั้นค่อนข้างยุ่งยากเนื่องจากสารมีความเข้มข้นต่ำมาก รวมทั้งมีโอกาสเผชิญกับปัญหาด้านขีดจำกัดในการตรวจวัดของเครื่องมือได้สูง ดังนั้นในการศึกษารั้งนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA เป็นหลัก และทำการตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารกลุ่ม Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดในน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ น้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปา และน้ำประปาเท่านั้น

การวิเคราะห์เพื่อยืนยันตำแหน่งของสาร NDMA ด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) โดยส่งตัวอย่างสารมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L ไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ กำหนดสภาวะการทำงานของเครื่อง GC-MS เช่นเดียวกับสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร Nitrosamines ดังตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์สารมาตรฐาน NDMA แสดงดังโครมาโทแกรมในรูปที่ 4-8 จากโครมาโทแกรมพบว่าปรากฏพีคของสาร NDMA ที่ retention time (RT) เท่ากับ 5.27 นาที การวิเคราะห์ยืนยันสาร

NDMA โดยการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Wiley โดยน้ำหนักมวลต่อประจุที่ใช้ยืนยันคือ 74 จากการทดสอบขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1.0 mg/L พบว่าเครื่อง GC-MS ไม่สามารถตรวจวัดได้ ดังนั้นจึงต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อเลือกใช้เครื่อง GC ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของสาร NDMA ในลำดับต่อไป



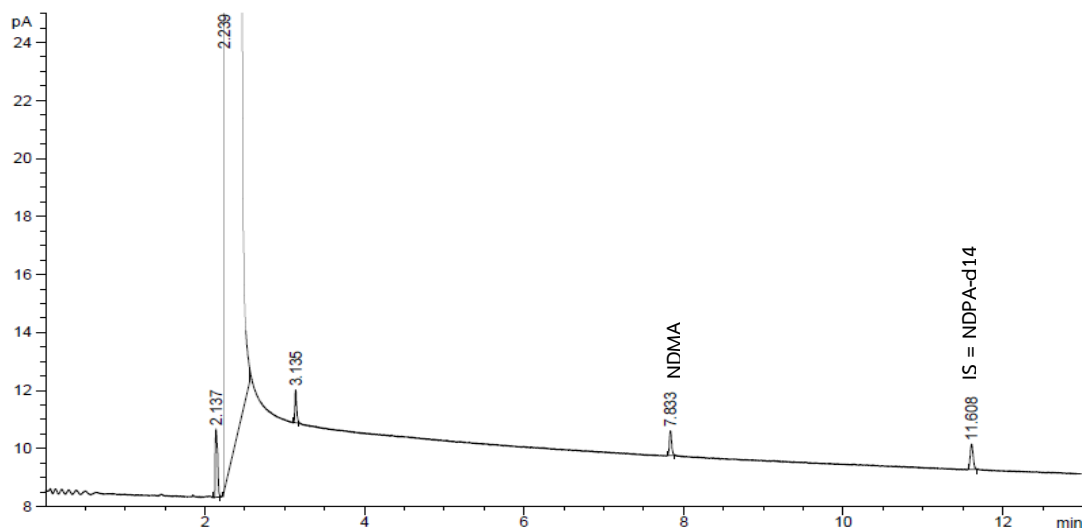
รูปที่ 4-8 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L โดยเครื่อง GC-MS

จากผลการวิเคราะห์สาร Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดและสาร NDMA โดยเครื่อง GC-MS ของการศึกษานี้ สรุปได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS สามารถใช้ตรวจวิเคราะห์สารมาตรฐานเพื่อยืนยันตำแหน่งพีคของสารเท่านั้น ไม่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ชนิดของสาร Nitrosamines และปริมาณสาร NDMA ในน้ำตัวอย่างได้เนื่องจากขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดของเครื่อง GC-MS มีค่าค่อนข้างสูง โดยเครื่อง GC-MS สามารถตรวจวัดสารได้ที่ระดับมิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) ในขณะที่สาร Nitrosamines และ NDMA ที่มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการตรวจพบสารดังกล่าวในระดับนาโนกรัมต่อลิตรเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) แทน ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

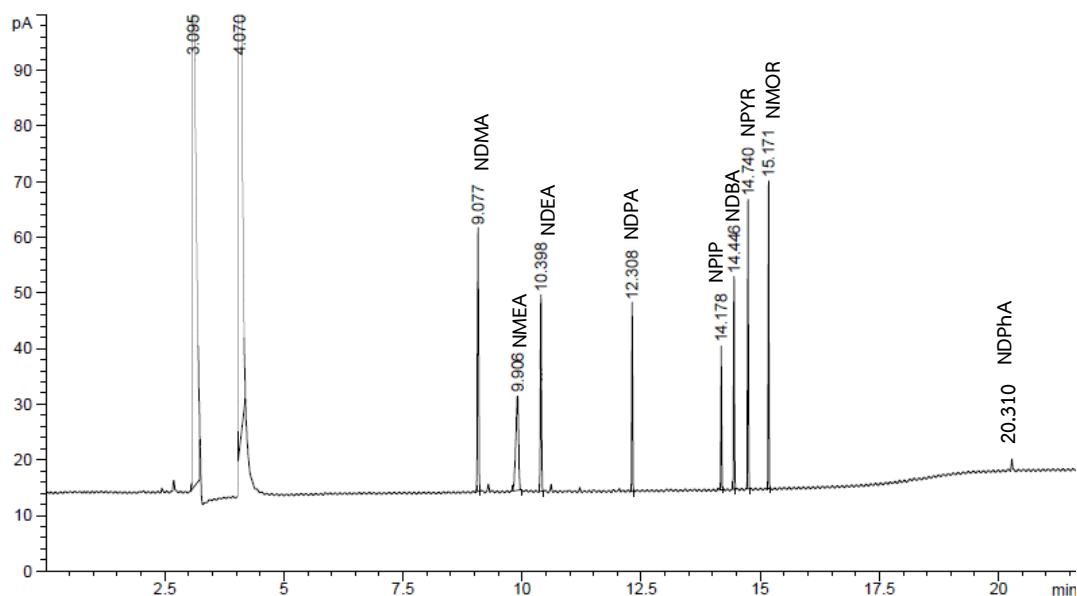
4.3.2 การวิเคราะห์ชนิดของ Nitrosamines ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ด้วยเทคนิค Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD)

จากผลการวิเคราะห์ชนิดจำกัดในการตรวจวัดสาร Nitrosamines และสาร NDMA ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าเครื่องมือดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการตรวจวิเคราะห์สารไนโตรซามีนและสาร NDMA ในน้ำตัวอย่างของการศึกษาครั้งนี้ ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เครื่อง Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) แทนการใช้เครื่อง GC-MS เนื่องจาก Nitrogen Phosphorus Detector (NPD) เป็นดีเทคเตอร์ที่มีสภาพไวสูงต่อสารประกอบฟอสฟอรัสและไนโตรเจน จึงเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดสาร Nitrosamines และ NDMA ซึ่งเป็นสารที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ การตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน NDMA ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) ด้วยเครื่อง GC-NPD แสดงดังรูปที่ 4-9 จากโครมาโทแกรมดังรูปปรากฏพีคของสาร NDMA ที่ retention time (RT) 7.83 ± 0.002 นาที และปรากฏพีคของ Internal standard (NDPA-d14) ที่ retention time (RT) 11.61 ± 0.001 นาที และจากรูปที่ 4-10 จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน Nitrosamines ผสม 9 ชนิด ความเข้มข้น 10 mg/L ปรากฏพีคของสารผสม Nitrosamines 9 ชนิด แยกกันอย่างชัดเจน ได้แก่ *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethylamine (NDEA), *N*-nitrosodi-n-propylamine (NDPA), *N*-nitrosopiperidine (NPip), *N*-nitrosodi-n-butylamine (NDBA), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPyr), *N*-nitrosomorpholine (NMor) และ *N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) โดยมี retention time (RT) เท่ากับ 9.07 ± 0.05 , 9.90 ± 0.05 , 10.39 ± 0.05 , 12.30 ± 0.05 , 14.17 ± 0.05 , 14.44 ± 0.05 , 14.74 ± 0.05 , 15.17 ± 0.05 , 20.31 ± 0.05 นาที

การทดสอบหาค่าขีดจำกัดในการตรวจวัด ของสาร Nitrosamines และสาร NDMA พบว่า ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของสาร Nitrosamines (9 ชนิด) และสาร NDMA ที่เครื่อง GC-NPD สามารถตรวจวัดได้ (limit of detection, LOD) มีค่าเท่ากับ 300 ng/L และ 14.7 $\mu\text{g/L}$ ตามลำดับ ส่วนค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่อง GC-NPD และวิธีการตรวจวัดที่สามารถวิเคราะห์สาร NDMA ในเชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ได้ มีค่าเท่ากับ 237 ng/L

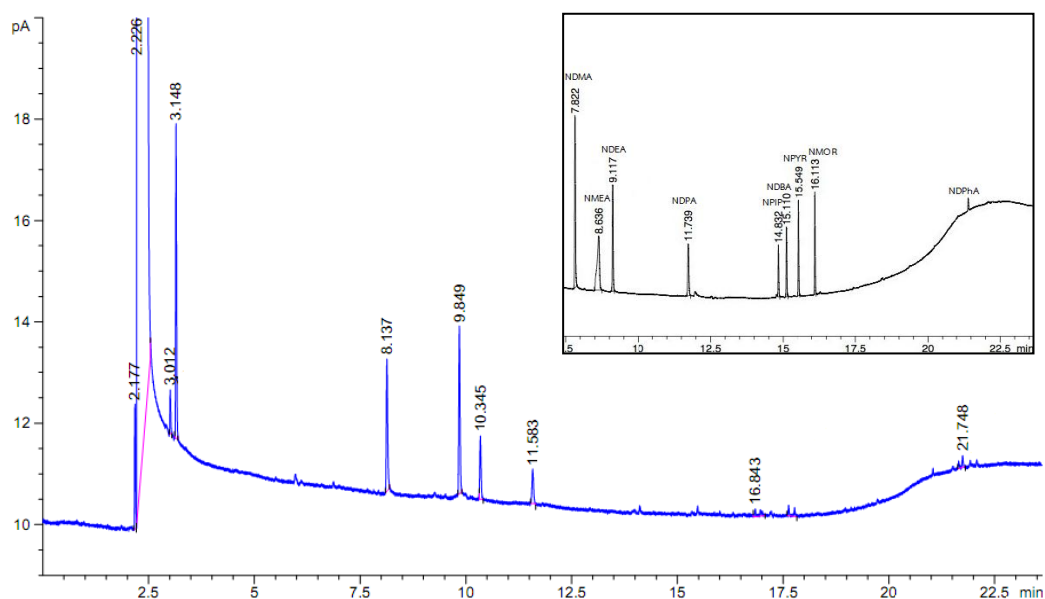


รูปที่ 4-9 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) ที่ระดับความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/L}$ โดยเครื่อง GC-NPD



รูปที่ 4-10 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน Nitrosamines 9 ชนิด: Peaks: *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethylamine (NDEA), *N*-nitrosodi-*n*-propylamine (NDPA), *N*-nitrosopiperidine (NPip), *N*-nitrosodi-*n*-butylamine (NDBA), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPyr), *N*-nitrosomorpholine (NMOR), *N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/L โดยเครื่อง GC-NPD

ผลการวิเคราะห์ Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดเชิงคุณภาพในน้ำดิบและน้ำประปาจาก
 ลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา ได้แก่ อ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดาบริเวณ
 ต้นน้ำ จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังลาบริเวณกลางน้ำ จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่บริเวณท้ายน้ำ
 น้ำประปาสะเดา น้ำประปาพะตง และน้ำประปาหาดใหญ่ ในการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2 ปรากฏ
 ว่าตัวอย่างน้ำดังกล่าวตรวจไม่พบสาร Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของ
 Nitrosamines ที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 300 ng/L โดยเมื่อเปรียบเทียบกับโครมาโทแกรมของสาร
 มาตรฐานพบว่าโครมาโทแกรมของน้ำตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการตรวจวัดไม่ปรากฏพีคที่มีค่า retention
 time (RT) ตรงกับสาร Nitrosamines ทั้ง 9 ชนิด และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA ใน
 น้ำดิบและน้ำประปาปรากฏว่าตรวจไม่พบสาร NDMA ที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการ
 ตรวจวัดสาร NDMA เท่ากับ 237 ng/L ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการตรวจวิเคราะห์สาร
 Nitrosamines 9 ชนิดในเชิงคุณภาพ แสดงดังรูปที่ 4-11 โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างโครมาโทแกรมของ
 การตรวจวิเคราะห์สาร Nitrosamines ของน้ำตัวอย่างจากจุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่ เนื่องจากน้ำ
 ตัวอย่างดังกล่าวเป็นน้ำที่มีค่า DOC และ DON ค่อนข้างสูง



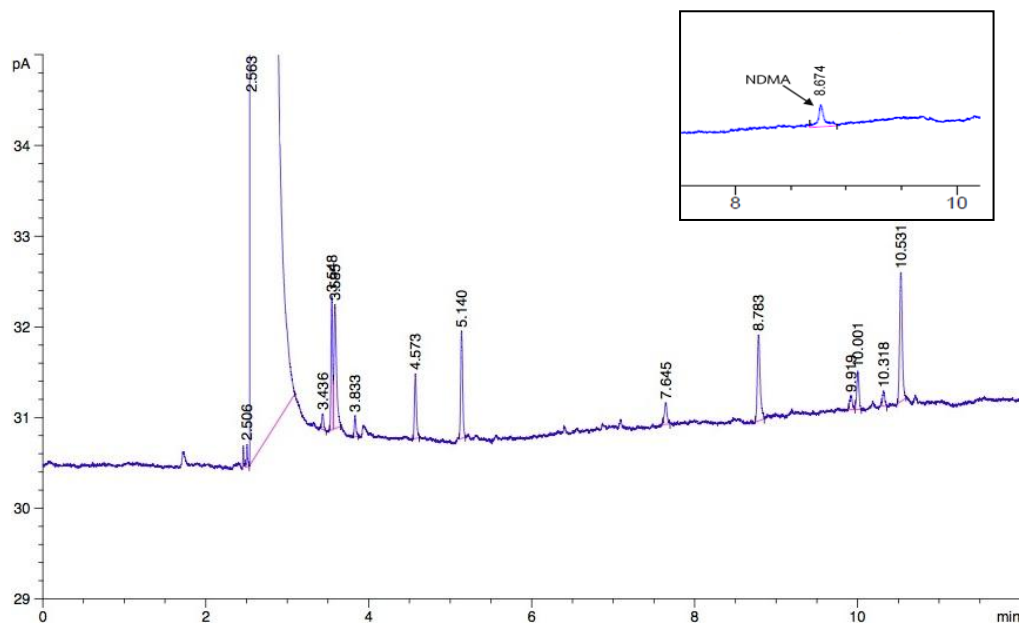
รูปที่ 4-11 โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ Nitrosamines 9 ชนิดในน้ำดิบประปาหาดใหญ่
 จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2

สำหรับผลการวิเคราะห์ NDMAFP ในน้ำดิบประปา, น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ resin fractionation แสดงดังตารางที่ 4-10 จากตารางดังกล่าวพบว่าน้ำดิบซึ่งมีค่า DOC และ DON สูงสุดเท่ากับ 3.9 mg/L และ 2.3 mg-N/L รวมถึงน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ resin fractionation ซึ่งมีค่า DOC และ DON ต่ำ ปรากฏว่าตรวจไม่พบค่า NDMAFP ที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการตรวจวัดสาร NDMA เท่ากับ 237 ng/L ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ปริมาณ NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ด้วยสารคลอรีนและคลอรามินด้วยเครื่อง GC-NPD แสดงดังรูปที่ 4-12 และ 4-13 ตามลำดับ

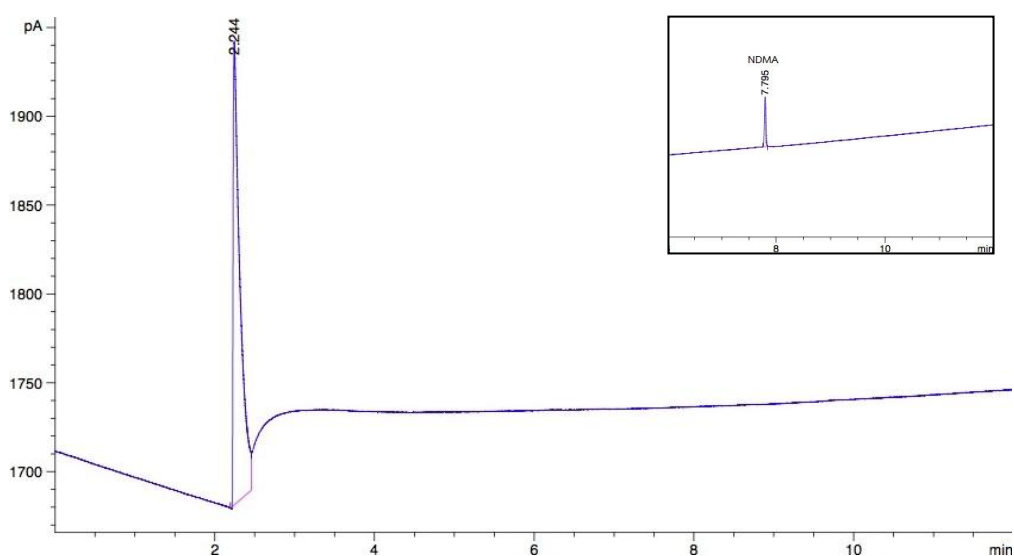
ตารางที่ 4-10 ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของน้ำดิบ น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการ resin fractionation

น้ำตัวอย่าง	DOC (mg/L)	DON (mg-N/L)	DOC/DON	NDMAFP _{Cl₂} (ng/L)	NDMAFP _{NH₂Cl} (ng/L)
น้ำดิบ	1.8-3.9	N.D.-2.34	2-77	< 237	< 237
Coagulation					
PACl 40 mg/L	1.3-2.5	0.20-0.65	3-6	< 237	< 237
PACl 40 + PAC 60 mg/L	1.1-2.2	0.27-0.79	3-4	< 237	< 237
Fraction					
น้ำดิบ (HPO)	0.9-1.8	N.D.	N.A.	< 237	< 237
น้ำดิบ (TPI)	0.5-0.6	N.D.	N.A.	< 237	< 237
น้ำดิบ (HPI)	0.6-1.2	N.D.	N.A.	< 237	< 237
Coagulation + Fraction					
PACl 40 mg/L (HPO)	0.9-1.2	N.D.	N.A.	< 237	< 237
PACl 40 mg/L (TPI)	0.5-0.7	N.D.	N.A.	< 237	< 237
PACl 40 mg/L (HPI)	0.6-0.9	N.D.	N.A.	< 237	< 237
Coagulation + Fraction					
PACl 40 + PAC 60 mg/L (HPO)	0.7-1.0	N.D.	N.A.	< 237	< 237
PACl 40 + PAC 60 mg/L (TPI)	0.5-0.6	N.D.	N.A.	< 237	< 237
PACl 40 + PAC 60 mg/L (HPI)	0.4-0.7	N.D.	N.A.	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้), N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), NDMAFP_{Cl₂} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH₂Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L



รูปที่ 4-12 โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ NDMAFP_{Cl₂} ในน้ำดิบประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2



รูปที่ 4-13 โครมาโทแกรมของการตรวจวิเคราะห์ปริมาณ NDMAFP_{NH₂Cl} ในน้ำดิบประปาหาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 2

สาเหตุหลักที่งานวิจัยนี้ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ได้ เนื่องจากขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดปริมาณสาร NDMA ของเครื่อง GC-NPD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 237 ng/L ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปริมาณ NDMA ที่มีการตรวจวัดได้จากแหล่ง

น้ำต่างๆในงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น จากการวิจัยของ Jobb *et al.* (1994) ที่ทำการตรวจวัดปริมาณ NDMA ในน้ำจากระบบประปา 145 แห่งในประเทศแคนาดาพบว่ามีค่า NDMA อยู่ในช่วง 5-115 ng/L Tomkins *et al.* (1995) ทำการตรวจวัดปริมาณ NDMA ในน้ำดื่มพบว่าส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 ng/L ตัวอย่างน้ำดิบจากระบบประปาในประเทศญี่ปุ่นในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาวมีค่า NDMA เท่ากับ 2.6 และ 4.3 ng/L ตามลำดับ (Asami *et al.*, 2009) จากข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าค่า NDMA ที่มีการตรวจพบในน้ำดื่มและน้ำดิบประปาของงานวิจัยที่ผ่านมา มีค่าต่ำกว่าระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการตรวจวัดของงานวิจัยนี้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 237 ng/L

เมื่อพิจารณาค่า DON และอัตราส่วนระหว่าง DOC/DON ต่อโอกาสการก่อตัวของ NDMA ของงานวิจัยที่ผ่านมา ดังตารางที่ 4-11 พบว่าน้ำที่มีค่า DON อยู่ในช่วง 0.1-1 mg-N/L และมีค่า DOC/DON อยู่ในช่วง 3.7-49 มีโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA ไม่เกิน 58 ng/L ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปาลงอยู่ตะกอนจากงานวิจัยนี้ซึ่งมีค่า DON อยู่ในช่วง 0.07-0.7 mg-N/L และมีค่า DOC/DON อยู่ในช่วง 5-37 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาอาจมี โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA ได้ไม่เกิน 58 ng/L และเนื่องจากองค์กรในต่างประเทศได้มีการ กำหนดค่ามาตรฐานของ NDMA ที่ยอมรับได้แตกต่างกันออกไป ได้แก่ The Ontario Ministry of the Environment กำหนดให้ NDMA ในน้ำดื่มที่ยอมรับได้ต้องมีค่าไม่เกิน 9 ng/L ส่วน California Department of Public Health กำหนดให้ NDMA, NDEA และ NDPA ต้องมีค่าไม่เกิน 10 ng/L US.EPA. กำหนดค่ามาตรฐานของ NDMA ในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 7 ng/L และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization,WHO, 2008) กำหนดค่า guideline value (GV) ของ NDMA ในน้ำดื่มต้องมีค่าไม่เกิน 100 ng/L

โดยประเทศไทยนิยมใช้ค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลกเป็นเกณฑ์หลัก ดังนั้น หากพิจารณาโอกาสการก่อตัวของ NDMA ในงานวิจัยนี้ซึ่งเทียบค่าจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังที่กล่าวใน ตอนต้นคือมีค่าไม่เกิน 58 ng/L จึงถือว่ามีโอกาสการก่อตัวของ NDMA อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเมื่อเทียบกับค่า guideline value ขององค์การอนามัยโลก แต่หากพิจารณาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ขององค์กรอื่นๆที่กำหนดค่า NDMA อยู่ในช่วงไม่เกิน 7-10 ng/L ถือว่าค่าโอกาสการก่อตัวของ NDMA จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงเกินมาตรฐาน อย่างไรก็ตามค่าโอกาสการก่อตัวของ NDMA ดังกล่าว เป็นเพียงค่าที่สันนิษฐานโดยการเทียบเคียงจากปริมาณสารตั้งต้นของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา เท่านั้น ไม่สามารถยืนยันได้ว่า เป็นค่าที่มีความถูกต้องหรือแน่นอน

หากพิจารณาผลการตรวจวัดปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของงานวิจัยนี้ซึ่ง ตรวจไม่พบสาร NDMA และ NDMAFP ที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการตรวจวัดเชิง ปริมาณเท่ากับ 237 ng/L ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า guideline value ของ NDMA ที่องค์การอนามัยโลกได้ กำหนดไว้เท่ากับ 100 ng/L ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุได้ว่าน้ำตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มี ปริมาณ NDMA อยู่ในระดับเกณฑ์มาตรฐานหรือไม่

ตารางที่ 4-11 ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของแหล่งน้ำในต่างประเทศจากงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยครั้งนี้

แหล่งน้ำ	DOC (mg/L)	DON (mg-N/L)	DOC/DON	NDMAFP (ng/L)	ที่มา
อ่างเก็บน้ำและทะเลสาบ					
San Pablo Reservoir (depth 1 m)**	3.2	0.3	11	22	Gerecke and Sedlak (2003)
San Pablo Reservoir (depth 41 m)**	4.1	0.4	10	10	Gerecke and Sedlak (2003)
Upper San Leandro Reservoir (depth 1 m)**	4.6	0.3	15	20	Gerecke and Sedlak (2003)
Upper San Leandro Reservoir (depth 16 m)**	5.9	0.3	20	9	Gerecke and Sedlak (2003)
Upper San Leandro Reservoir, Moraga arm (depth 1 m)**	9.7	N.A.	N.A.	15	Gerecke and Sedlak (2003)
Lake Anza (depth 0.2 m)**	9.4	N.A.	N.A.	33	Gerecke and Sedlak (2003)
Lake Mendota (depth 1 m)**	13.7	N.A.	N.A.	58	Gerecke and Sedlak (2003)
อ่างเก็บน้ำสะเดา*	2.0 ^a	0.6 ^a	37 ^a	<237	งานวิจัยนี้
อ่างเก็บน้ำสะเดา**				<237	งานวิจัยนี้
อ่างเก็บน้ำคลองหลา*				<237	งานวิจัยนี้
อ่างเก็บน้ำคลองหลา**	2.3 ^a	0.5 ^a	25 ^a	<237	งานวิจัยนี้

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์, (a) หมายถึง ค่าเฉลี่ย, (*) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, (**) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน,ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) ของสาร NDMA จากงานวิจัยนี้= 237 ng/L

ตารางที่ 4-11 ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของแหล่งน้ำในต่างประเทศจากงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยครั้งนี้ (ต่อ)

แหล่งน้ำ	DOC (mg/L)	DON (mg-N/L)	DOC/DON	NDMAFP (ng/L)	ที่มา
แม่น้ำ					
Suwannee River humic acid solution**	4.9	0.1	49	27	Gerecke and Sedlak (2003)
Suwannee River NOM solution**	6	N.A.	N.A.	17	Gerecke and Sedlak (2003)
Southeast Queensland (site1)**	6.5 ^a	0.5 ^a	13 ^a	13 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (site2)**	5.7 ^a	1 ^a	5.7 ^a	11 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (site3)**	3.9 ^a	0.6 ^a	6.5 ^a	10 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (site4)**	3.6 ^a	0.3 ^a	12 ^a	7 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (site5)**	2.8 ^a	0.4 ^a	7 ^a	11 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Iowa River Water**	3.4	-	-	112	Chen and Valentine (2007)
Surface water**	4	-	N.A.	13	Hanigan <i>et al.</i> (2012)
ระบบประปา					
Southeast Queensland (A-WTP)**	-	N.A.	N.A.	8 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (B-WTP)**	-	N.A.	N.A.	13 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (C-WTP)**	-	N.A.	N.A.	11 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (D-WTP)**	3.8 ^a	0.3 ^a	12.7 ^a	11 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)
Southeast Queensland (E-WTP)**	1.4 ^a	0.2 ^a	7 ^a	7 ^a	Knight <i>et al.</i> (2012)

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์, (a) หมายถึง ค่าเฉลี่ย, (*) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, (**) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) ของสาร NDMA จากงานวิจัยนี้ = 237 ng/L

ตารางที่ 4-11 ค่า DOC, DON, DOC/DON และ NDMAFP ของแหล่งน้ำในต่างประเทศจากงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยครั้งนี้ (ต่อ)

แหล่งน้ำ	DOC (mg/L)	DON (mg-N/L)	DOC/DON	NDMAFP (ng/L)	ที่มา
ระบบประปา (ต่อ)					
จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา*	1.9 ^a	0.07 ^a	27 ^a	<237	งานวิจัยนี้
จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา**				<237	งานวิจัยนี้
จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังงา*	2.9 ^a	0.7 ^a	8 ^a	<237	งานวิจัยนี้
จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังงา**				<237	งานวิจัยนี้
จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่*	3.0 ^a	0.7 ^a	5 ^a	<237	งานวิจัยนี้
จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่**				<237	งานวิจัยนี้
น้ำบาดาล					
Groundwater from Florida**	25	N.A.	N.A.	27	Gerecke and Sedlak (2003)
Colorado River Water + Cyanobacteria					
<i>Microcystis aeruginosa</i> (MA)**	2.0	0.5	4	<2.5	Wert and Rosario-Ortiz (2013)
<i>Oscillatoria</i> sp. (OSC)**	1.0	0.2	5	<2.5	Wert and Rosario-Ortiz (2013)
<i>Lyngbya</i> sp. (LYN)**	1.1	0.3	3.7	<2.5	Wert and Rosario-Ortiz (2013)
Secondary wastewater effluent**	5.5	-	N.A.	1500	Hanigan <i>et al.</i> (2012)

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์, (a) หมายถึง ค่าเฉลี่ย, (*) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, (**) หมายถึง วิเคราะห์ NDMAFP โดยการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (LOQ) ของสาร NDMA จากงานวิจัยนี้ = 237 ng/L

แม้ว่าค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดขึ้นเป็นค่ามาตรฐานของ NDMA สำหรับน้ำดื่มรวมถึงระบบประปาที่ทำการศึกษายังไม่มีการประกาศให้นำประปาเป็นน้ำประปาดื่มได้ โอกาสในการรับสาร NDMA ผ่านการดื่มน้ำจึงเป็นไปได้ค่อนข้างน้อย แต่ก็มีโอกาสรับสาร NDMA ผ่านผิวหนังได้จากการสัมผัสกับน้ำโดยตรงด้วยการอาบน้ำหรือการว่ายน้ำ เนื่องจากมีการรายงานสาร NDMA มีโอกาสเข้าสู่ร่างกายโดยการซึมผ่านผิวหนังได้ ซึ่งที่ระดับความเข้มข้นของ NDMA ในน้ำ เท่ากับ 1 mg/L สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยซึมผ่านผิวหนังจากการอาบน้ำคิดเป็น 880 ng/day โดยมีความคงที่การซึมผ่านของ NDMA (K_p) เท่ากับ 0.000265 cm/hr พื้นที่ผิวร่างกายโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20,000 cm² และระยะเวลาในการอาบน้ำ 10 min/day (California Public Health Goal, 2006)

เมื่อคำนวณค่าโอกาสการได้รับ NDMA โดยการซึมผ่านผิวหนังจากค่า guideline value ขององค์การอนามัยโลกพบว่าน้ำที่มีการปนเปื้อนของ NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 100 ng/L สาร NDMA มีโอกาสเข้าสู่ร่างกายผู้ใช้น้ำโดยการซึมผ่านผิวหนังจากการอาบน้ำคิดเป็น 0.09 ng/day หากพิจารณาค่าโอกาสการก่อตัวของ NDMA ของงานวิจัยนี้ซึ่งเทียบค่าจากงานวิจัยที่ผ่านมา กล่าวได้ว่าหากน้ำมีการปนเปื้อนของ NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 58 ng/L ผู้ใช้น้ำจะมีโอกาสได้รับ NDMA เข้าสู่ร่างกายโดยการซึมผ่านผิวหนังจากการอาบน้ำในปริมาณ 0.05 ng/day และหากพิจารณาจากค่าขีดจำกัดการตรวจวัดของงานวิจัยนี้กล่าวได้ว่า น้ำดิบ น้ำประปา น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน และน้ำที่ผ่านกระบวนการแฟรกชันมีปริมาณสาร NDMA สูงที่สุดได้ไม่เกิน 237 ng/L ซึ่งหากน้ำมีการปนเปื้อนของสาร NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 237 ng/L ผู้ใช้น้ำจะมีโอกาสได้รับ NDMA โดยการซึมผ่านผิวหนังจากการอาบน้ำคิดเป็น 0.21 ng/day ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าโอกาสการได้รับสาร NDMA จากการซึมผ่านผิวหนังทั้งสองกรณีข้างต้นเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวซึ่งคำนวณจากค่า guideline value ขององค์การอนามัยโลก จึงกล่าวได้ว่าหากน้ำมีการปนเปื้อนของ NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 58 ng/L มีค่าโอกาสการได้รับ NDMA ผ่านผิวหนังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ในขณะที่เดียวกันหากน้ำมีการปนเปื้อนของ NDMA สูงในระดับ 237 ng/L พบว่าค่าโอกาสการได้รับ NDMA ผ่านผิวหนังมีค่าสูงเกินมาตรฐาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย แต่อย่างไรก็ตามค่าโอกาสการได้รับสาร NDMA ผ่านผิวหนังดังที่กล่าวมาเป็นเพียงค่าที่คำนวณจากโอกาสการก่อตัวซึ่งประมาณจากงานวิจัยที่ผ่านมาและค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ NDMA เหนือปริมาณที่ได้จากงานวิจัยนี้เท่านั้น ไม่ใช่ค่า NDMA ที่จะได้รับเข้าสู่ร่างกายจริงแต่อย่างใด ดังนั้นในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณ NDMA โดยใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจวัดได้ในระดับขีดจำกัดที่ต่ำกว่าการวิจัยครั้งนี้เพื่อที่จะสามารถระบุความเข้มข้นที่แท้จริงของ NDMA ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น

4.4 แนวทางการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบประปา

งานวิจัยนี้พบว่าสถานะที่เหมาะสมของการโคแอกกูเลชันในการลดสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาคือ การใช้ PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 โดยที่สถานะดังกล่าวสามารถลดค่า DOC ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็งกลุ่ม C-DBPs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน จากความเข้มข้นเริ่มต้นในน้ำดิบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 3 mg/L เหลือ 1.9 mg/L ซึ่งจากการศึกษาของจรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์ และชัยศรี สุขสาโรจน์ (2551) พบว่าน้ำตัวอย่างที่มีค่า DOC เท่ากับ 2.1 mg/L มีค่าโอกาสการก่อตัวของสารไตรฮาโลมีเทนเท่ากับ 61.8 $\mu\text{g/L}$ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันจากงานวิจัยนี้มีค่า DOC เฉลี่ยเท่ากับ 1.9 mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่า DOC จากงานวิจัยของจรงค์พันธ์ มุสิกะวงค์ และชัยศรี สุขสาโรจน์ (2551) มีโอกาสเกิดการก่อตัวของไตรฮาโลมีเทนได้ต่ำกว่า 61.8 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มของ U.S.EPA ซึ่งกำหนดให้มีไตรฮาโลมีเทนไม่เกิน 80 $\mu\text{g/L}$

เมื่อพิจารณาค่า DON ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็งกลุ่ม N-DBPs เช่น NDMA และสารชนิดอื่นๆในกลุ่ม Nitrosamines พบว่าน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 มีค่า DON คงเหลือโดยเฉลี่ย 0.43 mg-N/L จากการศึกษาของ Knight *et al.* (2012) พบว่าน้ำที่มีค่า DON เท่ากับ 0.4 และ 0.5 mg-N/L มีโอกาสการก่อตัวของ NDMA เท่ากับ 11 และ 13 ng/L ตามลำดับซึ่งค่าดังกล่าวโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน NDMA ในน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลกที่กำหนดไว้ให้มีค่าไม่เกิน 100 ng/L แต่ยังมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับมาตรฐาน NDMA ในน้ำดื่มของ California Department of Public Health, Ontario Ministry of the Environment และ US.EPA. ที่กำหนดให้มีค่าในช่วงไม่เกิน 7-10 ng/L ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 จากงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการลดค่า DOC ในน้ำดิบประปาได้ดี และลดค่า DON ได้ค่อนข้างดี นอกจากนี้ค่าพีเอช 7 เป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำดิบคลองอู่ตะเภาทำให้ไม่สิ้นเปลืองสารเคมีในการปรับพีเอช จากตารางที่ 4-2 ที่แสดงผลการวิเคราะห์น้ำประปากล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านระบบประปายังคงมีสารอินทรีย์ละลายน้ำค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับน้ำดิบ ดังนั้นหากระบบประปานำสถานะดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานจะสามารถลดสารอินทรีย์ละลายน้ำได้โดยรวมถึงลดโอกาสในการก่อตัวของสารก่อมะเร็งได้ในระดับหนึ่ง

นอกจากนี้การโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC รุ่น HRO M325-60 เข้มข้น 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอช 7 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่า DOC ได้ดี แต่มีประสิทธิภาพในการลดค่า DON ได้ต่ำกว่าการใช้ PACl อย่างเดียว ดังนั้นการใช้ PAC รุ่น HRO M325-60 จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานจริงในระบบประปาที่ผลิตน้ำจากน้ำดิบคลองอู่ตะเภา เนื่องจาก PAC ดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารตั้งต้นของ C-DBPs ได้ แต่ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารตั้งต้นของ N-DBPs รวมถึง PAC รุ่น HRO M325-60 มีราคาค่อนข้างสูงประมาณ กิโลกรัมละ 50 บาทและต้องใช้ในปริมาณมากจึงไม่คุ้มค่าหากนำมาใช้ในระบบ

ประปา แต่อย่างไรก็ตามอาจนำ PAC มาใช้ลดค่า DOC และ DIN ได้ในบางช่วงที่น้ำดิบมีค่า DOC และ DIN สูง

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดิบกลุ่มน้ำคลองอุตะเถาจากงานวิจัยนี้พบว่าน้ำดิบในคลองอุตะเถาบริเวณลำน้ำช่วงกลางและท้ายน้ำมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำค่อนข้างสูง เนื่องจากอาจได้รับผลกระทบจากน้ำเสียชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่ตลอดแนวสองฝั่งคลอง และเนื่องจากการขยายตัวของสังคมและชุมชนที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆในปัจจุบัน ในอนาคตน้ำในคลองอุตะเถาจึงอาจมีโอกาสปนเปื้อนมลพิษเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งหากเกิดกรณีดังกล่าวขึ้นระบบประปาที่ผลิตน้ำประปาจากน้ำดิบจากคลองอุตะเถาย่อมได้รับผลกระทบมากที่สุด ดังนั้นการพิจารณาถึงการย้ายระบบประปาไปยังช่วงต้นน้ำจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบริเวณต้นน้ำคลองอุตะเถาพบว่าน้ำดิบมีคุณภาพดีและมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำค่อนข้างต่ำ

อย่างไรก็ตามวิธีการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดคือความร่วมมือร่วมใจและการสร้างจิตสำนึกในการอนุรักษ์แหล่งน้ำของผู้คนในชุมชนรวมถึงผู้ประกอบการต่างๆ โดยการงดทิ้งน้ำเสียหรือของเสียลงสู่คลองอุตะเถา เพื่อให้น้ำในคลองอุตะเถามีคุณภาพ ปลอดภัยจากมลพิษ และสามารถนำไปผลิตน้ำประปาที่ใสสะอาด มีคุณภาพดีตามมาตรฐานได้อย่างยั่งยืน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำมีปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC), ultraviolet adsorption at wavelength 254 nm (UV-254) และ สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) อยู่ในช่วง 1.8-2.3 mg/L, 0.039-0.172 cm^{-1} และ 0.04-0.11 mg-N/L โดยมีค่าเฉลี่ยเป็น 2.13 mg/L, 0.085 cm^{-1} และ 0.08 mg-N/L ตามลำดับ น้ำดิบประปาคลองอยู่ตะกามีค่า DOC, UV-254 และ DON อยู่ในช่วง 2-3.9 mg/L, 0.078-0.244 cm^{-1} และ ตรวจไม่พบ -1.12 mg-N/L มีค่าเฉลี่ยเป็น 2.67 mg/L, 0.137 cm^{-1} และ 0.56 mg-N/L ตามลำดับ และน้ำประปามีค่า DOC, UV-254 และ DON อยู่ในช่วง 1.4-3.2 mg/L, 0.018-0.055 cm^{-1} และ 0.06-1.07 mg-N/L มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 mg/L, 0.031 cm^{-1} และ 0.47 mg-N/L ตามลำดับ

2. น้ำดิบประปาคลองอยู่ตะกามีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น จากช่วงต้นน้ำไปยังท้ายน้ำ

3. น้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปาคลองอยู่ตะกามีสารอินทรีย์กลุ่มไม่ชอบน้ำ (hydrophobic organic fraction, HPO) เป็นสารอินทรีย์กลุ่มหลักโดยเฉลี่ย 44 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ รองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำ (hydrophilic organic fraction, HPI) เฉลี่ย 34 และ 32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสารอินทรีย์กลุ่มกึ่งชอบน้ำ (transphilic organic fraction, TPI) เฉลี่ย 23 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. การใช้โพอลิอะลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminium chloride, PACl) ปริมาณ 40 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชัน โดยสามารถลดค่า DOC UV-254 และ DON โดยเฉลี่ยจาก 3.0 mg/L, 0.138 cm^{-1} และ 0.72 mg-N/L ให้เหลือ 1.9 mg/L, 0.042 cm^{-1} และ 0.43 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 36 70 และ 38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5. การใช้ PACl ปริมาณ 40 mg/L ร่วมกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (powder activated carbon, PAC) รุ่น HRO M325-60 ปริมาณ 60 mg/L ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการโคแอกกูเลชัน โดยสามารถลดค่า DOC UV-254 และ DON โดยเฉลี่ยจาก 3.0 mg/L, 0.138 cm^{-1} และ 0.72 mg-N/L ให้เหลือ 1.7 mg/L, 0.034 cm^{-1} และ 0.53 mg-N/L ตามลำดับ คิดเป็น 45 76 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การใช้ PACl ร่วมกับ PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า DOC และ UV-254 ได้ดีกว่าการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว แต่การใช้ PAC รุ่น HRO M325-60 ไม่เหมาะสมต่อการโคแอกกูเลชันร่วมกับ PACl เพื่อกำจัดค่า DON ในน้ำดิบประปา

หาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวสามารถกำจัดค่า DON ได้น้อยกว่าการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว

6. กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วย PACl 40 mg/L ควบคุมค่าฟิโอสเท่ากับ 7 กำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO ได้ดีที่สูตรรองลงมาคือสารอินทรีย์กลุ่ม HPI และไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม TPI ได้ โดยสามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI โดยเฉลี่ยจาก 1.5 และ 1.0 mg/L ให้เหลือ 1.1 และ 0.8 mg/L ตามลำดับ คิดเป็น 28 และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl 40 mg/L ร่วมกับ PAC 60 mg/L พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI ได้ โดยสามารถลดค่า DOC ของสารอินทรีย์กลุ่ม HPO และ HPI โดยเฉลี่ยจาก 1.5 และ 1.0 mg/L ให้เหลือ 0.9 และ 0.6 mg/L ตามลำดับ คิดเป็น 42 และ 46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากการใช้ PACl เพียงอย่างเดียว 14 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์กลุ่ม TPI ได้

7. การตรวจวิเคราะห์ชนิดของสารไนโตรซามีน ได้แก่ *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethylamine (NDEA), *N*-nitrosodi-n-propylamine (NDPA), *N*-nitrosopiperidine (NPip), *N*-nitrosodi-n-butylamine (NDBA), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPyr), *N*-nitrosomorpholine (NMor) และ *N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) ไม่พบสารทั้ง 9 ชนิดในตัวอย่างน้ำดิบและน้ำประปา ซึ่งตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-NPD ที่มีระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 300 ng/L

8. การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA และค่าโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP) ไม่พบสาร NDMA และ NDMAFP ในน้ำทุกตัวอย่าง ซึ่งตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-NPD ระดับขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการการตรวจวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 237 ng/L

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลจากการวิจัยนี้พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) รุ่น HRO M325-60 ไม่สามารถใช้ร่วมกับ PACl เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด DON ในน้ำดิบประปาคลองอู่ตะเภาได้ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตอาจทำการโคแอกกูเลชันโดยใช้ PACl แล้วจึงนำน้ำที่ผ่านการโคแอกกูเลชันมาบำบัดต่อโดยกระบวนการดูดติดด้วย PAC หรืออาจศึกษาหาวิธีการและสารเพิ่มประสิทธิภาพการโคแอกกูเลชันชนิดอื่นทดแทน เช่น กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน การใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกร็ด (granular activated carbon, GAC) หรือเลือกใช้ PAC ที่มีคุณสมบัติพิเศษชนิดอื่นๆ เป็นต้น

2. เนื่องจากผลการวิจัยนี้พบว่าการใช้เครื่อง GC-NPD มีข้อจำกัดในด้านขีดจำกัดของการตรวจวัด โดยมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องมือและวิธีการการตรวจวัดสาร NDMA ค่อนข้างสูงเท่ากับ 237 ng/L ทำให้ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ได้เนื่องจาก NDMA เป็นสารที่มีปริมาณน้อยซึ่งส่วนใหญ่มีการตรวจพบในระดับต่ำกว่า 100 ng/L ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการศึกษาเกี่ยวกับขีดจำกัดในการตรวจวัดสาร NDMA เพิ่มเติมโดยเลือกใช้เครื่อง

GC ที่สามารถตรวจวัด NDMA ได้ในระดับขีดจำกัดที่ต่ำกว่าการวิจัยครั้งนี้ แต่หากไม่สามารถหาเครื่อง GC อื่นทดแทนได้ งานวิจัยในอนาคตอาจเปลี่ยนแปลงตัวดูดซับที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดสาร NDMA ซึ่งจากเดิมงานวิจัยนี้ใช้ coconut charcoal เป็นตัวดูดซับ งานวิจัยในอนาคตอาจเลือกใช้ตัวดูดซับชนิดอื่นเช่น ตัวดูดซับของแข็งชนิด LiChrolut เป็นต้น หรืออาจเปลี่ยนแปลงวิธีการสกัดจากเดิมซึ่งใช้วิธีการสกัดโดยตัวดูดซับของแข็ง (solid phase extraction, SPE) เปลี่ยนเป็นการสกัดโดยของเหลว (liquid-liquid extraction, LLE)

3. งานวิจัยนี้ไม่สามารถหาค่า DON ของน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ได้เนื่องจากไม่สามารถกรองน้ำตัวอย่างกลุ่ม HPI ผ่านชุดเมมเบรน NF270 dead-end filtration ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการวิเคราะห์ค่า DON นอกจากนี้ น้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ยังมีค่าสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved nitrogen, TDN) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งเมื่อนำน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่า TDN พบว่ามีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของเครื่องมือ จึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาค่า DON ได้ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยในอนาคตจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่จะสามารถใช้ในการวิเคราะห์ค่า DON ในน้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation ได้

บรรณานุกรม

กนกทิพย์ บุญเกิด. 2551. ไนโตรซามีนในอุตสาหกรรมยาง.(ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.rubbercenter.org/files/Journal_RDCTRI_3.pdf. (15 มีนาคม 2555).

กนกรัตน์ เชิญทอง. 2556. ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายของไนโตรซามีนออกมาจากถุงมือยางที่ใช้สัมผัสอาหาร. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กรมควบคุมมลพิษ. 2548. ข้อมูลแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทอุตสาหกรรมชุมชน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://ptech.pcd.go.th/pcd/document/007467/007467._chp2.pdf (1 สิงหาคม 2558).

กรมควบคุมมลพิษ. 2552. น้ำเสียชุมชน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.pcd.go.th/Info_serv/water_wt.html#s1 (26 ธันวาคม 2558).

กรมวิทยาศาสตร์บริการ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. อันตรายจากสารไนโตรซามีน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR23.pdf> (9 สิงหาคม 2558)

การประปานครหลวง. 2552. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.mwa.co.th/main.php?filename=index_design03. (12 ตุลาคม 2557).

การประปานครหลวง. 2548. คลอรีน (Chlorine). (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.mwa.co.th/ewt_dl_link.php?nid=440 (5 ตุลาคม 2558)

การประปาส่วนภูมิภาค. 2550. มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.pwa.co.th/download/pwastandard50-1.pdf> (14 กรกฎาคม 2558).

การประปาส่วนภูมิภาค. 2552. การเติมคลอรีนในน้ำประปา. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.pwa.co.th/document/clorine.html> (17 มีนาคม 2555).

โกมล ศิวะบวร, เชาวยุทธ พรพิมลเทพ และ สุวิทย์ ชุมนุมศิริวัฒน์. 2524. การประปาเบื้องต้น. ภาควิชาสุขาภิบาลวิศวกรรม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 63-79.

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ ชัยศรี สุขสาโรจน์. 2551. การลดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบประปาเพื่อควบคุมปริมาณการเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำประปา. รายงานการวิจัย. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์, ชัยศรี สุขสาโรจน์, ธันวดี เตชะภัททวรกุล, พยอม รัตนมณี, ภัทรธร เอื้อกฤดาธิการ, วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล และ อุดุลย์ เบ็ญนุ้ย. 2555. การจำแนกลักษณะสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำผิวดินเพื่อนำมาควบคุมการเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำประปา. รายงานการวิจัย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ สุรพงษ์ วัฒนะจีระ. 2555. โครงการ การจำแนกลักษณะและบำบัดสารอินทรีย์กลุ่มชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา จังหวัดสงขลา. รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์ และ อรมาศ สุทธินน. 2555. การตรวจวัดสารตั้งต้นและโอกาสการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรซามีนของน้ำดิบประปาจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จักรพันธ์ ปัญจะสุวรรณ. 2542. พิษภัยในอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 139-142.

ชาคริต โภชะเรือง และ เทพกิตต์ กำเนิดไพรวลัย. 2550. รายงานโครงการรวบรวมและสังเคราะห์องค์ความรู้ของคลองอู่ตะเภา. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.khlong-u-taphao.com/doc/khlong_u_taphao_info_general.pdf (25 กรกฎาคม 2558).

เบญจลักษณ์ กาญจนเศรษฐ. 2555. ไนโตรโซไดเมธิลอะมีน สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ. วารสารสิ่งแวดล้อมปีที่ 16 เล่ม 2. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <http://www.eric.chula.ac.th/journal/ej/v16y2555/no2/article2.pdf> (4 สิงหาคม 2558).

ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537). มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำ
ผิวดิน. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water05.html (14 กรกฎาคม 2558).

พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. 2552. กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน.(ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.mwa.co.th/ewt/mwa_internew/download/prd01/water_echnology/pdf_water_treatment_plant/coagulation.pdf. (14 กรกฎาคม 2558)

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปาเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 116-184.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 134-169.

แมน อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ:
โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.

สมศักดิ์ ปีสานานนท์. 2548. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโดยชั้นกรองตัวกลาง
พลาสติกกลอยร่วมกับเมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชันในการผลิตน้ำประปา.วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อัศวินท์ พุ่มไพศาลชัย. 2548. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติชนิดชอบน้ำและไม่ชอบน้ำในอ่างเก็บ
น้ำโดยโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อาภรณ์ รักเกิด. 2542. การประเมินปัญหาไนโตรเจนในน้ำเสียจากโรงงานยางและการกำจัด
ไนโตรเจนด้วยระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้มวลชีวะประเภทเกาะผิว. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

โอบเอื้อ อิมวิทยา และ ณฐลมนต์ ปัญญวัฒน์กิจ. 2557. ไนโตรซามีนสารปนเปื้อนในห้วนมยาง
สำหรับทารก. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 62. ฉบับที่ 106.

- Álvarez-Uriarte, U., Iriarte-Velasco, U., Chimeno-Alanis, N. and Gonzáles Velasco, J.R. 2010. The effect of mixed oxidants and powdered activated carbon on the removal natural organic matter. *Journal of Hazardous Material*. 181: 426-431.
- Arnaldos, M. and Pagilla, K. 2010. Effluent dissolved organic nitrogen and dissolved phosphorus removal by enhanced coagulation and microfiltration. *Water Research*. 44: 5306-5315.
- Asami, M., Oya, M., and Kosaka, K. 2009. A nationwide survey of NDMA in raw and drinking water in Japan. *Science of the Total Environment*. 407(11): 3540-3545.
- Au, K-K (A), Alpert, S.M. and Pernitsky, D.J. 2011. Chapter 1: Particle and Natural Organic Matter Removal in Drinking Water. AWWA manual M37.
- AWWA. 1993. Characterization of natural organic matter and its relationship to treatability. AWWA Research Foundation American Water Works Association Printed in the U.S.A.
- AWWA. 1999. Removal of DBP Precursors by Enhanced Coagulation and Lime Softening. AWWA Research Foundation American Water Works Association Printed in the U.S.A.
- Beyer, M., Lohrengel, B. and Nghiem, L D. 2010. Membrane fouling and chemical cleaning in water recycling applications. *Desalination*. 250: 977-981.
- Bond, T., Huang, J., Templeton, M.R. and Graham, N. 2011. Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water-A review. *Water Research*. 45: 4341-4354.
- Bose, P. and Reckhow, D. 2007. The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation. *Water Research*. 41: 1516-1524.

- Cai, L., Zhao, Y., Gong, S., Dong, L. and Wu, C. 2003. Use of a novel sol-gel dibenzo-18-crown-6 solid phase microextraction fiber and a new derivatizing reagent for determination of aliphatic amines in lake water and human urine. *Chromatographia*. 58: 615-621.
- California Department of Public Health. 2010. Drinking Water Program. Drinking Water Notification Levels and Response Levels: An overview. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Documents/Notificationlevels/notificationlevels.pdf> (24 กรกฎาคม 2558).
- California Environmental Protection Agency. 2006. Public Health Goal for N-Nitrosodimethylamine in Drinking Water. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.oehha.ca.gov/water/phg/pdf/122206NDMAphg.pdf> (17 ตุลาคม 2558)
- Carrière, A., Vachon, M., Bêlisle, J.-L. and Barbeau, B. 2009. Supplementing coagulation with powdered activated carbon as a control strategy for trihalomethanes: application to an existing utility. 58: 363-371.
- Chang, H., Chen, C. and Wang, G. 2013. Characteristics of C-, N-DBPs formation from nitrogen enriched dissolved organic matter in raw water and treated waste water effluent. *Water Research*. 47: 2729-2741.
- Chang, H. and Wang, G. 2013. Fractionation of nitrogen-enriched dissolved organic matter in water. *Separation and Purification Technology*. 117: 89-97.
- Charrois, T.L., Hill, R.L., Vu, D., Foster, B.C., Boon, H.S. and Cramer, K. 2007. Community identification of natural health product-drug interreactions. 41(7-8): 1124-1129.
- Chen, Z. and Valentine, R.L. 2007. Formation of N-Nitrosodimethylamine (NDMA) from Humic Substances in Natural Water. *Environmental Science and Technology*. 41: 6059-6065.

- Choi, J. and Valentine, R.L. 2002. Formation of *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product. *Water Research*. 36: 817-824.
- Choi, J. and Valentine, R.L. 2003. *N*-Nitrosodimethylamine formation by Free-Chlorine-Enhanced Nitrosation of Dimethylamine. *Environmental Science and Technology*. 37: 4871-4876.
- Croue, J.P., Martin, B., Simon, P. and Legube, B. 1993. Hydrophobic and hydrophilic acids extraction, characterization and quantification. *Water Supply and Technology*. 11: 79-90.
- Dempsey, B.A. 1985. Polyaluminium Chloride and Alum Coagulation of clay Fulvic Acid Suspensions. *Journal American Water Works Association*. 77(3): 74-80.
- Dilling, J. and Kaiser, K. 2002. Estimation of the hydrophobic fraction of dissolved organic matter in water samples using UV photometry. *Water Research*. 36: 5037-5044.
- Dwyer, J., Griffiths, P. and Lant, P. 2009. Simultaneous colour and DON removal from sewage treatment plant effluent: Alum coagulation of melanoidin. *Water Research*. 43: 553-561.
- Eaton, A. 1995. Measuring UV-Absorbing Organic: A Standard Method. *Journal American Water Works Association*. 2: 86-90.
- Edzwald, J.K., Becker, W.C. and Wattier, K. 1985. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors. *Journal of the American Water Works Association*: 122-132.
- Edzwald, J.K. 1993. Coagulation in drinking water treatment: particles organics and coagulants. *Water Sciences and Technology*. 27: 21-25.

- Edzwald, J.K. and Tobiason, J.E. 1999. Enhanced coagulation: USA requirements and a broader view. In: *Removal of Humic Substances from Water*. Trondheim, Norway, IAWQ/IWSA Joint specialist group on particle separation.
- Ersan, M.S., Ladner, D.A. and Karanfil, T. 2015. *N*-Nitrosodimethylamine (NDMA) Precursors Leach from Nanofiltration Membranes. *Environmental Science Technology: letter*. 66-69.
- Gerecke, A.C. and Sedlak, D.L. 2003. Precursors *N*-Nitrosodimethylamine in Natural Waters. *Environmental Science Technology*. 37: 1331-1336.
- Government of Ontario. Safe Drinking Water Act. 2002. Ontario Regulation 169/03. Schedule 2.
- Grebel, J.E. and Suffet, I.H., 2007. Nitrogen-phosphorus detection and nitrogen chemiluminescence detection of volatile nitrosamines in water matrices: Optimization and performance comparison. Short communication. *Journal of Chromatography A*. 1175: 141-144.
- GSI chemical properties database. GSI Environmental Inc. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database.html> (15 ตุลาคม 2558)
- Hanigan, D., Zhang, J., Herckes, P., Krasner, S.W., Chen, C and Westerhoff, P. 2012. Adsorption of *N*-Nitrosodimethylamine Precursors by Powdered and Granular Activated Carbon. *Environmental Science & Technology*. 46: 12630-12639.
- Health Canada. 2003. *Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*. Ottawa.
- Homklin, S. 2004. Removal of hydrophobic and hydrophilic dissolved organic matters in natural water by alum coagulation. Master thesis. Chulalongkorn University.
- Hu, J., Song, H., Addison, J.W. and Karanfil, T. 2010. Halonitromethane formation potentials in drinking waters. *Water Research*. 44: 105-114.

- Huang, H., Young, T.A. and Jacangelo, J.G. 2008. Chlorine-induced permeability recovery for low-pressure membrane filtration of natural water. *Journal of Membrane Science* 325: 50-57.
- Huy, N.V., Muakami, M., Sakai, H., Oguma, K., Kosaka, K., Asami, M. and Takizawa, S. 2011. Occurrence and formation potential of N-nitrosodimethylamine in ground water and river water in Tokyo. *Water Research*. 45: 3369-3377.
- Hundt, T.R. and O'melia C.R. 1988. Aluminium-Fulvic Acid Interaction: Mechanism and Applications. *Journal American Water Works Association*. 80(4): 176-186.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). 1978. Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic risk of chemicals to humans. Volume 17. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=72&codcch=17> (19 ตุลาคม 2558)
- Ivancev-Tumbas, V., Dalmacijam, B., Tamas, Z. and Karlovic, E. 2002. The effect of different drinking water treatment processes on the rate of chloroform formation in the reactions of natural organic matter with hypochlorite. *Water Research*. 33: 3715-3722.
- Jacangelo, J.G., DeMaro, D.M. and Randtke, S.J. 1995. Selected process for removing NOM: An overview. *Journal American Water Works Association*. 87 (1): 64-77.
- James, W.L., Aiken, G.R., Bergamashi, B.A., Fram, M.S., Fujii, R., and Mopper, K. 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science Technology*. 37: 4702-4708.
- Janhom, T. 2004. Reduction of trihalomethane created from six fractions of dissolved organic matters in raw water supply by alum coagulation. Master thesis. Inter-Department Program in Environmental Management, Chulalongkorn University.

- Ji, Q., Liu, H., Hu, C., Wang, D. and Li, J. 2008. Removal of disinfection by-products precursors by polyaluminum chloride coagulation coupled with chlorination. *Separation and Purification Technology*. 62: 464-469.
- Jobb, D.B., Hunsinger, R.B., Meresz, O. and Taguchi, V. 1994. Removal of *N*-nitrosodimethylamine from the Oshweken (six nations) water supply. Energy Final Report Ontario Ministry of Environment and Energy.
- Julie, C., Minhan, D., Robert, F., and Xiaolin, L. 2004. Distribution of dissolved organic matter in the Peal River Estuary. *China Marine Chemistry*. 211-224.
- Kanokkantapong, V., Marhaba, T.F., Panyapinyophol, B. and Pavasant, P. 2006. FTIR evaluation of functional groups involved in the formation of haloacetic acids during the chlorination of raw water. *Journal of Hazardous Materials*. B136: 188-196.
- Kawamura, S. and Trussell R.R.1991. Main Features of Large Water Treatment Plants in Japan. *Journal American Water Works Association*. 83(6).
- Kim, H.C. and Yu, M.J. 2005. Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control. *Water Research*. 19: 4779-4789.
- Kim, H., Hong, J. and Lee, S. 2006. Fouling of microfiltration membranes by natural organic matter after coagulation treatment: A comparison of different initial mixing conditions. *Journal of Membrane Science*. 283: 266-272.
- Knight, N., Watson, K., Farré, M.J. and Shaw, G. 2012. *N*-nitrosodimethylamine and trihalomethane formation and minimisation in Southeast Queensland drinking water. *Environmental Monitoring and Assessment*. 184: 4207-4222.
- Krasner, S.W., Westerhoff, P., Chen, B., Amy, G., Nam, S., Chowdhury, Z., Sinha, S. and Rittmann, B. 2008. Contribution of Wastewater to DBP Formation. AWWA Research Foundation, Denver, Colorado.

- Krasner, S.W., Westerhoff, P., Chen, B., Rittmann, B.E. and Amy, G. 2009. Occurrence of Disinfection /byproducts in United States Wastewater Treatment Plant Effluents. *Environmental Science and Technology*. 43(21): 8320-8325.
- Kumsuvan, J. 2013. Reduction of *N*-nitrosodimethylamine precursors in raw water supply by enhanced coagulation with powder activated carbon. Master thesis. Interdisciplinary Program in Environmental Management, Chulalongkorn University.
- Laor, Y. and Avnimelech. 2002. Fractionation of compost-derived dissolved organic matter by flocculation process. *Organic*. 33: 257-263.
- Lee, N., Amy, G., Croue, J.P. and Buisson, H. 2004. Identification and understanding of fouling in low-pressure membrane (MF/UF) filtration by natural organic matter (NOM). *Water Research*. 38: 4511-4523.
- Lee, W. and Westerhoff, P. 2006. Dissolved organic nitrogen removal during water treatment by aluminum sulfate and cationic polymer coagulation. *Water Research*. 40: 3767-3774.
- Lee, W., Westerhoff, P. and Croues, J.P., 2007. Dissolved organic Nitrogen as a precursor for chloroform, dichloroacetonitrile, *N*-nitrosodimethylamine and trichloro nitromethane. *Environmental Science and Technology*. 41: 5485-5490.
- Lee, W., Westerhoff, P. and Esparza-Soto, M. 2006. Occurrence and removal of dissolved organic nitrogen in US water treatment plants. *AWWA*. 98 (10): 102-110.
- Leenheer, J.A., Noyes, T.I. and Steer, H.A. 1982. Determination of polar organic solute in oil-shale report water. *Environmental Science and Technology*. 16(10): 714-723.

- Leenheer, J.A. and Noyes, T.I. 1984. A filtration and column-adsorption or system for onsite concentration and fractionation of organic substances from large volume of water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2230 U.S. govt. Printing office Washington, D.C.
- Le Roux, J., Gallard, H. and Croué, J.-P. 2011. Chloramination of nitrogenous contaminants (pharmaceuticals and pesticides): NDMA and halogenated DBPs formation. *Water Research*. 45: 3164-3174.
- Li, A., Zhao, X., Mao, R., Liu, H. and Qu, J. 2014. Characterization of dissolved organic matter from surface waters with low to high dissolved organic carbon and the related disinfection byproduct formation potential. *Journal of Hazardous Material*. 271: 228-235.
- Liang, L. and Singer, P.C. 2003. Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acid and trihalomethanes in drinking water. *Environmental Science and Technology*. 37: 2920-2928.
- Lin, L., Xu, B., Lin, Y.L., Hu, C.Y., Ye, T., Zhang, T.Y. and Tian, F.X. 2014. A comparison of carbonaceous, nitrogenous and iodinated disinfection by-products formation potential in different dissolved organic fractions and their reduction in drinking water treatment processes. *Separation and Purification Technology*. 133: 82-90.
- Marhaba, T.F. and Pipada, N.J. 2000. Coagulation effectiveness in removing dissolved organic matter fractions. *Environmental Engineering Science*. 17(2), 107-115.
- Marhaba, T.F. and Van, D. 2000. The variation of mass disinfection by-products formation potential of dissolved organic matter fractions along a conventional surface water treatment plant. *Journal of Hazardous Materials*. A74: 133-147.

- Martin-Mousset, B., Croue, J. P., Lefebvre, E. and Legube B. 1997. Distribution and characterization of dissolved organic matter of surface waters. *Water Research*. 31: 541-553.
- Mash, H., Westerhoff K. P., Baker, A. L., Nieman A. R. and Nguyen, M. 2004. Dissolved organic matter in Arizona reservoirs: assessment of carbonaceous sources. *Organic Geochemistry*. 35: 831-843.
- Masschelein, W. 1992. Unit processes in drinking water treatment. New York America: Marcel Dekker, INC.
- Mitch, W.A. and Sedlak, D.L. 2002. Formation of N-Nitrosodimethylamine (NDMA) from Dimethylamine during Chlorination. *Environmental Science Technology*. 36, 588-595.
- Mitch, W.A., Gerecke, A.C. and Sedlak. D.L., 2003. A N-Nitrosodimethylamine (NDMA) precursor analysis for chlorination of water and wastewater. *Water Research*. 37, 3733-3741.
- Munch, J.W. and Basset, M.V., 2004. Method 521: Determination of Nitrosamines in drinking water by solid phase extraction and capillary column gas chromatography with large volume injection and chemical ionization tandem mass spectrometry (MS/MS). (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://www.epa.gov/microbes/documents/m_521.pdf (14 มีนาคม 2556)
- Musikavong, C. 2006. Characterization of fractionated dissolved organic matter in industrial estate wastewater using spectrofluorometry and pyrolysis GC/MS analysis. Doctor thesis. Chulalongkorn University.
- Musikavong, C., Inthanuchit, K., Srimuang, K., Suksaroj, T.T. and Suksaroj, C. 2013. Reduction of fractionated dissolved organic matter and their trihalomethane formation potential with enhanced coagulation. *Science Asia*. 39: 55-56.

- Musikavong, C. and Wattanachira, S. 2013. Identification of dissolved organic matter in raw water from reservoirs and canals as precursors for trihalomethane formation. *Environmental Science and Health*. 48: 760-771.
- Musikavong, C., Srimuang, K., Suksaroj, T.T. and Suksaroj, C. 2015. Formation of trihalomethanes of dissolved organic matter fractions in reservoir and canal waters. *Environmental Science and Health*. Part A. accepted.
- Nagare, H., Aso, T., Ebie, Y. and Ebie, K. 2008. Removal of humic substances by repeated mixing with PACl. Conference proceedings international water association (IWA) specialist conference on: natural organic matter: from source to top. 2-4 September 2008. Bath, UK.
- Najm, I., Snoeyink, V.L., Lykins Jr.B.W. and Adams, J.Q. 1991. Using powdered activated carbon: a critical review. *Journal American Water Works Association*. 83(1): 65-76.
- Najm, I. and Trussell, R.R. 2001. NDMA Formation in Water and Wastewater. *AWWA*. 93(2): 92-99.
- Nawrocki, J. and Andrzejewski, P., 2011. Nitrosamines and water review. *Hazardous Materials*. 189: 1-18.
- Newcombe, G., Drikas, M., Assem, S. and Becketi, R. 1997. Influence of characterised natural organic material on activated carbon adsorption: I characterization of concentrated reservoir water. *Water Research*. 31: 965-972.
- Nissinen, T.K., Miettinen, I.T., Martikainen, P.J. and Vartiainen, T. 2001. Molecular size distribution of natural organic matter in raw and drinking waters. *Chemosphere*. 45: 865-873.

- Owen, D.M., Amy, G.L and Chowdhury, Z.K. 1995. Characterization of natural organic matter and its relationship to treatability. *Journal American Water Works Association*. 87: 5-6.
- Padhye, L., Wang, P., Karanfil, T. and Huang, C.-H. 2010. Unexpected Role of Activated Carbon in Promoting Transformation of Secondary Amines to N-Nitrosamines. *Environmental Science and Technology*. 44: 4161-4168.
- Panyapinyopol, B., Marhaba, T.F., Kanokkantapong, V. and Pavasant, P. 2005. Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water. *Journal of Hazardous Materials*. B120: 229-236.
- Pernet-Coudrier, B., Varrault, G., Saad, M., Croue, J.P., Dignac, M.F. and Mouchel, J.M. 2011. Characterization of dissolved organic matter in Parisian urban aquatic systems: predominance of hydrophilic and proteinaceous structures. *Biogeochemistry*. 106: 89-106
- Peuravuori, J. and Pihlaja, K. 1997. Isolation and characterization of natural organic matter from lake water: comparison of isolation with solid adsorption and tangential membrane filtration. *Environment International*. 23: 441-451
- Peuravuori, J., Lehtonen, T. and Pihlaja, K. 2002. Sorption of aquatic humic matter by DAX-8 and XAD-8 resins comparative study using pyrolysis gas chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 219-226.
- Plewa, M.J., Wagner, E.D., Jazwierska, P., Richardson, S.D., Chen, P.H. and McKague, A.B., 2004. Halonitromethane drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity. *Environmental Science and Technology*. 38(1): 62-8.
- Pozzi, R., Bocchini, P., Pinelli, F., Galletti, G.C. 2011. Determination of nitrosamines in water by gas chromatography/chemical ionization/selective ion trapping mass spectrometry. *Chromatography A*. 1218: 1808-1814.

- Pramanik, B.K., Choo, K-H., Pramanik, S.K., Suja, F., Jegatheesan, V. 2015. Comparisons between biological filtration and coagulation processes for the removal of dissolved organic nitrogen and disinfection by-products precursors. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 104: 164-169.
- Qian, Y., Wu, M., Wang, W., Chen, B., Zheng, H., Krasner, W.S., Hrudey, S.E. and Li, X-F. 2014. Determination of 14 Nitrosamines at Nanogram per Liter Levels in Drinking Water. *Analytical chemistry*. American Chemical Society. 1330-1336.
- Qin, C., Liu, H., Liu, L., Smith, A., Sedlak, D.L. and Gu, A.Z. 2015. Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents *Science of the Total Environment*. 511: 47-53.
- Recknow, D.A., Bose, P., Bezbarua, B., Hesse, E.M. and Mcknight, A.P. 1992. Transformations of natural organic material during preozonation. EPA report. USEPA, drinking water research division, Cincinnati, Ohio.
- Rizzo, L., Belgiorno, V., Gallo, M. and Meric, S. 2005. Removal of THM precursors from a high-alkaline surface water by enhanced coagulation and behavior of THMFP toxicity on *D. magna*. *Desalination* 176: 177-188.
- Russell, C.G., Blute, N.K., Via, S., Wu, X. and Chowdhury, Z. 2012. Nationwide assessment of nitrosamine occurrence and trends. American Water Works Association.
- Sacher, F., Lenz, S. and Brauch, H.-J. 1997. Analysis of primary and secondary aliphatic amines in waste water and surface water by gas chromatography-mass spectrometry after derivatization with 2,4-dinitrofluorobenzene or bezenosulfonyl chloride. *Journal of Chromatography A*. 764: 85-93.
- Sacher, F., Schmidt, C., Lee, C. and Von Gunten, U. 2008. Strategies for Minimizing Nitrosamine Formation During Disinfection. AWWA.

- Schmidt, C.K. and Brauch, H.-J. 2008. N,N-dimethylsulfamide as precursor for N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation upon ozonation and its fate during drinking water treatment. *Environmental Science and Technology*. 42(17): 6340-6346.
- Schreiber, I.M. and Mitch, W.A. 2006. Nitrosamines Formation Pathway Revisited: The Importance of Chloramine Speciation and Dissolve Oxygen. *Environmental Science and Technology*. 40: 6007-6014.
- Shah, D.S. and Mitch, W.A. 2011. Halonitroalkanes, Halonitriles, Haloamides and N-Nitrosamines: A critical Review of Nitrogenous Disinfection Byproduct Formation Pathways. *Environmental Science and Technology*. 46: 119-131.
- Sharma, V.K. 2012. Kinetic and mechanism of formation and destruction of N-nitroso dimethylamine in water-a review. *Separation and Purification technology*. 88: 1-10.
- Sharp, E.L., Jarvis, P., Parsons, S.A. and Jefferson, B. 2006. Impact of fractional character on the coagulation of NOM. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Engineering*. 286: 104-111.
- Singer, P.C. 1999. Humic substances as precursor for potentially harmful disinfection by-products. 40 (9): 25-30.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. 1980. *Water Chemistry*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons.
- Srimuang, K. 2011. Characterization and Reduction Dissolved Organic Matter in Raw Water Supply from U-Tapao Canal by Enhanced Coagulation. Master thesis. Environmental Engineering, Prince of Songkla University.

- Sumpattavorachai, S. 2013. Treatment of N-nitrosodimethylamine precursors in coagulated water by nanofiltration and reverse osmosis membranes. Master thesis. International Program in Environmental Management, Chulalongkorn University.
- Tan, Y., Kilduff, J.E., Kitis, M. and Karanfil, T. 2005. Dissolved organic matter removal and disinfection byproduct formation control using ion exchange. *Desalination*. 176: 189-200.
- Tomkins, B.A., Griest, W.H., and Higgins, C.E. 1995. Determination of nitrosodimethylamine at part-per -trillion levels in drinking waters and contaminated groundwaters. *Analytical Chemistry*. 67: 4387-4395.
- Trusell, R. R. and Umphres, M.D. 1978. The formation of trihalomethanes. *Journal of the American Water Works Association*. 70 (11): 604-612.
- United State Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). 2006. Public Health goal for N-Nitrosodimethylamine in Drinking Water. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://oehha.ca.gov/water/phg/pdf/122206NDMAphg .pdf](http://oehha.ca.gov/water/phg/pdf/122206NDMAphg.pdf) (9 สิงหาคม 2558).
- U.S.EPA. 1998. National primary drinking water regulations; disinfectants and disinfection byproducts; final rule. *Federal Register*. 63: 69390-69476.
- U.S.EPA. 1999. Chloramines; EPA Guidance Manual Alternative Disinfectants and Oxidants. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/mdbp/upload/2001_01_12_mdbp_alter_chapt_6.pdf. (6 ตุลาคม 2558).
- U.S.EPA. 1999. Enhanced coagulation and enhanced precipitate softening guidance manual. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: [http://www.epa.gov/safewater/mdbp/coaguide .pdf](http://www.epa.gov/safewater/mdbp/coaguide.pdf). (24 พฤศจิกายน 2556).

- U.S.EPA. 1999. *Integrated Risk Information System (IRIS) on N-Nitrosodimethylamine*. National Center for Environmental Assessment. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=45 (19 ตุลาคม 2558)
- U.S.EPA. 2009. EPA Chloramines Q&A's. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://www.epa.gov/safewater/disinfection/chloramine/pdfs/all29_q.pdf (5 ตุลาคม 2558).
- U.S.EPA. 2009. List of established maximum contaminant levels (MCL) and their maximum contaminant level goals (MCLG) (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <http://www.epa.gov/safewater/chemicalcontaminantrules/basicinformation.html> (17 กุมภาพันธ์ 2556).
- U.S.EPA. 2010. Emerging Contaminant *N*-nitroso-dimethylamine (NDMA). (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://www.epa.gov/fedfac/documents/emerging_contaminant_ndma.pdf. (16 เมษายน 2555).
- U.S.EPA. 2012. Information about Chloramine in Drinking Water. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : <http://www.epa.gov/safewater/disinfection/chloramine/pdfs/chloramine2.pdf> (5 ตุลาคม 2558).
- U.S.EPA. 2014. Technical Fact Sheet-N-Nitroso-dimethylamine (NDMA). (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/ffrrofact_sheet_contaminant_ndma_january2014_final.pdf (16 ตุลาคม 2558)
- Uyak, V., Yavuz, S., Toroz, I., Ozaydin, S. and Genceli, E. 2007. Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption. *Desalination*. 216: 334-344.
- Velasco, U.I., Alvarez-Uriarte, J.I. and Gonzalez-Velasco, J.R. 2007. Removal and structural changes in natural organic matter in a Spanish water treatment plant using nascent chlorine. *Separation and Purification Technology*. 57: 152-160.

- Viraraghavan, T. and Wimmer C.H., 1988. Polyaluminium Chloride as an Alternative to Alum Coagulation a Case Study. *J Agua*. 6: 316-321.
- Wadhawan, T., Simsek, H., Kasi, M., Knutson, K., Prüß, B., McEvoy., J. and Khan, E. 2014. Dissolved organic nitrogen and its biodegradable portion in a water treatment plant with ozone oxidation. *Water Research*. 54: 318-326.
- Wang, W., Ren, S., Zhang, H., Yu, J., An, W., Hu, J. and Yang, M. 2011. Occurrence of nine nitrosamines and secondary amines in source water and drinking water: Potential of secondary amines as nitrosamine precursors. *Water Research*. 45: 4930-4938.
- Wert. E.C. and Rosario-Ortiz, F.L. 2013. Intracellular Organic Matter from Cyano bacteria as a Precursor for Carbonaceous and Nitrogenous Disinfection Byproducts. *Environmental Science & Technology*. 47: 6332-6340.
- Westerhoff, P. and Mash., H. 2002. Dissolved organic nitrogen in drinking water supplies. a review. *AQUA* 51: 415-488.
- WHO. 1996. Chlorine in Drinking-water; Background document for development of *WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chlorine.pdf (6 ตุลาคม 2558).
- WHO. 1998. Guidelines for drinking water quality second edition addendum to volume 2 health criteria and other supporting information addendum. (ออนไลน์) สืบค้นจาก: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/2edadd_vol2a.pdf (1 ตุลาคม 2556).
- WHO. 2008. N-nitrosodimethylamine in Drinking-water. (ออนไลน์) สืบค้นจาก : http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/ndma_2add_feb_2008.pdf (24 กรกฎาคม 2558).

- Wu, X., Ge, D., Wang, D. and Tang, H. 2007. Distinct coagulation mechanism and model between alum and high AL_{13} -PACL. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Engineering*. 305: 89-96.
- Xu, B., Li, D-P., Li, W., Xia, S-J., Lin, Y-L., Hu, C-Y., Zhang, C-J and Gao, N-Y. 2010. Measurement of dissolved organic nitrogen (DON) in water samples with nanofiltration pretreatment. *Water Research*. 44: 5376-5384.
- Xu, B., Ye, T., Li, D-P., Hu, C-Y., Lin, Y.-L., Xia, S.-J., Tian, F.-X. and Gao, N.-Y. 2011. Measurement of dissolve organic nitrogen in a drinking water treatment plant: size, fraction, fate and relation to water quality parameters. *Science of the Total Environment*. 409: 1116-1122.
- Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Chow, C. and Liu, H. 2008 Mechanism of natural organic matter removal by polyaluminum chloride: Effect of coagulant particle size and hydrolysis kinetics. *Water Research*. 42: 3361-3370.
- Yan, M., Wang, D., Qu, J., Ni, J. and Chow, C. 2008. Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization. *Water Research*. 42: 2278-2286.
- Yan, M., Wang, D., Yu, J., Ni, J., Edwards, M. and Qu, J. 2008. Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: role of pH/Alkalinity and speciation. *Chemosphere*. 71: 1665-1673.
- Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Ni, W. and Van L. J. 2009. Natural organic matter (NOM) removal in a typical North-China water plant by enhanced coagulation: targets and techniques. *Separation and Purification Technology*. 68: 320-327.
- Zhang, H., Zhang, K., Jin, H., Gu, L. and Yu, X. 2015. Variations in dissolved organic nitrogen concentration in biofilters with different media during drinking water treatment. *Chemosphere*. 139: 652-658.

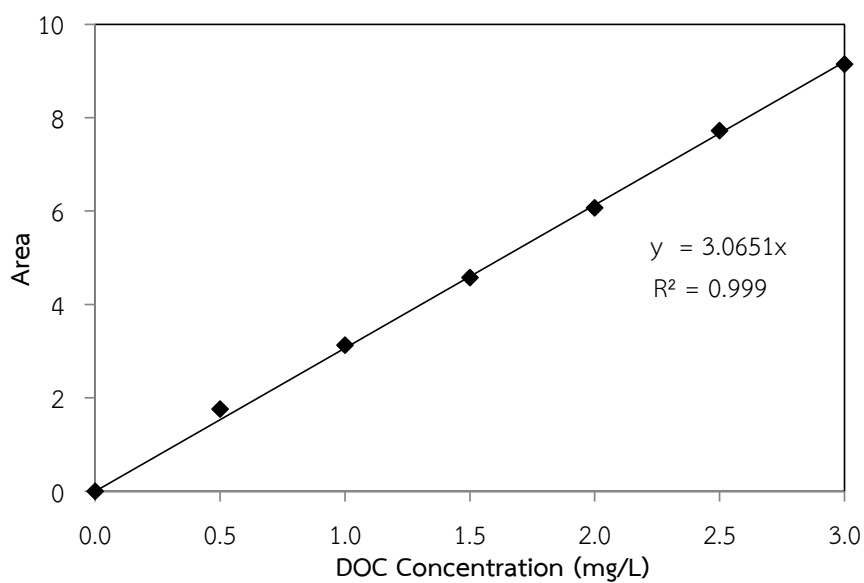
Zularisam, A.W., Ismail, A.F., Salim, M.R., Sakinah, M. and Ozaki, H. 2007. The effects of natural organic matter (NOM) fractions on fouling characteristics and flux recovery of ultrafiltration membranes. *Desalination*. 212: 191-208.

ภาคผนวก

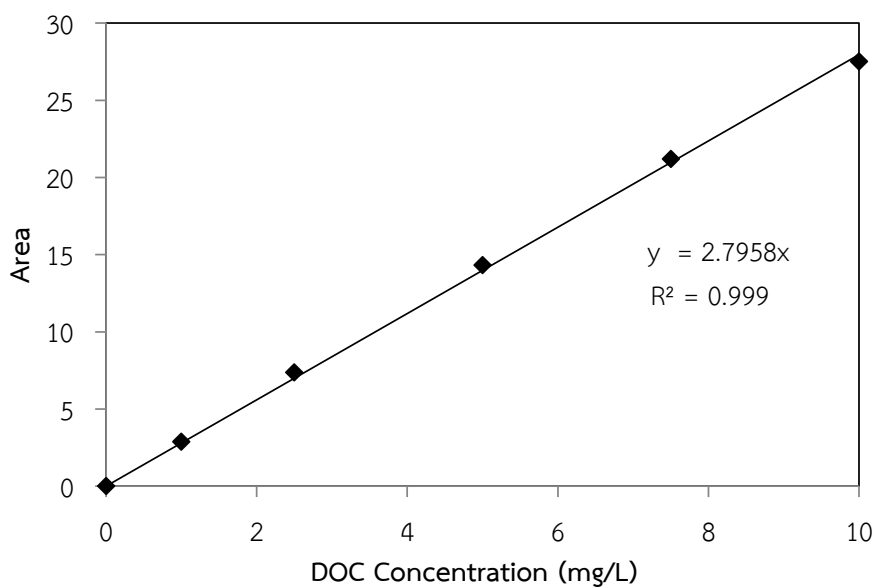
ภาคผนวก ก

กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

ก-1 กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ DOC



รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ค่า DOC ที่ความเข้มข้น 0-3 mg/L



รูปที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของการวิเคราะห์ค่า DOC ที่ความเข้มข้น 0-10 mg/L

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ TDN, Nitrosamines, NDMA และ NDMAFP ในน้ำดิบและน้ำประปา

ตารางที่ ข-1 ค่า TDN ของน้ำดิบและน้ำประปา

ครั้งที่	TDN (mg-N/L)							
	อ่างเก็บน้ำ	อ่างเก็บน้ำ	จุดสูบน้ำดิบ	จุดสูบน้ำดิบ	จุดสูบน้ำดิบ	น้ำประปา	น้ำประปา	น้ำประปา
	สะเตา	คลองหลา	ประปาสะเตา	ประปาพะตง	ประปาหาดใหญ่	สะเตา	พะตง	หาดใหญ่
ครั้งที่ 1	0.20	0.34	0.38	1.74	1.69	0.32	2.32	1.43
ครั้งที่ 2	0.23	0.53	N.D.	2.48	3.90	0.24	1.96	2.16

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้)

ตารางที่ ข-2 ชนิดของสาร Nitrosamines ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบและน้ำประปา

ตัวอย่าง	ครั้งที่	Nitrosamines	ปริมาณสาร NDMA (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{Cl2} (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{NH2Cl} (ng/L)
อ่างเก็บน้ำสะเตา	1	N.D.	< 237	< 237	< 237
	2	N.D.	< 237	< 237	< 237
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	1	N.D.	< 237	< 237	< 237
	2	N.D.	< 237	< 237	< 237
น้ำดิบประปาสะเตา	1	N.D.	< 237	< 237	< 237
	2	N.D.	< 237	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้), NDMAFP_{Cl2} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH2Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L

ตารางที่ ข-2 ชนิดของสาร Nitrosamines ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบ และน้ำประปา (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	Nitrosamines	ปริมาณสาร NDMA (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{Cl2} (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{NH2Cl} (ng/L)
น้ำดิบประปา	1	N.D.	< 237	< 237	< 237
พะตง-พังลา	2	N.D.	< 237	< 237	< 237
น้ำดิบประปา	1	N.D.	< 237	< 237	< 237
หาดใหญ่	2	N.D.	< 237	< 237	< 237
น้ำประปา	1	N.D.	< 237	-	-
สะเดา	2	N.D.	< 237	-	-
น้ำประปา	1	N.D.	< 237	-	-
พะตง-พังลา	2	N.D.	< 237	-	-
น้ำประปา	1	N.D.	< 237	-	-
หาดใหญ่	2	N.D.	< 237	-	-

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้), (-) หมายถึง ไม่ทำการวิเคราะห์, NDMAFP_{Cl2} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH2Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตารางที่ ค-1 ค่าความเป็นด่างและความขุ่นของน้ำดิบประปาหาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Dose (mg/L)	PACl				PACl 40 mg/L + PAC			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	ความขุ่น (NTU)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	ความขุ่น (NTU)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	ความขุ่น (NTU)	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	ความขุ่น (NTU)
0	19	38.50	26	9.39	19	38.50	26	9.39
10	19	1.66	27	1.21	17	1.24	34	0.93
20	19	0.47	27	0.47	20	0.57	34	0.52
40	20	0.35	26	0.31	18	0.43	33	0.72
60	19	0.33	26	0.30	18	0.94	34	0.93
80	19	0.39	28	0.32	17	1.21	33	1.04

ตารางที่ ค-2 ค่า NH₃, NO₃⁻, NO₂⁻ และ TDN ของน้ำดิบประปาหาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน

Dose (mg/L)	PACl								PACl 40 mg/L + PAC							
	ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2				ครั้งที่ 1				ครั้งที่ 2			
	NH ₃	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	TDN	NH ₃	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	TDN	NH ₃	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	TDN	NH ₃	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	TDN
0	0.74	0.6	0.040	1.69	0.98	1.6	1.203	3.90	0.74	0.6	0.040	1.69	0.98	1.6	1.203	3.90
10	0.64	0.5	0.039	1.47	1.08	1.4	1.130	4.32	0.63	0.7	0.002	0.99	0.96	1.5	0.064	3.46
20	0.64	0.6	0.039	1.53	1.10	1.6	0.127	3.50	0	0.6	0.002	0.86	0.94	1.4	0.064	3.29
40	0.63	0.6	0.040	1.47	1.08	1.6	0.128	3.46	0	0.6	0.004	0.90	0.93	1.4	0.064	3.21
60	0.63	0.6	0.040	1.52	1.07	1.5	0.126	3.39	0	0.6	0.003	0.87	0.91	1.3	0.064	3.06
80	0.63	0.6	0.040	1.49	1.07	1.6	0.129	3.45	0	0.7	0.003	0.96	0.90	1.6	0.064	3.39

หมายเหตุ: NH₃, NO₃⁻, NO₂⁻ และ TDN หน่วย mg-N/L

ตารางที่ ค-3 ค่า DOC และประสิทธิภาพการกำจัด DOC โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาหาดใหญ่

Dose (mg/L)	PACl				PACl 40 mg/L + PAC			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	DOC (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DOC (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DOC (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DOC (mg/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
0	2.05	-	3.93	-	2.05	-	3.93	-
10	1.65	20	3.37	14	1.31	36	2.53	36
20	1.50	27	3.17	19	1.30	37	2.46	37
40	1.31	36	2.51	36	1.21	41	2.30	41
60	1.25	39	2.38	39	1.12	45	2.19	44
80	1.23	40	2.50	36	1.05	49	2.02	49

ตารางที่ ค-4 ค่า UV-254 และประสิทธิภาพการกำจัด UV-254 โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาหาดใหญ่

Dose (mg/L)	PACl				PACl 40 mg/L + PAC			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	UV-254 (cm ⁻¹)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	UV-254 (cm ⁻¹)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	UV-254 (cm ⁻¹)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	UV-254 (cm ⁻¹)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
0	0.143	-	0.132	-	0.143	-	0.132	-
10	0.047	67	0.090	32	0.029	80	0.053	60
20	0.037	74	0.072	45	0.028	80	0.051	61
40	0.029	80	0.055	58	0.024	83	0.046	65
60	0.025	83	0.049	63	0.022	85	0.045	66
80	0.022	85	0.049	63	0.019	87	0.040	70

ตารางที่ ค-5 ค่า DON และประสิทธิภาพการกำจัด DON โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาหาดใหญ่

Dose (mg/L)	PACl				PACl 40 mg/L + PAC			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	DON (mg-N/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DON (mg-N/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DON (mg-N/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	DON (mg-N/L)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
0	0.31	-	1.12	-	0.31	-	1.12	-
10	0.29	6	0.71	37	0.27	13	0.94	16
20	0.25	19	0.67	40	0.26	16	0.89	21
40	0.20	35	0.65	42	0.30	3	0.82	27
60	0.25	19	0.69	38	0.27	13	0.79	29
80	0.22	29	0.65	42	0.26	16	0.83	26

ตารางที่ ค-6 ค่า SUVA และประสิทธิภาพการกำจัด SUVA โดยกระบวนการโคแอกกูเลชันของน้ำดิบประปาหาดใหญ่

Dose (mg/L)	PACl				PACl 40 mg/L + PAC			
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	SUVA (L/mg-m)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	SUVA (L/mg-m)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	SUVA (L/mg-m)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)	SUVA (L/mg-m)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
0	7.0	-	3.4	-	7.0	-	3.4	-
10	2.8	59	2.7	21	2.2	69	2.1	38
20	2.5	65	2.3	33	2.2	69	2.1	39
40	2.2	69	2.2	36	2.0	72	2.0	41
60	2.0	71	2.1	39	2.0	72	2.1	40
80	1.8	74	2.0	42	1.8	74	2.0	42

ตารางที่ ค-7 ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ของน้ำดิบประปาหาดใหญ่ที่ผ่านกระบวนการ
โคแอกกูเลชัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ปริมาณสาร NDMA (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{Cl₂} (ng/L)	ปริมาณสาร NDMAFP _{NH₂Cl} (ng/L)
PACl 40 mg/L	1	< 237	< 237	< 237
	2	< 237	< 237	< 237
PACl 40 mg/L +	1	< 237	< 237	< 237
PAC 60 mg/L	2	< 237	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.D. หมายถึง Not detected (ไม่สามารถตรวจวัดได้), NDMAFP_{Cl₂} หมายถึง NDMAFP
ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH₂Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วย
คลอรามิน, ซีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร
NDMA = 237 ng/L

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์น้ำที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation

ตารางที่ ง-1 ค่า DOC, DON และ NDMAFP ของน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation

ตัวอย่าง	กลุ่มสารอินทรีย์	DOC (mg/L)		DON (mg-N/L)		NDMAFP _{Cl₂} (ng/L)		NDMAFP _{NH₂Cl} (ng/L)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
		อ่างเก็บน้ำสะเดา	HPO	0.86	1.04	N.A.	N.A.	< 237	< 237
	TPI	0.50	0.56	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.79	0.81	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	HPO	1.33	1.10	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	TPI	0.50	0.56	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.97	0.78	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, NDMAFP_{Cl₂} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH₂Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L

ตารางที่ ง-1 ค่า DOC, DON และ NDMAFP ของน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation (ต่อ)

ตัวอย่าง	กลุ่มสารอินทรีย์	DOC (mg/L)		DON (mg-N/L)		NDMAFP _{Cl₂} (ng/L)		NDMAFP _{NH₂Cl} (ng/L)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
		จุดสูบน้ำดิบประปาสะเดา	HPO	1.06	0.96	N.A.	N.A.	< 237	< 237
	TPI	0.45	0.49	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.63	0.71	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
จุดสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังงา	HPO	1.8	1.23	0.07	0.01	< 237	< 237	< 237	< 237
	TPI	0.64	0.58	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	1.05	1	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
จุดสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่	HPO	1.31	1.64	N.A.	0.03	< 237	< 237	< 237	< 237
	TPI	0.45	0.62	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.76	1.19	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, NDMAFP_{Cl₂} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH₂Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L

ตารางที่ ง-2 ค่า DOC, DON และ NDMAFP ของน้ำจากการโคแอกกูเลชันที่ผ่านกระบวนการ resin fractionation

ตัวอย่าง	กลุ่มสารอินทรีย์	DOC (mg/L)		DON (mg-N/L)		NDMAFP _{Cl₂} (ng/L)		NDMAFP _{NH₂Cl} (ng/L)	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
PACl 40 mg/L	HPO	0.88	1.23	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	TPI	0.53	0.68	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.60	0.89	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
PACl 40 mg/L + PAC 60 mg/L	HPO	0.72	1.02	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	TPI	0.49	0.59	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237
	HPI	0.42	0.72	N.A.	N.A.	< 237	< 237	< 237	< 237

หมายเหตุ: N.A. หมายถึง Not available (ไม่สามารถหาค่าได้), HPO หมายถึง Hydrophobic organic fraction, TPI หมายถึง Transphilic organic fraction, HPI หมายถึง Hydrophilic organic fraction, NDMAFP_{Cl₂} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรีน, NDMAFP_{NH₂Cl} หมายถึง NDMAFP ของการบ่มตัวอย่างด้วยคลอรามิน, ขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ) ของสาร NDMA = 237 ng/L

ภาคผนวก จ

การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์

จ-1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (method validation)

การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ทำโดยการทดสอบ Performance characteristics ต่างๆ ได้แก่ Linearity, Accuracy, Limit of Detection (LOD) และ Limit of Quantitation (LOQ) โดยใช้ตัวอย่างน้ำดิบประปาและน้ำประปาเป็น sample blank สำหรับการวิเคราะห์สาร NDMA ในเชิงปริมาณ ทำโดยการทดสอบตามวิธีการมาตรฐาน EPA 521

ความเป็นเส้นตรง (linearity) ทดสอบโดยการนำกราฟมาตรฐานที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) โดยค่าที่ยอมรับได้ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.995 (แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม, 2534)

ขีดจำกัดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) เป็นความเข้มข้นต่ำสุดของสารในตัวอย่างที่สามารถตรวจพบได้ ซึ่ง LOD คือปริมาณสารที่ให้สัญญาณเป็น 3 เท่าของสัญญาณรบกวน

ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (limit of quantitation, LOQ) เป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารได้โดยที่มีความแม่นยำและความเที่ยงเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่ง LOQ คือปริมาณสารที่ให้สัญญาณเท่ากับ 10 เท่าของสัญญาณรบกวน

LOD และ LOQ ทดสอบโดยการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุดจำนวน 10 ซ้ำ หาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) และนำค่า SD มาคำนวณดังสูตรต่อไปนี้

$$LOD = 3SD$$

$$LOQ = 10SD$$

ความแม่นยำ (accuracy) การหาค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสารที่ต้องการวิเคราะห์ เป็นการทดสอบ fortified sample โดยการ spike สารละลายมาตรฐานที่ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่าง เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารมาตรฐานลงไปวิเคราะห์อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสาร NDMA ตามวิธีการมาตรฐาน EPA 521 แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสารมาตรฐาน (% recovery) ในน้ำตัวอย่าง ดังสมการที่ (1)

$$\% Recovery = \frac{C_s - C_u}{C} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_s คือ ความเข้มข้นที่วัดได้ของ fortified sample

C_u คือ ความเข้มข้นที่วัดได้ของตัวอย่าง

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไปในตัวอย่างไม่

จ-2 ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (limit of detection, LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (limit of quantitation, LOQ)

จากการทดสอบหาค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดและขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร NDMA ตามวิธีการมาตรฐาน EPA 521 โดยการวิเคราะห์สารมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 200 $\mu\text{g/L}$ จำนวน 10 ครั้ง ด้วยเครื่อง Gas Chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector (GC-NPD) คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ได้เท่ากับ 4.9 ดังนั้นค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด (LOD) ของ NDMA มีค่าเท่ากับ 14.7 $\mu\text{g/L}$ สำหรับค่าขีดจำกัดต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (LOQ) ของ NDMA มีค่าเท่ากับ 237 ng/L

ค่าความแม่นยำของการสกัดสาร NDMA

ค่าความแม่นยำของการสกัดสาร NDMA แสดงด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน (% recovery) ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร NDMA ทำการทดสอบโดยการเติมสารมาตรฐาน NDMA ที่มีความเข้มข้น 300, 600 และ 1,000 $\mu\text{g/L}$ น้ำดิบประปาและน้ำประปา โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งสำหรับแต่ละความเข้มข้นของสาร NDMA จากนั้นนำมาสกัดโดยวิธี Solid Phase Extraction (SPE) และทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-NPD จากการทดสอบพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร NDMA ในน้ำดิบประปาและน้ำประปาขนาดใหญ่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.7 และ 57.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวพณวรรณ ทองช่าง	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410120042	
วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วุฒิปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2554

ทุนการศึกษา

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประเภททั่วไปและสิ่งประดิษฐ์ ประจำปี 2555 ภายใต้สัญญาเลขที่ ENG๕๕๐๓๖๙S

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

พณวรรณ ทองช่าง, ชัยศรี สุขสาโรจน์ และ จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์. 2556. ปริมาณโพธิ์อะลูมิเนียมเคลือบไรต์ที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาด้วยการโคแอกกูเลชัน. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 12 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชาออร์คิด จังหวัดขอนแก่น วันที่ 27-29 มีนาคม 2556.