

# รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดสารตั้งต้นและโอกาสการก่อตัวของ  
สารเอ็น-ไนโตรซามีนของน้ำดิบประปาจากลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา

ผู้วิจัย

ผศ.ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกะวงศ์

ดร.อรมาศ สุทธินุ่น

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2555

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตรวจวัดสารตั้งต้นและโอกาสการก่อตัวของ  
สารเอ็น-ไนโตรซามีนของน้ำดิบประปาจากกลุ่มน้ำคลองอุตตะภา

ผู้วิจัย

ผศ.ดร.จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์

ดร.อรมาศ สุทธินน

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
งบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2555

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดระดับการปนเปื้อนของสารตั้งต้นของสารกลุ่มไนโตรซามีนในน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบประปา และน้ำประปาบริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา จังหวัดสงขลา ประเทศไทย ตลอดจนเพื่อวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (*N*-Nitrosodimethylamine formation potential, NDMA-FP) ของน้ำตัวอย่าง ในงานวิจัยได้เก็บน้ำตัวอย่าง 2 ครั้งจาก อ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบประปาและน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาคสะเดา การประปาส่วนภูมิภาคพะตง-พังงา และการประปาส่วนภูมิภาคหาดใหญ่ ตลอดจนเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อบาดาลบริเวณหลุมฝังกลบขยะแบบเปิด บ่อบาดาลบริเวณใกล้เคียงกับหลุมฝังกลบขยะแบบเปิด และบ่อบาดาลบริเวณชุมชนเทศบาลตำบลคอกหงส์ จังหวัดสงขลา สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) ในน้ำดิบประปามีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่า DOC ของน้ำจากแหล่งน้ำอื่นๆ โดยน้ำดิบประปามีค่า DOC อยู่ในช่วง 2.2-4.5 mg/L น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.9-2.3 mg/L น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีนมีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.5-2.7 mg/L และน้ำบาดาลมีค่า DOC อยู่ในช่วง 0.3-0.8 mg/L ค่าสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) ของน้ำดิบประปามีค่าอยู่ในช่วง 0.04-0.88 mg/L รองลงมาคือน้ำประปาก่อนและหลังเติมการคลอรีนมีค่า DON อยู่ในช่วง 0.01-1.47 mg/L และน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DON อยู่ในช่วง 0.02-0.08 mg/L ตามลำดับ โดยตรวจไม่พบค่า DON ในน้ำบาดาล การตรวจวัดระดับการปนเปื้อนของสาร *N*-Nitrosodimethylamine (NDMA) ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบประปา น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีน และน้ำบาดาล ผลที่ได้คือตรวจไม่พบสาร NDMA และค่า NDMA-FP ที่ระดับต่ำสุดของการตรวจวัดที่ 17.4 ng/L ตลอดจนตรวจไม่พบสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ NDMA, *N*-nitrosomethylethylamine, *N*-nitrosodiethylamine, *N*-nitrosodi-n-propylamine, *N*-nitrosopiperidine, *N*-nitrosodi-n-butylamine, *N*-nitroso-pyrrolidine, *N*-nitrosomorpholine และ *N*-nitrosodiphenylamine ที่ระดับต่ำสุดของการตรวจวัดที่ 300 ng/L น้ำจากอ่างเก็บน้ำตรวจพบสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกเอมีน ได้แก่ สาร aniline อยู่ในช่วง 123-129 ng/L น้ำดิบประปามีสาร aniline อยู่ในช่วง 111-177 ng/L น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีนมีสาร aniline อยู่ในช่วง 114-164 ng/L และน้ำบาดาลมีสาร aniline อยู่ในช่วง ตรวจไม่พบจนถึง 141 ng/L นอกจากนี้ได้ตรวจพบกลุ่มสารอะลิฟาติกเอมีน 3 ชนิด ได้แก่ ไดเมทิลเอมีน (dimethylamine, DMA) ไดเอทิลเอมีน (diethylamine, DEA) และไดบิวทิลามีน (dibutylamine, DBA) ในน้ำตัวอย่าง โดยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบประปา น้ำประปาก่อนและหลังการเติมคลอรีน และน้ำบาดาลมีผลรวมของสารตั้งต้น DMA DEA และ DBA อยู่ในช่วง 4.2-16.2, 5.6-22.9, 4.2-20.2 และ 5.6-17.6  $\mu\text{g}$  DMA/L ตามลำดับ การประยุกต์ใช้เทคนิค fluorescent excitation-emission matrix (FEEM) เพื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะสารปนเปื้อนในน้ำดิบประปาตรวจพบตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์ของกลุ่มสาร tryptophan like substances ที่  $230\text{nm}_{\text{Ex}}/345\text{nm}_{\text{Em}}$  และ  $280\text{nm}_{\text{Ex}}/355\text{nm}_{\text{Em}}$  และสาร humic and fulvic acid-like substances ที่  $230\text{nm}_{\text{Ex}}/420\text{nm}_{\text{Em}}$ ,  $275\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  และ  $330\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  ส่วนน้ำในอ่างเก็บน้ำตรวจพบฟลูออเรสเซนซ์ของกลุ่มสาร humic and fulvic acid-like substances ที่  $230\text{nm}_{\text{Ex}}/420\text{nm}_{\text{Em}}$ ,  $275\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  และ  $330\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  การลดลงของค่าผลรวมความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่พีคของกลุ่มสาร humic and fulvic acids-like substances มีแนวโน้มเหมือนกับการลดลงของค่า DOC

## Abstract

This research is aimed at determining the level of precursors of *N*-nitrosamine in reservoir water, raw water supply, and water supply in the U-Tapao Canal River Basin, Songkhla, Thailand. The *N*-nitrosodimethylamine formation potential (NDMA-FP) of water samples was analyzed. Water samples were collected twice from Sadao and Klongla reservoirs, raw water supply and water supply (before and after chlorination) from Sadao, Patong-Pangla, and Hat Yai water treatment plants. Groundwater samples from a well in the open dumping landfill of Songkhla, a well nearby the open dumping landfill, and a well in Korhong municipality were collected. Among all samples, the highest value of dissolved organic carbon (DOC) between 2.2 and 4.5 mg/L was found in the raw water supply. The ranges of DOC from 1.9 to 2.3, 1.5 to 2.7, and 0.3-0.8 mg/L were detected in water samples from reservoir, water supply, and groundwater, respectively. The raw water supplies before and after chlorination showed DON from 0.04 to 0.88 mg/L. The range of DON from 0.01 to 1.47 mg/L was found in the water supply. DON of reservoir water ranged from 0.02 to 0.08 mg/L. However, DON could not be detected in groundwater. The *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) and NDMA-FP of reservoir water, raw water supply, water supply, and groundwater could not be detected at the detection limit of 17.4 ng/L. In addition, nine nitrosamines compounds including NDMA, *N*-nitrosomethylethylamine, *N*-nitrosodiethylamine, *N*-nitrosodi-*n*-propylamine, *N*-nitrosopiperidine, *N*-nitrosodi-*n*-butylamine, *N*-nitroso-pyrrolidine, *N*-nitrosomorpholine, and *N*-nitrosodiphenylamine could not be detected at the detection limit of 300 ng/L. The reservoir waters contained an aromatic amine, aniline, from 123 to 129 ng/L. The ranges of aniline in raw water supply, water supply, and groundwater were from 111 to 177, 114 to 164, and not detectable to 141 ng/L, respectively. Three aliphatic amine compounds including dimethylamine (DMA), diethylamine (DEA), and dibutylamine (DBA) were detected in water samples. The summation of DMA, DEA, and DBA in reservoir water, raw water supply, water supply, and groundwater were from 4.2 to 16.2, 5.6 to 22.9, 4.2 to 20.2, and 5.6 to 17.6  $\mu\text{g DMA/L}$ , respectively. The fluorescent excitation-emission matrix detected fluorescent peaks of tryptophan like substances at 230nm<sub>Ex</sub>/345nm<sub>Em</sub> and 280nm<sub>Ex</sub>/355nm<sub>Em</sub> and humic and fulvic acid-like substances at 230nm<sub>Ex</sub>/420nm<sub>Em</sub>, 275nm<sub>Ex</sub>/410nm<sub>Em</sub> and 330nm<sub>Ex</sub>/410nm<sub>Em</sub> in the raw water supply. The reservoir water exhibited the fluorescents of humic and fulvic acid-like substances at 230nm<sub>Ex</sub>/420nm<sub>Em</sub>, 275nm<sub>Ex</sub>/410nm<sub>Em</sub> and 330nm<sub>Ex</sub>/410nm<sub>Em</sub>. The reduction of summation of fluorescent intensity of humic and fulvic acid-like substances was corresponded well with the reduction of DOC.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(2)
สารบัญ	(4)
รายการตาราง	(6)
รายการภาพประกอบ	(7)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ข้อมูลคุณภาพน้ำคลองอู่ตะเภา	5
2.2 สารประกอบไนโตรซามีน	7
2.3 สารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอมีน	9
2.4 สารตั้งต้นในการก่อตัวของสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอมีน	10
2.5 การวิเคราะห์สารไนโตรซามีน	13
3. วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 นิยามของน้ำดิบเพื่อการประปา	14
3.2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำ	14
3.3 การเก็บตัวอย่าง การรักษาสภาพ และการจัดเก็บ	16
3.3.1 การเก็บตัวอย่าง	16
3.3.2 การทำลายคลอรีนในตัวอย่าง	17
3.3.3 การขนส่งตัวอย่างและการเก็บรักษา	17
3.4 กระบวนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	17
3.4.1 การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี	19
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ	19
3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ	19
3.4.4 ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ 254 นาโนเมตร (UV-254)	20
3.4.5 ค่าการดูดกลืนแสง UV จำเพาะ (SUVA)	20
3.4.6 การตรวจวัดลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)	20
3.4.7 ปริมาณสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (N-NDMA)	23
3.4.8 การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA Formation Potential, NDMA-FP)	25
3.4.9 การวิเคราะห์สารตั้งต้นหลักในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA precursors)	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	
4.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี ปริมาณและลักษณะสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา	28
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค Fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)	31
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ธรรมชาติ	32
4.4 การวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)	33
4.4.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารไนโตรซามีน 9 ชนิด	33
4.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร NDMA	35
4.5 การวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP และชนิดของสารไนโตรซามีน	36
4.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้นหลักที่มีโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA precursors)	39
4.6.1 สารอินทรีย์ตั้งต้นกลุ่มอะโรมาติก	39
4.6.2 สารอินทรีย์ตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก	40
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษา	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
6. เอกสารอ้างอิง	47
7. ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก Calibration curve ของสาร NDMA	55
ภาคผนวก ข Calibration curve ของสารตั้งต้นของ NDMA	56
ภาคผนวก ค ปริมาณสาร NDMA สารไนโตรซามีน 9 ชนิด และสารตั้งต้นของ NDMA	59
ภาคผนวก ง การคำนวณปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน	61
ภาคผนวก จ การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์	62
ภาคผนวก ฉ ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และ 2	65

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบจากคลอง อู่ตะเภา	6
2.2	สูตรโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพของสารประกอบเอน-ไนโตร โซ 9 ชนิด	8
2.3	รายงานการตรวจวัดปริมาณสารเอมีนตั้งต้นชนิดต่างๆ ของสารไนโตรซามีนใน น้ำแต่ละประเภท	12
3.1	จุดเก็บตัวอย่าง	14
3.2	สรุปพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี และการ ตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (NDMA) และสารตั้งต้นของ NDMA	18
3.3	โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร NDMA	24
3.4	โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร DMA DEA และ DBA	27
3.5	โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร aniline	27
4-1	ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจน ละลายน้ำในน้ำจากอ่างเก็บ น้ำดิบ น้ำประปา และน้ำบาดาล จากการเก็บ ตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2	29
4-2	เปอร์เซ็นต์การลดลงของ DOC UV-254 DON และความเข้มแสงฟลูออเรส เซนซ์ของน้ำตัวอย่างจากระบบบำบัดน้ำประปา 3 แห่ง	32
4-3	ค่าแมสสเปกตรัม (m/z) ของสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิด	34
4-4	ปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (DMA+DEA+DBA) ที่ตรวจพบจากการ สกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา	43
ค-1	ปริมาณสาร NDMA ชนิดของสารไนโตรซามีน และปริมาณสาร NDMA-FP จากการสกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณคลองอู่ตะเภา	59
ค-2	ปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก (DMA DEA และ DBA) และสารกลุ่มอะโร มาติก (aniline) ที่ตรวจพบจากการสกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณ คลองอู่ตะเภา	60
จ-1	เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร NDMA และสารตั้งต้นชนิดต่างๆ	64
ฉ-1	ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 1 และ 2	65

## รายการภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเอน-ไนโตรโซ	7
3.1	จุดเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประปา บริเวณคลองอุต๊ะเกาทั้งหมด 5 แห่ง	15
3.2	จุดเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบาดาลแห่งหนึ่งในชุมชนเทศบาลตำบลคอหงส์	16
3.3	ชุดอุปกรณ์ dead-end filtration	19
3.4	ขั้นตอนการกรองด้วยเมมเบรน	19
3.5	อุปกรณ์ชุดสกัด Solid phase extraction (SPE)	24
4.1	ตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์พีค A, B, C, D และ E สำหรับตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่ศึกษาในครั้งนี้	31
4.2	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานไนโตรซามีน 9 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-MS	34
4.3	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-MS	36
4.4	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) ที่ระดับความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-NPD	37
4.5	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน <i>N</i> -Nitrosamines 9 ชนิด	37
4.6	โครมาโตแกรมของสารสกัด NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบประปาขนาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1	39
4.7	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานสารอะนีนีน: Peak1: Internal standard (IS) triphenylphosphate (TPP) และ Peak 2: สาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID	40
4.8	ปริมาณสาร aniline ที่ตรวจพบในแหล่งน้ำต่างๆ จากบริเวณลุ่มน้ำคลองอุต๊ะเกา	40
4.9	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID	41
4.10	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DEA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID	41
4.11	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DBA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID	41
4.12	โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานกลุ่มอะลิฟาติก 3 ชนิด	42
ก-1	Calibration curve ของสาร NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 40, 50, 70, 90 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	55
ข-1	Calibration curve ของสาร DMA ที่ระดับความเข้มข้น 100, 200, 300, 500, 700, 800 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร	56



## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ช-2	Calibration curve ของสาร DEA ที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 50, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	56
ช-3	Calibration curve ของสาร DBA ที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 50, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	57
ช-4	Calibration curve ของสาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 40, 50, 60, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร	57
ช-5	Calibration curve ของสาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 100, 200, 300, 500, 600, 800 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร	58

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

คลองอุตตะเกาเป็นลำน้ำหลักในกลุ่มน้ำคลองอุตตะเกาจังหวัดสงขลา ที่ผ่านมาในอดีตจนถึงปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากคลองอุตตะเกาในหลายกิจกรรมไม่ว่าจะเป็นกิจกรรมของภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ชุมชน และการผลิตน้ำประปา นอกจากนี้น้ำเสีย น้ำที่ผ่านการบำบัดและน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอินทรีย์จากกิจกรรมดังกล่าวข้างต้นได้ถูกปล่อยลงสู่คลองอุตตะเกาอย่างต่อเนื่องและนับวันระดับปัญหาดังกล่าวได้ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ปัจจุบันปัญหาสำคัญที่ประชาชนในกลุ่มน้ำคลองอุตตะเกาประสบอยู่ได้แก่ ปัญหาคุณภาพน้ำดิบประปาและน้ำประปา ทั้งนี้เนื่องจากระบบผลิตน้ำประปาใช้น้ำดิบจากคลองอุตตะเกาตั้งแต่บริเวณต้นน้ำ กลางน้ำ และท้ายน้ำ อย่างไรก็ตามระบบประปาที่มีกำลังการผลิตสูงสุด 100,000 ถึง 150,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวันนั้นตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำของคลองอุตตะเกา จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่น้ำดิบที่ใช้ผลิตน้ำประปาในปัจจุบันจะปนเปื้อนมลพิษ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสารอินทรีย์คาร์บอนเมื่อทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งในน้ำ เช่น ไตรฮาโลมีเทน (trihalomethanes, THMs) และฮาโลอะซิติกแอซิด (haloacetic acids, HAAs) สารก่อมะเร็งดังกล่าวมีระดับความเป็นพิษที่ไม่มีใครกล้าต่อลิตร (World Health Organization, WHO, 2005; Yang *et al.*, 1998) ส่วนสารประกอบกลุ่มอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำก่อให้เกิดเป็นสารก่อมะเร็งได้เช่นกันโดยสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนก่อให้เกิดสารเอ็น-ไนโตรซามีน (*N*-Nitrosamines) ซึ่งมีระดับความเป็นพิษที่ระดับนาโนกรัมต่อลิตร (California's Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA, 2006)

แหล่งน้ำที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งในพื้นที่กลุ่มน้ำคลองอุตตะเกาก็คือ น้ำบาดาล ทั้งนี้เนื่องจากในบางพื้นที่ซึ่งไม่ใช่พื้นที่บริการของการประปาส่วนภูมิภาค ประชาชนได้สูบน้ำบาดาลมาใช้ในปริมาณมาก ดังนั้นการติดตามคุณภาพน้ำบาดาลที่มาจากบ่อบาดาลซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณที่มีแหล่งปล่อยน้ำเสีย น้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วสู่ชั้นใต้ดิน และน้ำชะขยะก็มีความจำเป็นเช่นกัน

กระบวนการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปจะเติมสารคลอรีนในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเป็นการฆ่าเชื้อโรค ซึ่งส่งผลดีต่อการฆ่าเชื้อโรคและยับยั้งการเติบโตของเชื้อโรคในระบบจ่ายน้ำประปา แต่การเติมคลอรีนก็ก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งที่มาจากสารอินทรีย์คาร์บอน (carbonaceous disinfection by-products, C-DBPs) และสารก่อมะเร็งที่มาจากสารอินทรีย์ไนโตรเจน (nitrogenous DBPs, N-DBPs) ได้เช่นกัน สำหรับสารก่อมะเร็งที่มีสารตั้งต้นมาจากสารอินทรีย์คาร์บอนได้แก่ THMs และ HAAs เป็นกลุ่มสารที่ตรวจพบได้มากเนื่องจากมีธาตุคาร์บอนในน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีสัดส่วนมาก (ประมาณ 40-60 % โดยน้ำหนัก) นอกจากนี้ผลการศึกษาทางพิษวิทยาแสดงให้เห็นว่าสาร N-DBPs เป็นสารก่อมะเร็งและก่อการกลายพันธุ์มากกว่าสาร C-DBPs (Moudgal *et al.*, 2000; Plewa *et al.*, 2004) แม้ว่าตรวจวัดได้ก็ความเข้มข้นต่ำกว่าระดับนาโนกรัมต่อลิตร

งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับน้ำดิบประปาจากคลองอุตตะเกาได้มุ่งเน้นศึกษาสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ โอกาสในการก่อตัวของสารก่อมะเร็งกลุ่ม C-DBPs และการบำบัดสารตั้งต้นของสารก่อมะเร็งกลุ่ม C-DBPs โดย Musikavong *et al.* (2008) ตรวจวิเคราะห์น้ำดิบประปาจากคลองอุตตะเกาพบว่า มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ละลายน้ำกลุ่มสารฮิวมิค และฟุลวิก รวมทั้งสารทริปโตเฟน และมีค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร THMs สูง ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาหาปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ

(dissolved organic nitrogen, DON) และชนิดของสารอินทรีย์ไนโตรเจนในน้ำที่เป็นสารตั้งต้นหลักของสาร N-DBPs หลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเอ็น-ไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (*N*-Nitrosodimethylamine, NDMA) ในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา สำหรับข้อมูลในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับสารก่อมะเร็งกลุ่มไนโตรซามีนยังมีผลการศึกษาค่อนข้างน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาทั้งชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ไนโตรเจนรวมทั้งค่าโอกาสในการก่อตัวของสารไนโตรซามีนเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่จะใช้ในการป้องกัน ควบคุม และบำบัดสารก่อมะเร็งกลุ่มไนโตรซามีนต่อไป

การก่อตัวของสารไนโตรซามีนในน้ำเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารฆ่าเชื้อโรคที่เติมลงไปในช่วงตอนฆ่าเชื้อโรคโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารคลอรีนหรือสารคลอรามินกับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ไนโตรเจนที่เป็นสารตั้งต้นในการก่อตัวที่สำคัญ ได้แก่ สารไดเมทิลเอมีน (dimethylamine, DMA) (Choi and Valentine, 2003, 2002; Mitch and Sedlak, 2002) สารเอมีนทุติยภูมิ (secondary amines) และเอมีนตติยภูมิ (tertiary amines) (Wang *et al.*, 2011) และสารอะโรมาติกเอมีน (aromatic amines) (Jurado-Sanchez *et al.*, 2012) ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีกรดไนทริกหรือไนไตรต์ (Ayanaba and Alexander, 1974) โดยส่วนใหญ่สารตั้งต้นเหล่านี้มักจะเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจนที่ถูกละลายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยาและเครื่องสำอาง โรงงานยาง และจากการย่อยสลายของสารเคมีกำจัดวัชพืช ตลอดจนน้ำเสียและน้ำทิ้งจากชุมชน เป็นต้น (Shen and Andrews, 2011; Feng *et al.*, 2009; Yurchenko and Molder, 2007; Ikeda *et al.*, 1990) จากข้างต้นกล่าวได้ว่าน้ำที่ผ่านการบำบัดจากชุมชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีวัตถุดิบเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ และมีการเติมคลอรีนก่อนทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเป็นแหล่งสำคัญที่สามารถก่อให้เกิดสารไนโตรซามีนในน้ำได้

การตรวจวิเคราะห์สารไนโตรซามีนในน้ำที่มีความเข้มข้นระดับต่ำกว่านาโนกรัมต่อลิตร (ng/L) นั้นทำได้ยาก ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคการสกัดด้วยสารที่เป็นของแข็ง (solid-phase extraction, SPE) (Charrois *et al.*, 2004) และนำสารที่สกัดได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีชนิดของเหลว (liquid chromatography, LC) หรือโครมาโตกราฟีแบบก๊าซ (gas chromatography, GC) ซึ่งทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด แต่เทคนิค GC มักจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่าเพราะให้ค่าความละเอียดสูงและสามารถใช้ควบคู่กับอุปกรณ์ตรวจจับที่มีความไวชนิดต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์พลังงานเชิงความร้อน (thermal energy analysis, TEA) เครื่องตรวจวัดชนิดไนโตรเจนฟอสฟอรัส (nitrogen-phosphorus) และแมสสเปกโตรเมตรี (mass spectrometry, MS) เป็นต้น

ปัจจุบันประเทศไทยมิได้มีการศึกษาการปนเปื้อนของสารตั้งต้นในการก่อตัวของสารไนโตรซามีนรวมทั้งปริมาณสารไนโตรซามีนที่อยู่ในน้ำ ตลอดจนโอกาสการก่อตัวของสารไนโตรซามีนของน้ำดิบประปา ดังนั้นการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวกับน้ำดิบประปาจากแหล่งน้ำต่างๆ ในลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาจึงเป็นงานใหม่ที่เป็นการวิจัยเชิงลึกและสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบประปาเพื่อผลิตน้ำประปาที่ปลอดภัยสู่ผู้บริโภคได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

(1) เพื่อตรวจหาการปนเปื้อนของสารกลุ่มไนโตรซามีนในตัวอย่างน้ำดิบประปา น้ำประปา และน้ำบาดาล จากบริเวณคลองอู่ตะเภา โดยการสแกน (scan) หาสารไนโตรซามีนทั้งหมด 9 ชนิด 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)

(2) เพื่อตรวจวัดระดับการปนเปื้อนของสารตั้งต้นหลักในการก่อตัวของสาร NDMA และปริมาณการก่อตัวของสาร NDMA ในตัวอย่างน้ำดิบประปา น้ำประปา และน้ำบาดาล จากบริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา

(3) เพื่อวิเคราะห์ค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA formation potential หรือ NDMA-FP) ในตัวอย่างน้ำดิบประปา น้ำประปา (ก่อนเติมคลอรีน) และน้ำบาดาล จากบริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

(1) ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ทั้งหมด 28 ตัวอย่างจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา (โดยการเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง) ได้แก่ น้ำดิบประปา 3 ตัวอย่าง น้ำในอ่างเก็บน้ำ 2 ตัวอย่าง น้ำบาดาล 3 ตัวอย่าง และน้ำประปา 6 ตัวอย่าง (น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีน)

(2) ความถี่ในการเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมด 2 ครั้งในเวลา 8 เดือน

(3) สารตั้งต้นหลักในการก่อตัวของสารไนโตรซามีนที่ตรวจวัด ประกอบด้วยสารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน 3 ชนิด ได้แก่ dimethylamine (DMA), diethylamine (DEA) และ dibutylamine (DBA) และสารกลุ่มอะโรมาติกเอมีน 1 ชนิดคือ aniline (AN) โดยการคัดเลือกชนิดของสารในเบื้องต้นด้วยเทคนิค GC-FID และ GC/MS ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อสแกนหาสารตั้งต้นหลักก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์เชิงปริมาณ

(4) สารตั้งต้นในการก่อตัวของสารกลุ่มไนโตรซามีน ในเชิงปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-NPD และ GC/MS ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ตามค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด)

(5) วิเคราะห์ค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA-FP) กับตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่นำมาศึกษา

(6) สาร NDMA ในเชิงปริมาณวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-NPD และ GC/MS ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (ตามค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัด)

(7) วิเคราะห์สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON) ในตัวอย่างน้ำทั้งหมดด้วยเครื่อง TOC/TN analyzer ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สารกลุ่มไนโตรซามีน (เช่น NDMA) เป็นสารก่อมะเร็งที่มีความเป็นพิษสูง ที่ผ่านมามีการปนเปื้อนทั้งในดิน น้ำ อากาศหรือแม้แต่อาหารและผลิตภัณฑ์หลายอย่างที่ใช้อุปโภคบริโภคในชีวิตประจำวัน ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปนเปื้อนของสารดังกล่าวอย่างแพร่หลายทั้งในต่างประเทศรวมถึงประเทศไทย แต่ประเด็นเกี่ยวกับการปนเปื้อนในน้ำและน้ำดิบประปาพบว่าประเทศไทยมีข้อมูลการศึกษาน้อยมาก ในขณะที่ปัจจุบันแหล่งน้ำผิวดินหลายแห่งมีปัญหาการปนเปื้อนของน้ำเสียเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการเกิดสารก่อมะเร็งชนิดนี้สูงขึ้น ดังนั้นการสำรวจตรวจสอบชนิดของสารไนโตรซามีน รวมทั้งสารตั้งต้นในการก่อตัวของสาร NDMA ในแหล่งน้ำดิบบริเวณคลองอุต๊ะเกาสสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากโดยเฉพาะการนำไปผลิตน้ำประปา รวมถึงเป็นข้อมูลพื้นฐานในการทำการศึกษาวินิจฉัยอื่นๆ ในอนาคตที่เกี่ยวข้องกับการปนเปื้อนของสารกลุ่มไนโตรซามีนในแหล่งน้ำ ในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบปัญหาและเมื่อมีการนำไปใช้งานสามารถก่อให้เกิดการพัฒนากระบวนการผลิตน้ำประปาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น มีสารปนเปื้อนอันอาจจะก่อให้เกิดสารก่อมะเร็งลดน้อยลง ทำให้สุขภาพอนามัยของประชาชนที่อยู่ในเขตพื้นที่ที่ศึกษาดีขึ้น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลคุณภาพน้ำคลองอู่ตะเภา

คลองอู่ตะเภาเป็นแหล่งรองรับน้ำเสียในรูปของมลพิษทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จากกิจกรรมต่างๆ ตั้งแต่บริเวณต้นน้ำ ลำน้ำช่วงกลาง และท้ายน้ำ ปัจจุบันลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภามีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์สูงซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำโดยตรง ผลการศึกษาคุณภาพน้ำในคลองอู่ตะเภาจากจุดเก็บน้ำต่างๆ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา บริเวณต้นน้ำ 1 จุด ได้แก่ บ้านม่วงก้อง บริเวณลำน้ำช่วงกลาง 1 จุด ได้แก่ บ้านบางศาลา จุดสูบน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา 1 จุด บริเวณท้ายน้ำ 1 จุด ได้แก่ บ้านหาดใหญ่ใน โดยเก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เก็บในเดือนตุลาคม 2552 เป็นตัวแทนของฤดูฝน ครั้งที่ 2 เก็บในเดือนมีนาคม 2553 เป็นตัวแทนของฤดูแล้ง แสดงดังตารางที่ 1 น้ำดิบทั้งสองฤดูกาลมีสภาพค่อนข้างเป็นกลางถึงด่างอ่อนโดยมีค่าพีเอช 6.7-9.6 อุณหภูมิของน้ำทั้งสองฤดูกาลมีค่า 27-34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเป็นด่างในน้ำดิบมีค่าอยู่ในช่วง 12-27 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ออกซิเจนละลายมีค่าอยู่ในช่วง 4.1-7.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ในช่วง 3.4-64 มิลลิกรัมต่อลิตร (Musikavong *et al.*, 2008) ความขุ่นของน้ำจากอ่างเก็บน้ำทั้งสองฤดูกาลมีค่าค่อนข้างต่ำ และต่ำกว่าค่าของน้ำตัวอย่างอื่นๆ จากคลองอู่ตะเภา พิจารณาค่าไนเตรตในน้ำพบว่ามีความอยู่ในช่วง 0.1-4.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยค่ามาตรฐานในน้ำดิบประปานั้นไม่ได้มีการกำหนดไว้แต่มีการกำหนดไว้ในน้ำดื่มโดยต้องมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงกล่าวได้ว่าน้ำดิบประปาจากแหล่งน้ำต่างๆ ในลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภามีค่าไนเตรตต่ำ

การหาปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ นิยมใช้ดัชนีตัวแทนในการอธิบายคุณลักษณะของสารอินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) การดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (UV-254) ค่าการดูดกลืนแสงยูวีจำเพาะ (specific ultraviolet adsorption, SUVA) และ fluorescence excitation-emission matrix (FEEM) อธิบายได้ดังนี้ ค่า UV-254 ใช้สำหรับตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกที่อยู่ในน้ำซึ่งดูดกลืนแสงยูวีได้ดีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ค่า DOC เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกและอะลิฟาติก สำหรับ SUVA เป็นอัตราส่วนระหว่างสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกต่อสารอินทรีย์ทั้งหมดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (UV-254/DOC) จึงใช้เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนต่อสารอินทรีย์ละลายน้ำทั้งหมด ผลการศึกษาค่า SUVA ของน้ำในอ่างเก็บน้ำสะเดาทั้งสองฤดูกาลมีค่าค่อนข้างต่ำ ส่วนน้ำจากอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่า SUVA ค่อนข้างสูง น้ำดิบประปาจากทั้ง 4 จุดบริเวณคลองอู่ตะเภาในฤดูฝนมีค่า SUVA ค่อนข้างสูงอยู่ระหว่าง 3.1-8.4 L/mg-m อาจกล่าวได้ว่าในฤดูฝนมีการชะสารอินทรีย์อะโรมาติกลงสู่คลองอู่ตะเภาในปริมาณค่อนข้างสูง ส่วนช่วงฤดูแล้ง SUVA มีค่าไม่สูงมากอยู่ระหว่าง 2.1-5.1 L/mg-m โดยค่า SUVA ของน้ำดิบประปาบริเวณจุดสูบน้ำดิบประปามีค่าเท่ากับ 2.8 L/mg-m ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์เพื่อลดสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำดิบประปาต่อไป

ตารางที่ 2-1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา

จุดเก็บน้ำ	การเก็บตัวอย่างน้ำ	พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ							ปริมาณและลักษณะสารอินทรีย์		
		พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ความเป็นด่าง (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	ออกซิเจนละลาย (mg/L)	ของแข็งแขวนลอย (mg/L)	ความขุ่น (NTU)	ไนเตรต (mg/L)	DOC (mg/L)	UV-254 (cm <sup>-1</sup> )	SUVA (L/mg-m)
อ่างเก็บน้ำสะเดา	ม.ค. และ พ.ค.	-	-	-	-	-	-	-	2.2	0.080	2.6
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	ม.ค. และ พ.ค.	-	-	-	-	-	-	-	3.7	0.153	4.1
อ่างเก็บน้ำสะเดา	ต.ค. 2552	7.0	30	12	7.2	12	1.9	0.1	4.9	0.072	1.5
	มี.ค. 2553	6.7	27	14	7.0	3.4	6.1	0.3	2.9	0.058	2.0
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	ต.ค. 2552	8.2	31	15	7.1	23	6.2	0.2	4.2	0.189	4.5
	มี.ค. 2553	8.6	30	21	7.8	3.7	7.1	0.2	3.3	0.117	3.5
บ้านม่วงกึ่ง	ต.ค. 2552	6.7	28	15	5.5	29	17	1.4	3.9	0.202	5.2
	มี.ค. 2553	7.0	31	18	4.5	53	62	0.2	4.9	0.249	5.1
บ้านบางศาลา	ต.ค. 2552	6.8	28	18	4.8	40	20	1.1	4.9	0.252	5.1
	มี.ค. 2553	7.4	29	22	6.6	43	36	4.3	5.1	0.208	4.1
จุดสูบน้ำดิบ	ต.ค. 2552	6.9	29	22	6.5	64	24	1.4	5.1	0.414	8.1
	มี.ค. 2553	7.4	32	24	6.0	14	23	4.3	5.5	0.159	2.8
หาดใหญ่ไฉ	ต.ค. 2552	6.9	28	18	4.1	58	21	1.1	4.4	0.371	8.4
	มี.ค. 2553	9.6	34	27	6.2	45	36	1.1	6.2	0.135	2.1

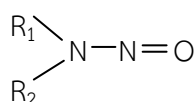
อ้างอิง: กระจกพันธ์ มุสิกวงค์ (2555)

เมื่อพิจารณาการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาพบว่าน้ำดิบประปามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง (กมลนาวิณและคณะ 2551; Musikavong *et al.*, 2008) ประกอบกับการใช้สารคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคของการประปาส่วนภูมิภาคสงขลา จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดสารก่อมะเร็งในน้ำประปาที่ใช้น้ำดิบจากคลองอู่ตะเภา การศึกษาคุณภาพน้ำบริเวณต้นน้ำ ลำน้ำช่วงกลาง และท้ายลำน้ำช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ของแหล่งน้ำดิบประปาในกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภาได้เป็นอย่างดี

สำหรับน้ำดิบประปาจากแหล่งอื่นในประเทศไทยมีการรายงานปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC) และสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) ของน้ำจากจุดเก็บน้ำดิบประปา กรุงเทพมหานคร ได้แก่ น้ำดิบจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน มีค่า DOC เท่ากับ 4.2 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า DON เท่ากับ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และน้ำดิบประปาบางเลน มีค่า DOC อยู่ในช่วง 7.3-7.9 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า DON อยู่ในช่วง 0.28-0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Kumsuvan, 2013 and Sumpattanavorachai, 2013) เมื่อเปรียบเทียบกับค่า DOC ของจุดสูบน้ำดิบจากกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา (ตารางที่ 2-1) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 5.1-5.5 มิลลิกรัมต่อลิตรกับค่า DOC ของน้ำจากจุดเก็บน้ำดิบประปาบางเขน และบางเลน กล่าวได้ว่าค่า DOC ของน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาค่าน้ำดิบประปาบางเขนมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างน้อย แต่ยังมีปริมาณ DOC น้อยกว่าน้ำดิบประปาบางเลน

## 2.2 สารประกอบไนโตรซามีน

สารประกอบไนโตรซามีน (nitrosamine) หมายถึงสารประกอบไนโตรโซที่สร้างขึ้นจากหมู่ dialkyl, alkaryl, diaryl หรือ cyclic secondary amines สารกลุ่มนี้จัดเป็นสารก่อมะเร็ง สารประกอบเอ็น-ไนโตรโซเป็นกลุ่มของสารเคมีที่มีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังภาพที่ 2-1 และสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเอ็น-ไนโตรซามีน (*N*-nitrosamines) ทั้ง 9 ชนิด ซึ่งเป็นกลุ่มสารที่มีอยู่โดดเด่นและอาจมีโครงสร้างเป็นแบบอะลิฟาติกหรือวงแหวน แสดงดังตารางที่ 2-2



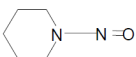
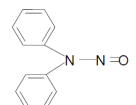


ภาพที่ 2-1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ  
ที่มา : Gangolli *et al.* (1994)

$R_1$  และ  $R_2$  ในโครงสร้างเป็นหมู่ alkyl หรือ aryl หรือบางครั้งเป็น alicyclic ขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบเอ็น-ไนโตรโซ



ตารางที่ 2-2 สูตรโครงสร้างทางเคมีและสมบัติทางเคมีกายภาพของสารประกอบเอ็น-ไนโตรซามีน 9 ชนิด

Nitrosamines	Structure		Formula	Molecular weight [g/mol]	Diffusion coefficient in water <sup>b</sup> [cm <sup>2</sup> /s] × 10 <sup>-6</sup>	Log K <sub>ow</sub> <sup>b</sup>	Solubility in water at 20°C <sup>b</sup> [g/L]
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>					
<i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA)	CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> O	74.05	9.7	- 0.64	1000
<i>N</i> -nitrosodiethylamine (NDEA)	CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O	102.08	8.0	0.34	147
<i>N</i> -nitrosomethylethylamine (NMEA)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	CH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O	88.06	8.0	- 0.15	300
<i>N</i> -nitrosodi- <i>n</i> -propylamine (NDPA)	(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O	130.11	8.2	1.35	9.9
<i>N</i> -nitrosomorpholine (NMor)			C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	116.06	9.2	- 1.39	4714
<i>N</i> -nitroso-pyrrolidine (NPyr)			C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> O	100.06	8.0	0.23	780
<i>N</i> -nitrosopiperidine (NPip)			C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O	114.08	8.6	0.74	49
<i>N</i> -nitrosodi- <i>n</i> -butylamine (NDBA)	(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> N <sub>2</sub> O	158.14	8.0	2.31	1.2
<i>N</i> -nitrosodiphenylamine (NDPhA)			C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O	198.08	6.3	3.16	0.035

ที่มา: Ma *et al.*, (2011); <sup>b</sup> GSI chemical properties database (GSI Environmental Inc.): <http://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database.html>.

สารประกอบไนโตรซามีนเป็นสารมลพิษทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่พึงประสงค์ สารประกอบไนโตรซามีนมีจำนวนมากกว่า 250 ชนิด หลายชนิดเป็นสารพิษที่ออกฤทธิ์เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารก่อการกลายพันธุ์ (mutagenic) ได้ทั้งในคนและสัตว์ ขึ้นอยู่กับปริมาณและความถี่ที่ได้รับ ชนิดของสารก่อมะเร็งไนโตรซามีนรวมทั้งสภาวะของร่างกายในขณะนั้น ไนโตรซามีนก่อตัวได้ในกระบวนการบำบัดน้ำด้วยสารคลอรีนหรือสารฆ่าเชื้ออื่นๆ ที่มีองค์ประกอบของคลอรามิน (Mitch *et al.*, 2003) พบได้ทั่วไปในธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมทั้งในอากาศ ดินและน้ำ (Nawrocki and Andrzejewski, 2011) โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อีกทั้งยังพบได้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการแปรรูป ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง น้ำดื่ม ยารักษาโรค เครื่องสำอาง และใบยาสูบ เป็นต้น เหล่านี้ล้วนส่งผลกระทบต่อการปนเปื้อนในทางสิ่งแวดล้อม (Schafer *et al.*, 2010) ไนโตรซามีนเป็นสารที่คงทนในน้ำผิวดิน ซึ่งเป็นที่น่ากังวลสำหรับชุมชนปลายน้ำซึ่งต้องพึ่งพาประโยชน์จากแหล่งน้ำมาใช้ในการบริโภค ปัจจุบันตรวจพบสารประกอบสำคัญของไนโตรซามีนในน้ำดื่มทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), *N*-nitrosodiethylamine (NDEA), *N*-nitrosodi-n-propylamine (NDPA), *N*-nitrosomorpholine (NMOR), *N*-nitroso-pyrrolidine (NPYR), *N*-nitrosopiperidine (NPIP), *N*-nitrosodi-n-butylamine (NDBA) และ *N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) (Chang *et al.*, 2011) โดยเฉพาะสาร NDMA เป็นสายพันธุ์ที่มีความเสถียรและโดดเด่นที่สุดของสารประกอบไนโตรซามีน สำหรับไนโตรซามีนชนิดอื่นตรวจพบว่ามีระดับความเข้มข้นต่ำเกินไปซึ่งไม่เพียงพอที่จะแสดงคุณลักษณะการก่อตัวที่จำเพาะในกระบวนการผลิตน้ำประปา ในขณะที่ NDMA NDEA และ NPYr เป็นชนิดของสารที่พบได้บ่อยที่สุด (Asami *et al.*, 2009; Charrois *et al.*, 2007; Jurado-Sanchez *et al.*, 2010) ในบรรดาสารไนโตรซามีนทั้งหมด 9 ชนิด มีอยู่ 6 ชนิดที่ถูกระบุไว้ในระเบียบข้อที่ 3 ของการตรวจติดตามชนิดของสารปนเปื้อนที่ยังไม่มีกฎควบคุมจากหน่วยงาน United States Environmental Protection Agency หรือ U.S. EPA. (Llop *et al.*, 2012) ได้แก่ สาร NDMA, NMEA, NDEA, NPYR, NDPA และ NDBA

องค์กรปกป้องสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) จัดให้สารประกอบไนโตรซามีนอยู่ในกลุ่ม B2 บ่งชี้ว่าเป็นสารก่อมะเร็งที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ หน่วยงานประเมินอันตรายต่อสุขภาพจากสิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Office of Environmental Health Hazard Assessment, OEHHA) ได้กำหนดค่าความเข้มข้นของสาร NDMA ที่มีผลต่อสุขภาพประชาชนไว้ที่ 3 นาโนกรัมต่อลิตร (OEHHA, 2006) U.S. EPA กำหนดความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับสารไนโตรซามีนชนิด NDMA และ NDEA ในน้ำดื่มให้อยู่ที่ระดับความเข้มข้น 7 และ 2 นาโนกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และกำหนดค่าโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งของสาร NDMA ที่ระดับ  $10^{-6}$  สำหรับกฎระเบียบของประเทศอื่นๆ ได้แก่ ออนตาริโอ ประเทศแคนาดาได้จัดตั้งค่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้ของสาร NDMA ในน้ำดื่มที่ระดับ 9 นาโนกรัมต่อลิตร (Government of Ontario, 2010) ในขณะที่ทางหน่วยงานบริการด้านสุขภาพของรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดระดับปลอดภัยในน้ำดื่มไว้ที่ 10 นาโนกรัมต่อลิตร (California Department of Health Services, 2010) โดยทั่วไปตรวจพบความเข้มข้นของสาร NDMA ในน้ำดื่มที่ระดับต่ำกว่านาโนกรัมต่อลิตร องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO, 2008) ได้กำหนดค่า guideline value (GV) ของสาร NDMA สำหรับน้ำดื่ม ต้องไม่เกิน 100 นาโนกรัมต่อลิตร

## 2.3 สารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน

สารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (Nitrosodimethylamine, NDMA) เป็นหนึ่งในสมาชิกของสารกลุ่มไนโตรซามีน (nitrosamines) ซึ่งมีศักยภาพอย่างมากต่อการก่อโรคมะเร็ง (U.S. EPA., 2002) และพิสูจน์แล้วว่าเป็น

สารปนเปื้อนในน้ำ (Taguchi *et al.*, 1994) สาร NDMA ตรวจพบได้ทั่วไปในน้ำดื่มที่ระดับความเข้มข้นต่ำในช่วงนาโนกรัมต่อลิตร แต่ในน้ำดิบและในน้ำเสียที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารคลอรามินหรือคลอรีนยังตรวจพบได้ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 1,000 นาโนกรัมต่อลิตร (Sacher *et al.*, 2008; Krasner *et al.*, 2009) สาร NDMA เป็นสาเหตุของโรคมะเร็งในอวัยวะต่างๆ ของสัตว์ ได้แก่ ตับ ปอด และไต และถือว่าเป็นสารอินทรีย์มลพิษในน้ำดื่มที่เกิดขึ้นใหม่ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับวิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยสารคลอรามินหรือคลอรีนชนิดต่างๆ (Richardson, 2003)

## 2.4 สารตั้งต้นในการก่อตัวของสารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (NDMA)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter, NOM) เป็นแหล่งสำคัญของสารตั้งต้นในการก่อตัวของสาร NDMA (Mitch and Sedlak, 2004; Dotson and Westerhoff, 2009) ผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าไดเมทิลามีน (dimethylamine, DMA) เป็นสารที่ตรวจพบในน้ำอย่างแพร่หลายสามารถทำปฏิกิริยากับสารโมโนคลอรามินและให้ผลผลิตออกมาเป็น NDMA (Choi and Valentine, 2001) กล่าวได้ว่าสาร DMA ที่มีปริมาณมากเพียงพออาจเป็นสารตั้งต้นหลักในการก่อตัวที่สำคัญของสาร NDMA ที่ตรวจพบในแหล่งน้ำธรรมชาติ นอกจากนี้สารฮิวมิกที่มาจากสารอินทรีย์ธรรมชาตียังเป็นแหล่งสำคัญของสารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA เนื่องจากมีปริมาณไนโตรเจนอินทรีย์เป็นองค์ประกอบอยู่จำนวนมาก (Croue *et al.*, 1999) ผลการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า สารฮิวมิกเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญต่อการก่อตัวของสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำดื่ม (Wu *et al.*, 2003) และนำไปสู่การก่อตัวของสาร NDMA ได้อีกด้วย โดยส่วนใหญ่สารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA มีความสัมพันธ์กับโมเลกุลสารส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic fraction) และสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าส่วนของสารที่เป็นกรดแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic acid fraction) ยังเป็นแหล่งกำเนิดที่โดดเด่นของสาร NDMA (Mitch and Sedlak, 2004) สารอินทรีย์ธรรมชาติมีองค์ประกอบของธาตุในสัดส่วนที่แตกต่างกันดังนี้ คาร์บอน 40-60 % ออกซิเจน ~40 % ไนโตรเจน 1-5 % ไฮโดรเจน ~5 % ซัลเฟอร์ < 5 % และเหล็ก (Lee and Westerhoff, 2005) จากข้างต้นกล่าวได้ว่าคาร์บอนเป็นธาตุที่มีสัดส่วนองค์ประกอบสูงสุด ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ DBPs ในอดีตจึงมุ่งเน้นศึกษาสารที่เป็น Carbonaceous-DBPs เช่น ไตรฮาโลมีเทน และฮาโลอะซิติกแอซิด แต่สำหรับไนโตรเจนซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่มีอยู่น้อย ที่ผ่านมายังมีการศึกษาวิจัยค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสารผลิตภัณฑ์ตกค้างชนิด Nitrogenous-DBPs ดังนั้นจึงควรศึกษาในเรื่องดังกล่าวซึ่งเป็นองค์ความรู้จำเป็นสำหรับประเทศไทย

สารตั้งต้นในการก่อตัวของสารไนโตรซามีน เป็นประเด็นสำคัญที่ผ่านการตรวจสอบอย่างแน่ชัดแล้วว่าไนโตรซามีนอาจก่อตัวได้ในระหว่างกระบวนการผลิตน้ำและในระบบจ่ายน้ำ เนื่องจากสาร NDMA ถูกจำกัดได้ไม่หมดภายหลังกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในขั้นตอนสุดท้าย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารตั้งต้นในการก่อตัวของไนโตรซามีนและหาวิธีจำกัดเพื่อหลีกเลี่ยงการก่อตัวของสารไนโตรซามีน งานวิจัยที่ผ่านมาปรากฏได้ว่าสารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA ที่มีความเป็นไปได้นั้นมีอยู่หลายชนิด ได้แก่

(1) ไดเมทิลามีน (dimethylamine, DMA) เป็นสารตั้งต้นของ NDMA ที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ ความเข้มข้นของ DMA โดยทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Gerecke and Sedlak, 2003) แต่ที่ความเข้มข้นระดับนี้ยังไม่สามารถอธิบายการก่อตัวของ NDMA ในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนได้ (Mitch *et al.*, 2003) ผลการศึกษาของ Andrzejewski *et al.*,

(2005) พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำที่มีสาร DMA อยู่ด้วยจะนำไปสู่การก่อตัวของ NDMA ซึ่งอธิบายได้จากความสัมพันธ์กันอย่างตึระหว่างความเข้มข้นของ NDMA กับอัตราส่วนของสารคลอรีน แอมโมเนียไอออน และสาร DMA นอกจากนี้ยังตรวจสอบพบว่าในสภาพที่มีความเป็นกรดต่าง (pH) 7-8 มีความเข้มข้นของ NDMA สูงสุด แสดงให้เห็นชัดว่าการใช้สารฆ่าเชื้อในน้ำด้วยสารคลอรีน คลอรีนอิสระในรูปของกรดไฮโปคลอรัส (hypochlorous, HOCl) (Choi and Valentine, 2003) และคลอรีนไดออกไซด์ นำไปสู่การก่อตัวของสาร NDMA ซึ่งตรวจวัดได้ที่ความเข้มข้นระดับไมโครกรัม จากผลการทดลองในสภาวะของสารละลายที่มีสาร DMA และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) อยู่รวมกันและทดสอบการเติมสารฆ่าเชื้อต่างๆ เช่น โมโนคลอรามิน ไดคลอรามิน ยังพบว่ามีนัยสำคัญต่อการเพิ่มการก่อตัวของ NDMA ได้เป็นอย่างมาก (Schreiber and Mitch, 2006)

การก่อตัวของสาร NDMA ยังขึ้นอยู่กับวิธีการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ การบำบัดน้ำด้วยโอโซนซึ่งเป็นที่อนุมุลอิสระและสารฆ่าเชื้อช่วยจัดการก่อตัวของ NDMA ในน้ำเสียเนื่องจากช่วยทำลายสารตั้งต้นของ NDMA ได้ ดังในงานวิจัยของ Kosaka *et al.*, (2009) พบว่าการก่อตัวของ NDMA เกี่ยวข้องกับสารโอโซนในระบบบำบัดน้ำเสียโดยสามารถวัดความเข้มข้นของ NDMA ก่อนและหลังกระบวนการใช้โอโซนได้ที่ระดับความเข้มข้น 16-290 และ 14-280 นาโนกรัมต่อลิตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้โอโซนบำบัดสาร DMA ในน้ำจะนำไปสู่การก่อตัวของ NDMA ได้ และพบว่าตัวแปรสำคัญของการก่อตัวเพิ่มขึ้นยังขึ้นอยู่กับค่า pH ที่สูงขึ้น ค่าออกซิเจนละลายน้ำ และเวลาในการทำปฏิกิริยา (Andrzejewski *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009)

(2) สารประกอบเอมีนอื่นๆ เช่น สารที่มีโครงสร้างเอมีนตติยภูมิ (tertiary-) หรือจตุรภูมิ (quaternary-) จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นสาร DMA และมีนัยสำคัญต่อปริมาณของ NDMA ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำประปา (Lee *et al.*, 2007) สำหรับเอมีนตติยภูมิบางชนิดที่มีแหล่งกำเนิดมาจากมนุษย์ เช่น (dimethylaminomethyl)furfuryl alcohol เป็นหนึ่งในสารประกอบที่ใช้ผลิตยา ranitidine จัดเป็นสารตั้งต้นของสาร NDMA ที่มีนัยสำคัญ (Roux *et al.*, 2012) อธิบายได้ว่า NDMA เป็นสารผลิตภัณฑ์ที่สังเกตพบได้ในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการคลอราไมเนชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวยาน ranitidine (นิยมใช้รักษาแผลในกระเพาะอาหาร) และสารประกอบทางยาตัวอื่นๆ ที่ก่อให้เกิดปริมาณ NDMA อย่างที่มีนัยสำคัญ

(3) สารไดเมทิลซัลฟาไมด์ (dimethylsulfamide, DMS) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารกำจัดเชื้อรา tolylfuanid ที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ความเข้มข้นที่พบอยู่ในช่วง 100-1000 และ 50-90 นาโนกรัมต่อลิตร ในน้ำใต้ดินและน้ำผิวดิน ตามลำดับ (Schmidt and Brauch, 2008) การใช้โอโซนบำบัดน้ำที่มีสาร DMS ส่งผลให้เกิดสาร NDMA อย่างไรก็ตามงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้อธิบายว่าสาร NDMA ก่อตัวได้หากในน้ำมีโบรไมด์ (bromide) อยู่ (Von Gunten *et al.*, 2010)


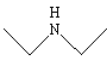




(4) สารรวมตะกอนชนิดประจุบวก (cationic flocculants) ที่นิยมใช้ในระบบผลิตน้ำประปาจากการศึกษาล่าสุดพบว่ากระบวนการฆ่าเชื้อด้วยสารคลอราไมนและการผลิตน้ำด้วยโอโซนส่งผลต่อการฟอร์มตัวของ NDMA (Padhye *et al.*, 2011) และพบว่าการผลิตน้ำประปาที่ใช้สารโพลีไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (poly-diallyldimethylammoniumchloride หรือ PolyDADMAC) ซึ่งเป็นสารเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างตะกอนจะเพิ่มความเสี่ยงในการก่อตัวของสาร NDMA

(5) เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchange resins) ซึ่งนำไปใช้ในระบบแลกเปลี่ยนไอออนของกระบวนการบำบัดน้ำ (Najm and Trussell, 2001) อาจเป็นแหล่งที่มาของสาร DMA และสารอินทรีย์ไนโตรเจนอื่นๆ ที่เป็นสารตั้งต้นในการก่อตัวของสาร NDMA ได้

ในบรรดาสารตั้งต้นในการก่อตัวทั้งหมดของสารไนโตรซามีนนั้น DMA เป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่พบได้บ่อยที่สุดในน้ำผิวดิน (Sacher *et al.*, 1997) และมีศักยภาพในการก่อตัวของ NDMA มากที่สุด นอกจากนี้ยังพบสารประกอบเอมีนทุติยภูมิหลายชนิดที่ส่งผลสำคัญต่อการก่อตัวของสารไนโตรซามีน ได้แก่ diphenylamine (DPHA), diethylamine (DEA), methylethylamine (MEA), di-n-propylamine (DPA), di-nbutylamine (DBA), morpholine (Mor), pyrrolidine (Pyr) และ piperidine (Pip) โดยส่วนใหญ่สารเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทางเคมีและยา (Kim *et al.*, 2009) การหาปริมาณสารเอมีนต่างๆ ที่เป็นสารตั้งต้นในการก่อตัวสำคัญของไนโตรซามีนในน้ำจากหลายประเทศ เช่น จีน เยอรมัน และสเปน มีรายงานสรุปได้ดังตารางที่ 2-3

สารตั้งต้นในการก่อตัวของ NDMA ในน้ำตามธรรมชาติ หลายชนิดมีต้นเหตุมาจากมนุษย์ ได้แก่ สีย้อม (เช่น *N,N*-dimethyl-*p*-phenylenediamine, DMPD) (Oya *et al.*, 2008) สารกำจัดศัตรูพืช (เช่น *N'*-(3,4-dichlorophenyl)-*N,N*-dimethylurea (Diuron) (Chen and Young, 2008) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารกำจัดเชื้อรา tolylfluanid (เช่น dimethylsulfamide, DMS) ซึ่งมีปรากฏทั้งในน้ำผิวดิน (จากแม่น้ำและทะเลสาบ) และน้ำบาดาล (Schmidt and Brauch, 2008) และสารทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent) (เช่น dimethyldithiocarbamate) (Vocht *et al.*, 2007) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อการก่อตัวของสารตั้งต้นของ NDMA ได้แก่ ผลของฤดูกาลและมลพิษที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Aydin *et al.*, 2012)

ตารางที่ 2-3 รายงานการตรวจวัดปริมาณสารเอมีนตั้งต้นชนิดต่างๆ ของสารไนโตรซามีนในน้ำแต่ละประเภท

Nitrosamine precursors	Structure	Samples	Concentration (µg/L)	Reference
<b>aliphatic amines</b>				
dimethylamine (DMA)		raw water	ND - 3.9	Wang <i>et al.</i> , 2011
		river water, sea	ND - 0.5	Akyuz and Ata, 2006
		finished water	ND - 4.0	Wang <i>et al.</i> , 2011
diethylamine (DEA)		raw water	ND - 2.4	Wang <i>et al.</i> , 2011
		river water, sea water	ND - 63	Akyuz and Ata, 2006
		finished water	ND - 1.8	Wang <i>et al.</i> , 2011
<b>aromatic amines</b>				
aniline		raw water	2.2 - 12	Jurado-Sanchez <i>et al.</i> , 2012
		finished water	1.2 - 27	
2-Nitroaniline (2-NA)		raw water	< 0.13	Jurado-Sanchez <i>et al.</i> , 2012
		finished water	3.5 - 120	
3-chloroaniline		raw water	0.22 - 5.5	Jurado-Sanchez <i>et al.</i> , 2012
		finished water	1.5 - 25	
3,4-dichloroaniline		raw water	1.3 - 5.8	Jurado-Sanchez <i>et al.</i> , 2012
		finished water	2.9 - 95	

ND: not detected.

## 2.5 การวิเคราะห์สารไนโตรซามีน

สารไนโตรซามีนในน้ำประปาเป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน สารไนโตรซามีนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic fraction) มีความเป็นขั้ว (polar) แต่ไม่มีประจุ (uncharged) และมีโมเลกุลขนาดเล็ก การตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดสารไนโตรซามีนออกจากรู้นั้นทำได้ยาก ในปัจจุบันนิยมใช้เทคนิคการสกัดด้วยสารที่เป็นของแข็ง (solid-phase extraction, SPE) (Krauss *et al.*, 2009) ขั้นตอนต่อไปจะนำสารที่ถูกสกัดได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค liquid chromatography (LC) และ gas chromatography (GC) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เทคนิค LC และ GC สามารถนำมาปรับใช้กับเครื่องตรวจวัดแบบฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) และเครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์/แมสสเปคโตรมิเตอร์ (Mass Spectrometer/Mass Spectrometer) (Kodamatani *et al.*, 2009)

เทคนิค Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันตามวิธีการของ USEPA Method 521 สำหรับการตรวจวัดสารไนโตรซามีนในน้ำดื่ม วิธีนี้อาศัยหลักการของ GC-MS ในการตรวจหาสารมลพิษกับสารตัวแทนมาตรฐาน (internal standards) ร่วมกับกระบวนการทำให้สารเข้มข้นก่อน เช่น การสกัดด้วยของแข็ง (solid-phase extraction, SPE) จัดว่าเทคนิคนี้มีศักยภาพในการตรวจสอบสารไนโตรซามีน (Jenkins *et al.*, 1995) ข้อเสียอย่างหนึ่งของวิธีการนี้นอกจากอุปกรณ์จะมีราคาแพงแล้ว ประโยชน์ของเทคนิคเหล่านี้ก็คือสามารถปรับเปลี่ยนเงื่อนไขได้หลายรูปแบบ เช่น การเตรียมสารตัวอย่างและสภาวะในการตรวจวัด ตัวอย่างเช่น การเพิ่มก๊าซแอมโมเนียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดและมีขีดจำกัดในการตรวจวัดสำหรับไนโตรซามีนได้ดีที่สุด (0.1-10.6 นาโนกรัมต่อลิตร) (Mhlongo *et al.*, 2009) การพัฒนาเทคนิควิเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ Ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) สำหรับวิเคราะห์สารไนโตรซามีนในน้ำดื่มทั้ง 9 ชนิด (ได้แก่ NDMA, NMEA, NPYR, NPIP, NMOR, NDEA, NDPA, NDBA, NDPhA) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ได้หลายตัวอย่างในเวลาเดียวกันและมีค่าความไวสูง (Wang *et al.*, 2011) เทคนิคการตรวจวัดของ EPA 521 ใช้วิธี GC/MS/MS เพื่อตรวจวิเคราะห์สาร NDMA และไนโตรซามีนชนิดอื่นๆ ในน้ำดื่มรวมทั้ง 6 ชนิด (Environmental Protection Agency, EPA521) วิธีการเหล่านี้มักจะมีขีดจำกัดในการตรวจวัดประมาณ 1 นาโนกรัมต่อลิตร อีกเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับคือการบอกลักษณะเฉพาะด้วยการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์เป็นเทคนิคที่ไม่สามารถตรวจวัด NDMA ได้โดยตรง แต่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นการเรืองแสง (fluorescence excitation emission matrix, FEEM) กับการก่อตัวของสาร NDMA ได้ ข้อเสียเปรียบของวิธีนี้จะต้องอาศัยการตรวจจับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ค่อนข้างสูง (dissolved organic matter, DOM) ซึ่งมีความเข้มข้นอย่างน้อย 3 ถึง 12 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงจะมีแนวโน้มที่จะมีนัยสำคัญต่อการเรืองแสง (Mhlongo, 2009)

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 นิยามของน้ำดิบเพื่อการประปา

น้ำดิบ หมายถึง น้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่นำมาบำบัด (treatment) หรือการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อให้เป็นน้ำสะอาดตามมาตรฐานคุณภาพน้ำต่างๆ ที่กำหนด สำหรับแหล่งน้ำดิบนั้น คือ แหล่งน้ำที่เราใช้ผลิตน้ำประปา เช่น น้ำในอ่างเก็บน้ำ แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง เป็นต้น แหล่งน้ำดิบที่สะอาดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการผลิตน้ำประปา

#### 3.2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำ

การศึกษานี้ทำการตรวจวัดชนิดของสารกลุ่มไนโตรซามีน 9 ชนิด และระดับการปนเปื้อนของสารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (Nitrosodimethylamine, NDMA) และค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA formation potential, NDMA-FP) จากแหล่งน้ำประเภทต่างๆ ในบริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา จ. สงขลา ได้แก่ อ่างเก็บน้ำ คลองรองรับน้ำดิบผลิตประปา ท่อจ่ายน้ำประปา (ก่อนและหลังเติมคลอรีน) และบ่อบาดาล โดยเก็บน้ำตัวอย่างทั้งหมด 2 ครั้ง ในระยะเวลา 8 เดือน เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงตามของคุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีตามฤดูกาล จากจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด 14 จุด รวมทั้งสิ้น 28 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดจุดเก็บตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 จุดเก็บตัวอย่าง

No.	รหัส	ชื่อจุดเก็บตัวอย่าง	พิกัด UTM E	พิกัด UTM N
1	SR	อ่างเก็บน้ำสะเดา	665469	728235
2	KR	อ่างเก็บน้ำคลองหลา	646655	759382
3	WTP1	จุดก่อนสูบน้ำดิบประปาสะเดา	658010	734295
4	WTP2	จุดก่อนสูบน้ำดิบประปาพะตง-พังงา	660502	749673
5	WTP3	จุดก่อนสูบน้ำดิบประปาหาดใหญ่	661706	772710
6	GW1	บ่อบาดาลใกล้หลุมฝังกลบขยะใน จ.สงขลา	369353	6331662
7	GW2	บ่อบาดาลบริเวณหลุมฝังกลบขยะใน จ.สงขลา	417503	6336266
8	GW3	บ่อบาดาลในชุมชนคอหงส์ อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา	800565	1139
9	WTP1-WS	ท่อจ่ายน้ำประปาสะเดา	658010	734295
10	WTP2-WS	ท่อจ่ายน้ำประปาพะตง-พังงา	660502	749673
11	WTP3-WS	ท่อจ่ายน้ำประปาหาดใหญ่	661706	772710
12	WTP1-pre Cl <sub>2</sub>	ท่อจ่ายน้ำประปาสะเดา (ก่อนเติมคลอรีน)	658010	734295
13	WTP2-pre Cl <sub>2</sub>	ท่อจ่ายน้ำประปาพะตง-พังงา (ก่อนเติมคลอรีน)	660502	749673
14	WTP3-pre Cl <sub>2</sub>	ท่อจ่ายน้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อนเติมคลอรีน)	661706	772710

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 ในวันที่ 29 เมษายน 2556 ซึ่งเป็นตัวแทนของฤดูแล้ง และครั้งที่ 2 ในวันที่ 14 สิงหาคม 2556 ซึ่งเป็นตัวแทนของฤดูฝน เพื่อการติดตามตรวจสอบ โดยเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประปาบริเวณคลองอุตะเกาทั้งหมด 5 แห่ง ได้แก่ อ่างเก็บน้ำสะเดา จุดสูบน้ำดิบของการประปาสะเดา-ป่าดงเบขาร์ จุดสูบน้ำดิบของการประปาพะตง-พังลา อ่างเก็บน้ำคลองหลา จุดสูบน้ำดิบของระบบประปาหาดใหญ่ น้ำบาดาลทั้งหมด 3 แห่ง ได้แก่ ในบริเวณหลุมฝังกลบขยะแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลา 1 แห่ง บริเวณชุมชนใกล้กับหลุมฝังกลบขยะแห่งหนึ่งในจังหวัดสงขลา 1 แห่ง และบริเวณชุมชนเทศบาลตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 1 แห่ง ตลอดจนน้ำประปาของการประปาส่วนภูมิภาค 3 แห่ง ได้แก่ การประปาพะตง-พังลา การประปาสะเดา และการประปาหาดใหญ่ โดยดำเนินการวิจัยเหมือนกันทั้ง 2 ครั้งของการเก็บตัวอย่าง ดังในภาพที่ 3-1 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประปา 5 แห่ง และภาพที่ 3-2 แสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบาดาลแห่งหนึ่งในชุมชนคอหงส์ วิธีการดำเนินการวิจัยของการเก็บตัวอย่างน้ำครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดำเนินการเหมือนกันคือ วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพและเคมี การตรวจวิเคราะห์ชนิดและปริมาณสารตั้งต้นในการก่อตัวของสาร NDMA ปริมาณสาร NDMA และค่าโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA-FP)



อ่างเก็บน้ำสะเดา



อ่างเก็บน้ำคลองหลา

ภาพบน อ่างเก็บน้ำ 2 แห่ง



การประปาสะเดา



การประปาพะตง-พังลา  
หาดใหญ่



การประปา

ภาพล่าง คลองรองรับน้ำดิบผลิตประปา 3 แห่ง

ภาพที่ 3-1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำดิบประปา บริเวณคลองอุตะเกาทั้งหมด 5 แห่ง





ภาพที่ 3-2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อบาดาลในชุมชนเทศบาลตำบลคองหงส์

เมื่อพิจารณาความหมายของบ่อบาดาลและน้ำบาดาล กล่าวได้ดังนี้

บ่อบาดาล (ground water well) ในที่นี้หมายถึงรูหรือปล่องที่ขุดหรือเจาะลงไปถึงชั้นน้ำบาดาลและใช้เครื่องสูบน้ำสูบขึ้นมาเพื่อประสงค์ที่จะเอาน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ ชั้นน้ำบาดาลและระดับน้ำใต้ดินนั้นอาจจะอยู่เสมอรระดับผิวดิน ต่ำกว่าผิวดินเพียงเมตรเดียว หรือหลายสิบเมตรก็ได้ บ่อบาดาลจึงแบ่งประเภทเป็นน้ำบ่อลึกและน้ำบ่อตื้น บ่อทุกบ่อไม่ว่าลึกเท่าใดหากขุดหรือเจาะลงไปถึงชั้นน้ำก็เรียกว่า บ่อบาดาลได้ (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2557) ในงานวิจัยนี้บ่อบาดาล ณ ที่เก็บน้ำตัวอย่างเป็นน้ำจากบ่อลึกที่อยู่ระหว่างชั้นหินกั้นน้ำ (confining bed)

น้ำบาดาล (ground water) น้ำฝนที่ตกลงสู่โลกจะไหลซึมลงดิน บางส่วนถูกดินดูดซับไว้ ส่วนที่เหลือไหลซึมต่อไปจนกระทั่งถึงชั้นดินหรือหิน ชั้นหินซึ่งมีน้ำเก็บกักเต็มช่องว่างนี้เรียกว่า เขตอิ่มตัว (zone of saturation) น้ำในชั้นหินส่วนนี้เรียกว่า “น้ำบาดาล” มีระดับผิวน้ำเรียกว่าระดับน้ำใต้ดิน (water table) ชั้นดินที่อยู่เหนือระดับน้ำจะมีน้ำอยู่บ้างแต่ไม่มากพอที่จะนำมาใช้เรียกว่า เขตอากาศแฝง (zone of aeration) การที่น้ำบาดาลไม่ไหลซึมลงต่อไปอีก เนื่องจากชั้นอิ่มตัวนี้ถูกรองรับไว้ด้วยชั้นหินเนื้อแน่นที่น้ำไม่สามารถซึมได้เรียกว่า ชั้นหินปิดกั้น (confining bed) ชั้นหินนี้อาจมีอยู่ในที่ระดับความลึกต่างๆ กัน และระหว่างชั้นหินปิดกั้นก็อาจมีชั้นน้ำอิ่มตัวอันเป็นแหล่งน้ำบาดาลเช่นกันวางแทรกตัวอยู่ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าบ่อบาดาลแต่ละบ่อนั้นมีความลึกไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชั้นน้ำบาดาลเหล่านั้นอยู่ในระดับความลึกเท่าใด (อุตร จารุรัตน์ และจารุรัตน์ วรนิสรากุล, 2537)

### 3.3 การเก็บตัวอย่าง การรักษาสภาพ และการจัดเก็บ

#### 3.3.1 การเก็บตัวอย่าง (sample collection)

การเก็บตัวอย่างน้ำจากจุดสูบน้ำดิบประปา น้ำประปา และน้ำบาดาล ทำการสุ่มตัวอย่างจากท่อจ่ายน้ำ โดยเปิดน้ำและปล่อยให้วนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำมีเสถียรภาพ (ปกติประมาณ 2 นาที) และเก็บตัวอย่างจากกระแสน้ำไหล กรอกตัวอย่างน้ำเต็มขวดโดยไม่มี headspace free จากนั้นเติมโซเดียมไฮโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ลงไปในขวดก่อนนำไปเก็บรักษาตัวอย่าง สำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำในอ่างเก็บน้ำ ทำการเก็บโดยใช้ขวดเก็บตัวอย่างน้ำเก็บน้ำจากใต้ผิวน้ำลึกประมาณ 10-30 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างและปิดผนึกให้สนิทขณะเวลาเก็บจนกระทั่งถึงขั้นตอนการวิเคราะห์ อุปกรณ์การสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำทั้งหมดต้องปราศจากพลาสติกหรือท่อ ยาง ปะเก็น และชิ้นส่วนอื่นๆ ที่อาจรบกวนสารที่ต้องการวิเคราะห์ตกลงในตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำที่แต่ละจุดเก็บน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ทั่วไป ได้เก็บน้ำปริมาณ 3 ลิตร และสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA NDMAFP และ NDMA precursors ได้เก็บน้ำปริมาณ 5 ลิตร

### 3.3.2 การทำลายคลอรีนในตัวอย่าง (sample dechlorination)

ตัวอย่างทั้งหมดถูกกำจัดสารคลอรีนออก ณ ขณะที่ทำการเก็บตัวอย่างโดยเติมสาร  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 80-100 มิลลิกรัมต่อน้ำตัวอย่างหนึ่งลิตร ก่อนจะนำไปเก็บรักษาในตู้แช่เย็น

### 3.3.3 การขนส่งตัวอย่างและการเก็บรักษา (sample transport and storage)

นำน้ำตัวอย่างเก็บในที่เย็นและขนส่งไปยังห้องปฏิบัติการ ในระหว่างขนส่งเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  ในที่มืดและนำไปเก็บในห้องรักษาความเย็นที่อุณหภูมิ  $4^{\circ}\text{C}$  จนกว่าทำการสกัด เพื่อชะลอปฏิกิริยาทางชีวภาพและรักษาสภาพน้ำดิบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA และสารตั้งต้นชนิดต่างๆ

## 3.4 กระบวนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

นำตัวอย่างทั้งหมดไปตรวจวัดคุณภาพด้านต่างๆ ซึ่งอธิบายได้จากพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช ความขุ่น ความเป็นด่าง แอมโมเนีย ไนไตรต์ ไนเตรต สารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (dissolved organic carbon, DOC) สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved organic nitrogen, DON) ค่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร (ultraviolet adsorption at wavelength 254 nm, UV-254) ค่าการดูดกลืนแสงยูวีจำเพาะ (specific ultraviolet adsorption, SUVA) ลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำ (fluorescent excitation emission matrix, FEEM) และค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA-FP) สรุปรพารามิเตอร์และวิธีการตรวจวัดคุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี การตรวจวัดปริมาณ และลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 สรุปพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพ เคมี และการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ สารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (NDMA) และสารตั้งต้นของ NDMA

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
<b>คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี</b>	
ความขุ่น (turbidity)	อ่านค่าโดยตรงจากเครื่องวัดความขุ่น (turbidity meter)
อุณหภูมิ (temperature)	อ่านค่าโดยตรงจากเทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
พีเอช (pH)	อ่านค่าโดยตรงจากเครื่องวัดพีเอช (pH meter)
ความเป็นด่าง (alkalinity)	วิเคราะห์ค่าความเป็นด่างของน้ำโดยการไทเทรตตามวิธีจาก Standard method ในส่วน 2320 B. Titration method
แอมโมเนีย ( $\text{NH}_4^+$ )	วิเคราะห์แอมโมเนียตามวิธี Salicylate method โดยใช้เครื่อง HACH DR 2700™ Portable Spectrophotometer
ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ )	วิเคราะห์ไนเตรตตามวิธี Cadmium Reduction method โดยใช้เครื่อง HACH DR 2700™ Portable Spectrophotometer
ไนไตรต์ ( $\text{NO}_2^-$ )	วิเคราะห์ไนไตรต์ตามวิธี Diazotization method โดยใช้เครื่อง HACH DR 2700™ Portable Spectrophotometer
<b>ปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำ</b>	
*คาร์บอนอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC)	ตามวิธีจาก Standard method ในส่วน 5310B. Combustion method. โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์
*ไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (TDN)	วิเคราะห์ TDN โดยใช้ TOC/TN analyzer
*ไนโตรเจนอินทรีย์ละลายน้ำ (DON)	รายละเอียดตั้งหัวข้อ 3.4.3
*ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ 254 นาโนเมตร (UV-254)	ตามวิธีจาก Standard method 5910 B. Ultraviolet absorption method โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer
*ค่าการดูดกลืนแสง UV จำเพาะ (SUVA)	SUVA เป็นค่าดัชนีชี้วัดของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่อยู่ในน้ำ คำนวณจากค่า UV-254 (หน่วย $\text{cm}^{-1}$ ) หารด้วยค่า DOC (หน่วย mg/L)
*สารอินทรีย์ละลายน้ำ (FEEM)	วัดโดยตรงด้วยเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์
<b>ปริมาณสาร NDMA และสารตั้งต้น</b>	
*ปริมาณสาร NDMA	ตามวิธีมาตรฐาน EPA 521 SPE Extraction Gas chromatography Method และวิเคราะห์ปริมาณสารด้วยเครื่อง GC-NPD)
*ปริมาณสาร DMA, DEA, DBA และ aniline	วิเคราะห์สาร aniline ตามวิธี SPE ที่ดัดแปลงจาก Jurado-Sanchez <i>et al.</i> (2012) และวิเคราะห์สาร DMA, DEA, DBA ตามวิธี benzenesulfonyl chloride (BSC) derivatization and liquid-liquid extraction ที่ดัดแปลงจาก Sacher <i>et al.</i> (1997) โดยใช้ GC-FID
*ค่าโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA-FP)	ใช้วิธีการวิเคราะห์ THMFP (ตั้งหัวข้อ 3.4.7) ตามวิธี Standard method 5710 B. Trihalomethane Formation Potential (THMFP) และ Standard method 4500-Cl G. DPD Colorimetric method

\*หมายเหตุ: กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูเปิด 0.7 ไมโครเมตร (Standard Method, 1995)

### 3.4.1 การศึกษาคุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี

ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำของตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างทั้งหมด ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช ความขุ่น ความเป็นด่าง แอมโมเนีย ไนไตรต์ และไนเตรต ตามวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์คุณภาพน้ำทางกายภาพและทางเคมี ดังสรุปในตารางที่ 3-2

### 3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำ (DOC)

ตามวิธีจาก Standard method ในส่วน 5310B Combustion method และวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ ยี่ห้อ SHIMADSHU รุ่น TOC-L with TOC Control-L

### 3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON)

วิเคราะห์ค่า DON ของน้ำตัวอย่างโดยวิธีการที่ดัดแปลงจาก Xu *et al.* (2010) ดำเนินการโดยการกรองน้ำตัวอย่างด้วยชุด Dead-end filtration ที่ทำจากสแตนเลส ดังภาพที่ 3-3 และนำไปวิเคราะห์ค่า Total Dissolved Nitrogen (TDN) ของน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยชุดเมมเบรนแล้ว โดยใช้เครื่อง High performance TOC/TN<sub>b</sub> analyzer, multi N/C 3100, Analytic Jena AG, Germany ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพที่ 3-3 ชุดอุปกรณ์ dead-end filtration



ภาพที่ 3-4 ขั้นตอนการกรองด้วยเมมเบรน

การทดลองการกรองด้วยชุดอุปกรณ์ Dead-end filtration แสดงขั้นตอนการทำงานในภาพที่ 3-4 ดังนี้ ขั้นที่ (1) ตัดแผ่นเมมเบรนเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขั้นที่ (2) นำแผ่นเมมเบรนใส่ลงในชุดกรอง ขั้นที่ (3) ประกอบชุดอุปกรณ์ทั้งหมดและรัดให้แน่นด้วยแคลมป์ (clamp) ขั้นที่ (4) เติมน้ำตัวอย่างปริมาณ 200 มิลลิลิตร ลงในชุดกรองทางด้านบน และขั้นที่ (5) ต่อชุดอุปกรณ์กับท่อแก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และปรับให้ได้ความดันที่ 40 psi จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างไหลผ่านเมมเบรนจนกระทั่งเหลือน้ำส่วนบน (retentate) ประมาณ 50 มิลลิลิตร จึงหยุดการเดินระบบ จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำ retentate มาทำการวิเคราะห์ค่า TDN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> และ NH<sub>4</sub><sup>+</sup> เพื่อนำไปคำนวณค่า DON การกรองตัวอย่างน้ำแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง โดยแต่ละตัวอย่างจะกรอง 2 ครั้ง เพื่อให้ได้น้ำตัวอย่างที่เพียงพอในการวิเคราะห์

ค่า DON คำนวณได้จากการคูณมวล ดังสมการที่ (1)

$$C_F = \frac{C_R V_R + C_P V_P}{V_F} \approx \frac{C_R (V_F - V_P)}{V_F} \quad (1)$$

โดย  $C_F$  คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำที่เข้าระบบ  
 $V_F$  คือ ปริมาตรของน้ำที่เข้าระบบ  
 $C_R$  คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำส่วนที่เหลือจากการกรอง (retentate)  
 $V_R$  คือ ปริมาตรของน้ำส่วนที่เหลือจากการกรอง (retentate)  
 $C_P$  คือ ความเข้มข้นของ DON ในน้ำส่วนที่ผ่านการกรอง (permeate)  
 $V_P$  คือ ปริมาตรของน้ำส่วนที่ผ่านการกรอง (permeate)

สารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (DON) เป็นผลต่างระหว่างค่าไนโตรเจนละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved nitrogen, TDN) กับสารอนินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ (dissolved inorganic nitrogen, DIN) โดยที่ค่า DIN เป็นผลรวมของ ไนเตรต ไนไตรต์ และแอมโมเนีย แสดงดังสมการที่ (2), (3) และ (4)

$$DIN = NO_3^- + NO_2^- + NH_3/NH_4^+ \quad (2)$$

$$TDN = DIN + DON \quad (3)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad DON = TDN - (NO_3^- + NO_2^- + NH_3/NH_4^+) \quad (4)$$

#### 3.4.4 ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ 254 นาโนเมตร (UV-254)

ตามวิธีจาก Standard method 5910 B. Ultraviolet absorption method โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น Thermo spectronic, England

#### 3.4.5 ค่าการดูดกลืนแสง UV จำเพาะ (SUVA)

ค่า SUVA เป็นค่าดัชนีชี้วัดของสารอินทรีย์กลุ่มฮิวมิกที่อยู่ในน้ำ คำนวณได้จากค่าของ UV-254 (หน่วย cm<sup>-1</sup>) หารด้วยค่า DOC (หน่วย mg/L)

### 3.4.6 การตรวจวัดลักษณะสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค Fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM นั้น โมเลกุลของสารอินทรีย์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงฟลูออเรสเซนซ์จากหลอด xenon ทำให้โมเลกุลดังกล่าวถูกเปลี่ยนจาก ground state ไปสู่ low energy state โมเลกุลของสารอินทรีย์ปล่อยพลังงานส่วนเกินที่รับเข้าไปออกมาเพื่อเปลี่ยนจาก low energy state ไปสู่ ground state อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกมามีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ใช้กระตุ้น และความยาวคลื่นที่วัดได้ในขณะที่โมเลกุลปล่อยพลังงานออกมาสูงกว่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น

ดังนั้น FEEM จึงเป็นผลรวมของ emission spectra ของน้ำตัวอย่างที่ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้น (excitation wavelength) ต่างๆ ที่ถูกบันทึกเป็นเมทริกซ์ของความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescent intensity) ซึ่งได้จากการตรวจวัดด้วยการใช้เครื่อง Spectrofluorometer โดยมีรายละเอียดและวิธีการต่างๆ ดังนี้

#### 1) การเตรียมสารมาตรฐานโดยสาร Quinine sulfate

สาร quinine sulfate  $[(C_{20}H_{24}N_2O_2)H_2SO_4 \cdot 2H_2O]$  เป็นสารที่นำมาใช้ในการตรวจสอบค่ามาตรฐานของเครื่อง Spectrofluorometer ทำได้โดยเตรียม quinine sulfate ในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.1 M ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วนำไปวัดค่าเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์โดยสแกนความยาวคลื่นที่ emission wavelength (Em) เท่ากับ 450 นาโนเมตร และใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นที่ excitation wavelength (Ex) เท่ากับ 345 nm ซึ่ง 10 quinine sulfate unit (QSU) เท่ากับความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารมาตรฐานที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Kasuga *et al.*, 2003)

#### 2) สภาวะการทำงานของเครื่อง Spectrofluorometer

Measurement mode: emission  
 Excitation band width: 5 nm  
 Emission band width: 5 nm  
 Response: medium  
 Sensitivity: high  
 Excitations wavelengths: 220 nm-450 nm  
 Start: 220 nm  
 End: 600 nm  
 Data pitch: 1 nm  
 Scanning speed: 2000 nm/ min

#### 3) ขั้นตอนการตรวจวัด FEEM

1. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วยแผ่นกรอง GF/F ขนาด 0.7 ไมโครเมตร และปรับค่าพีเอชในน้ำให้มีค่าเป็นกลาง (pH=7)
2. เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่อง Spectrofluorometer และปล่อยทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง เพื่อให้พลังงานแสงคงที่ (photometric stability)

3. นำสารมาตรฐาน Quinine sulfate ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม ใส่ในคิวเว็ตโปร่งแสงทั้ง 4 ด้าน เพื่อวัดค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ Emission wavelength (Em) เท่ากับ 450 นาโนเมตร และ ที่ Excitation wavelength (Ex) เท่ากับ 345 นาโนเมตร

4. วัดค่า FEEM ของน้ำ Milli-Q ที่ Ex ตั้งแต่ 220 นาโนเมตร จนกระทั่งครบ 450 นาโนเมตร (เปลี่ยนความถี่ทุกๆ 10 นาโนเมตร) โดยที่ Ex หนึ่งค่าทำการวัดค่า Em ตั้งแต่ 220 ถึง 600 นาโนเมตร

5. วัดค่า FEEM ของน้ำตัวอย่างที่ Ex ตั้งแต่ 220 นาโนเมตรจนกระทั่งครบ 450 นาโนเมตร (เปลี่ยนความถี่ทุกๆ 10 นาโนเมตร) โดยที่ Ex หนึ่งค่าทำการวัดค่า Em ตั้งแต่ 220 ถึง 600 นาโนเมตร

6. นำข้อมูลที่ได้ในรูปแบบฐานข้อมูล ASCII (\*.TXT) มาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โปรแกรมจะทำการคำนวณนำค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำตัวอย่างมาลบค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำ Milli-Q ออก และนำมาหารด้วยค่าความเข้มแสงที่ค่ามาตรฐานของ Quinine sulfate ได้ค่าในหน่วย QSU

7. นำผลข้อมูลจากโปรแกรมมาสร้างกราฟในรูปแบบเส้นชั้นความสูง (contour) และสามมิติ (3D) และอ่านค่า Ex และ Em จากกราฟแล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับ putative origins (Chen *et al.*, 2003; Musikavong *et al.*, 2006) สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ

### 3.4.7 ปริมาณสารไนโตรโซไดเมทิลเอมีน (NDMA)

วิเคราะห์โดยการสกัดตามวิธีมาตรฐาน EPA521 และตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-NPD มีขั้นตอนดังนี้  
**ขั้นตอนที่ 1** การเตรียมสารละลายมาตรฐาน (calibration curve) ของ NDMA

เตรียมสารละลายมาตรฐานของ NDMA จาก stock solution ที่ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปรับปริมาตรด้วยสารไดคลอโรมีเทนให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน NDMA เป็น 20, 50, 60, 80, 100 ไมโครกรัมต่อลิตร นำแต่ละขวดสารมาตรฐานไปฉีดเข้าเครื่อง GC ด้วยปริมาตร 5 ไมโครลิตร และสร้างเป็นกราฟสารละลายมาตรฐานที่มีความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพื้นที่ใต้พีค (peak area) ของ NDMA ต่อ Internal standard คือสาร *N*-nitroso-di-*n*-propylamine-d14 (NDPA-d14) กับค่าความเข้มข้นของ NDMA และคำนวณสาร NDMA โดยใช้ linear regression equation ( $y = ax+b$ ) หน่วยเป็นไมโครกรัมต่อลิตร

เนื่องจากสาร NDMA ดูดกลืนแสงยูวีได้ดี ข้อควรระวังในการใช้สาร NDMA คือ ขณะปฏิบัติการทุกครั้งต้องดำเนินการในห้องมืดและตู้ดูดควัน และสวมหน้ากากป้องกันสารเคมีที่มีตัวกรอง เช่น หน้ากากป้องกันสารระเหยชนิดไส้กรองเดี่ยว และควรสวมเสื้อผ้าให้มิดชิด สวมถุงมือและแว่นครอบตาป้องกันสารเคมี

#### **ขั้นตอนที่ 2** การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำ และนำมา dechlorination ทันทีโดยเติม sodium thiosulfate ความเข้มข้น 80-100 มิลลิกรัมต่อน้ำหนึ่งลิตร นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 6 องศาเซลเซียส ทำการสกัดด้วยเทคนิคแบบตัวดูดซับของแข็ง (solid phase extraction, SPE) ตามวิธีการมาตรฐาน EPA521 และนำตัวอย่างสารสกัดเก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิต่ำกว่า -15 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย GC

#### **ขั้นตอนที่ 3** การวิเคราะห์สาร NDMA NDMAFP และสารไนโตรซามีน 9 ชนิด

วิเคราะห์สาร NDMA NDMAFP และไนโตรซามีน 9 ชนิด ตามวิธีมาตรฐาน EPA521 ซึ่งอธิบายโดยย่อดังนี้

(1) วิเคราะห์สาร NDMA NDMAFP และสแกน (scan) สารไนโตรซามีน 9 ชนิด ในตัวอย่างน้ำ 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) ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส (Gas chromatography with nitrogen phosphorus detector, GC-NPD) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สาร NDMA ในเชิงปริมาณ ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการมาตรฐาน EPA521 โดยใช้บริการเครื่องมือที่ศูนย์เครื่องมือฯ ม.สงขลานครินทร์ เครื่องที่ใช้คือ GC ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 6890 คอลัมน์ Stabilwax (Carbowax polyethylene glycol) ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร ทำการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สาร NDMA และสารไนโตรซามีน 9 ชนิด ดังนี้

Inlet Condition

Mode: การฉีดด้วยระบบ Splitless ที่ปริมาตร 5 ไมโครลิตร อุณหภูมิของส่วนฉีดสาร 220°C อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ความดัน 19.33 psi แก๊สพาคือแก๊สฮีเลียมและอัตราการไหลรวม 64.8 มิลลิลิตรต่อนาที

Oven condition

โปรแกรมอุณหภูมิของ oven ดังแสดงในตารางที่ 3-3



### ตารางที่ 3-3 โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร NDMA

Ramp	Rate (°C/min)	Temp (°C)	Time (min)	Remark
		40	0	Initial temp. 40°C
1	7	110	2	-
2	15	240	3	

#### Detector condition

อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ 250°C อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง) ที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที Make up แก๊ส (แก๊สไนโตรเจน) เท่ากับ 30 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที

#### (2) คลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual Chlorine)

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP) ทำการตรวจวัดค่าคลอรีนอิสระคงเหลือที่อยู่ในน้ำตามวิธีการมาตรฐาน 4500-Cl G. โดยใช้วิธี DPD Colorimetric Method

#### (3) การสกัด (Extraction)

นำตัวอย่างน้ำมาสกัดตามวิธีการใน method EPA 521 SPE Extraction Gas chromatography Method ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ นำตัวอย่างน้ำ 1 ลิตรมาสกัดสาร NDMA โดยใช้ชุดสกัด Resprep EPA 521 solid-phase extraction (SPE) ดังภาพที่ 3-5 โดยใช้ SPE cartridge ขนาด 6 มิลลิลิตรที่บรรจุ coconut activated charcoal ปริมาณ 1.8-2.2 กรัม ขั้นแรกให้ปรับสภาพ cartridge ด้วยสารละลายตามลำดับดังนี้ เมทิลีนคลอไรด์ (MeCl<sub>2</sub>) 3 มิลลิลิตร ตามด้วยเมทานอล 3 มิลลิลิตร เติมนิวเมทานอล 3 มิลลิลิตร อีกครั้ง น้ำ DI 3 มิลลิลิตร และเติมน้ำ DI ซ้ำอีก 5 ครั้ง ต่อมาคือการสกัดสารตัวอย่าง นำตัวอย่างน้ำมาดูดผ่าน cartridge ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภายใต้สภาวะสุญญากาศ หลังจากดูดน้ำตัวอย่างหมดแล้ว ให้ปล่อยอากาศไหลผ่าน cartridge เป็นเวลานาน 10 นาที ขั้นตอนสุดท้ายคือการชะตัวอย่าง โดยนำเมทิลีนคลอไรด์ชะผ่าน cartridge จนได้สารสกัดที่ต้องการประมาณ 13 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปกำจัดน้ำโดยนำไปผ่านคอลัมน์ที่บรรจุโซเดียมซัลเฟต แอนไฮดรัส (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ต่อมานำสารสกัดที่ได้ไประเหย MeCl<sub>2</sub> ให้เหลือปริมาตรสุดท้ายประมาณ 0.9 มิลลิลิตร (ห้ามน้อยกว่า 0.5 มิลลิลิตร) โดยนำไป purge ด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง จากนั้นนำไปปรับปริมาตรให้เป็น 1 มิลลิลิตร และนำสารสกัด 5 ไมโครลิตรไปวิเคราะห์ด้วย GC-NPD



ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์ชุดสกัด Solid phase extraction (SPE)

### 3.4.8 การวิเคราะห์โอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA Formation Potential, NDMA-FP)

วิเคราะห์โดยใช้วิธีการในการวิเคราะห์ THMFP เป็นพื้นฐานประยุกต์ร่วมกับวิธีของ <sup>3</sup> Mitch *et al.*, 2003 และ Lee *et al.*, 2007 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### (1) การตรวจวัดปริมาณคลอรีนคงเหลือ (free chlorine residual)

การหาปริมาณคลอรีนคงเหลือในน้ำตัวอย่าง เริ่มต้นจากการนำน้ำตัวอย่าง (pH = 7±0.2) ปริมาณ 1000 ml มาเติมสารคลอรีน (chlorine) และเติมสารละลายฟอสเฟต (phosphate solution) เพื่อรักษาสภาพน้ำให้เป็นกลาง นำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นวัดปริมาณคลอรีนที่คงเหลือในน้ำ ตามวิธีการใน Standard method ในส่วน 4500-Cl G. DPD Colorimetric method

#### (2) การสกัด (extraction)

ทำการสกัดน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ตามวิธีการมาตรฐาน EPA521 โดยวิธีการสกัด Solid phase extraction (SPE)

#### (3) การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์สาร NDMA โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography with Nitrogen Phosphorus Detector, GC-NPD)

### 3.4.9 การวิเคราะห์สารตั้งต้นหลักในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA precursors)

โดยเลือกตรวจวัดตัวแทนสารตั้งต้นหลักในการก่อตัวของ NDMA ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) สารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน ได้แก่ Dimethylamine (DMA), Diethylamine (DEA) และ Dibutylamine (DBA) และ 2) กลุ่มอะโรมาติกเอมีน คือสาร aniline โดยทำการวิเคราะห์กลุ่มสารอะโรมาติกเอมีนด้วยวิธีการแบบ SPE ที่ดัดแปลงจาก Jurado-Sanchez *et al.* (2012) และวิเคราะห์สารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีนด้วยวิธีการแบบ benzenesulfonyl chloride (BSC) derivatization and liquid-liquid extraction ที่ดัดแปลงจาก Sacher *et al.* (1997) จากนั้นทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง GC with Flame Ionization Detector (GC-FID) ซึ่งอธิบายโดยย่อ ดังนี้

#### (1) การเตรียมตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร จากนั้นเก็บรักษาด้วยกรด ให้ pH ต่ำกว่า 2 และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C ก่อนนำไปวิเคราะห์ นำตัวอย่างน้ำมากรองผ่านแผ่นกรอง GF/F ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร จากนั้นนำน้ำมาปรับ pH สำหรับการสกัดสารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (ได้แก่ DMA DEA และ DBA) ให้ปรับ pH ของน้ำเป็น 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสำหรับสกัดสาร aniline ให้ปรับ pH ของน้ำเป็น 7.4 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>)

#### (2) การสกัด (extraction)

##### (2.1.1) การสกัดสาร DMA DEA และ DBA

ทำการสกัดสาร DMA DEA และ DBA ในน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เตรียมตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร เทลงในฟลasks ขนาด 100 มิลลิลิตร และเติม triphenylphosphate (TPP) เป็น Internal standard เพื่อให้ได้ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) จากนั้นเติม 100 ไมโครลิตรของ benzenesulfonyl chloride (0.5 g/ml stock solution) เป็น derivatizing agent ต่อมานำสารละลายไปกวนบนเครื่อง magnetic stirrer เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และสกัด 2 ครั้งด้วย MeCl<sub>2</sub> ปริมาณ

20 มิลลิลิตร (เขย่า 2 นาทีโดยใช้กรวยแยก) จากนั้นนำสารที่สกัดได้ไปเพิ่มความเข้มข้นด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง จนได้ปริมาตรสุดท้ายประมาณ 1 มิลลิลิตร และนำสารสกัด 1 ไมโครลิตรไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID

#### (2.1.2) การสกัดสาร aniline

ทำการสกัดสาร aniline ในน้ำตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (Solid-phase extraction, SPE) ชนิด LiChrolut EN sorbent ปริมาณ 75 มิลลิกรัม ที่บรรจุลงใน cartridge ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Jurado-Sanchez *et al.* (2009) ซึ่งอธิบายขั้นตอนโดยย่อดังนี้ เตรียมตัวอย่างน้ำหรือสารละลายมาตรฐาน ปริมาณ 250 มิลลิลิตร ปรับ pH เป็น 7.4 จากนั้นนำตัวอย่างน้ำไหลผ่านคอลัมน์ LiChrolut EN sorbent ที่อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อน้ำไหลผ่านจนหมด ไล่น้ำตัวอย่างที่เหลือในคอลัมน์ด้วย air stream เป็นเวลา 2 นาที ขั้นตอนต่อมา จะสารที่สกัดได้ด้วย  $\text{MeCl}_2$  ปริมาณ 500 ไมโครลิตร ที่มีสาร Internal standard (triphenylphosphate, TPP) ผสมอยู่ จากนั้นนำสารที่สกัดได้ไป concentrate ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์สูง จนได้ปริมาตรสุดท้ายประมาณ 10 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปปรับปริมาตรให้เป็น 1 มิลลิลิตร และนำสารสกัด 5 ไมโครลิตรไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID

#### (3) การวิเคราะห์สาร NDMA precursors (DMA DEA DBA และ aniline)

นำตัวอย่างสารสกัดมาวิเคราะห์ NDMA precursors ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC) เครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด FID (Flame Ionization Detector) โดยใช้บริการเครื่องมือที่ศูนย์เครื่องมือฯ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เครื่องที่ใช้คือ GC ยี่ห้อ Hewlette Packard รุ่น 6890 คอลัมน์ Stabilwax (Carbowax polyethylene glycol) ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร ทำการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (ได้แก่ DMA, DEA, DBA) และสารกลุ่มอะโรมาติกเอมีน (aniline) ดังสรุปด้านล่างนี้

##### Inlet Condition

Mode: การฉีดด้วยระบบ splitless ที่ปริมาตร 1 ไมโครลิตร สำหรับสารกลุ่มอะลิฟาติก และ 5 ไมโครลิตร สำหรับสารกลุ่มอะโรมาติก อุณหภูมิของส่วนฉีดสาร 250°C ความดัน 11.19 psi แก๊สพาคือแก๊สฮีเลียม และอัตราการไหลรวม 63.9 มิลลิลิตรต่อนาที

##### Oven condition

โปรแกรมอุณหภูมิของ Oven ดังแสดงในตารางที่ 3-4 และ 3-5

ตารางที่ 3-4 โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร DMA DEA และ DBA

Ramp	Rate (°C/min)	Temp (°C)	Time (min)	Remark
		35	5.00	Initial temp. 35°C
1	40	250	1.00	-

ตารางที่ 3-5 โปรแกรมอุณหภูมิของ oven สำหรับวิเคราะห์สาร aniline

Ramp	Rate (°C/min)	Temp (°C)	Time (min)	Remark
		40	1.00	Initial temp. 35°C
1	15	60	-	-
2	40	200	3.00	-

Detector condition

อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ 250°C อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน (ให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง) ที่ 30 มิลลิลิตรต่อนาที make up ก๊าซ (ก๊าซไนโตรเจน) เท่ากับ 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของอากาศที่ 300 มิลลิลิตรต่อนาที

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี ปริมาณและลักษณะสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ เคมีและปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดา อ่างเก็บน้ำคลองหลา น้ำดิบประปา น้ำประปาจากระบบผลิตประปา 3 แห่ง ได้แก่ การประปาสะเดา การประปาพะตง-พังลา และการประปาหาดใหญ่ และน้ำจากบ่อบาดาล 3 แห่ง ได้แก่ บ่อบาดาลใกล้หลุมฝังกลบขยะในจังหวัดสงขลา 2 แห่ง และบ่อบาดาลในชุมชนเทศบาลตำบลคองหงส์ 1 แห่ง ดังตารางที่ 4-1 น้ำจากอ่างเก็บน้ำทั้ง 2 แห่ง มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.9-7.5 น้ำดิบประปามีสภาพเป็นกลางมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.8-7.8 ส่วนน้ำประปาก่อนเติมคลอรีนมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.4-7.6 และน้ำประปาหลังเติมคลอรีนมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.3-6.6 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมน้ำบริโภค (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2521) กำหนดค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5-8.5 ซึ่งค่า pH ในน้ำประปามีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว ส่วนมาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคกำหนดค่า pH ระหว่าง 7.0-8.5 ผลการตรวจวัดน้ำจากบ่อบาดาลทั้ง 3 แห่ง มีค่า pH อยู่ระหว่าง 5.6-8.0 โดยค่าต่ำเป็น pH ของน้ำบาดาลจากบ่อในชุมชนคองหงส์ กล่าวได้ว่าน้ำบาดาลในชุมชนคองหงส์มีค่า pH ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

อุณหภูมิของน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบประปา น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีน และน้ำบาดาล มีค่าอยู่ในช่วง 27-32 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นด่างของน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 7-31 mg/L as CaCO<sub>3</sub> น้ำดิบประปา มีค่าอยู่ในช่วง 14-26 mg/L as CaCO<sub>3</sub> สำหรับน้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีความเป็นด่างค่อนข้างต่ำซึ่งไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2-20 mg/L as CaCO<sub>3</sub>

การผลิตน้ำประปาเมื่อมีการเติมสารส้มหรือสารโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ มีความจำเป็นต้องมีความเป็นด่างที่เพียงพอเพื่อให้เกิดโคแอกกูเลชันที่สมบูรณ์ กรณีนี้ น้ำดิบประปามีความเป็นด่างค่อนข้างต่ำทำให้ต้องเติมด่างเพิ่มเติม ส่วนความเป็นด่างของน้ำบาดาลจากบ่อในชุมชนคองหงส์มีค่าอยู่ในช่วง 11-13 mg/L as CaCO<sub>3</sub> ค่าความเป็นด่างของน้ำบาดาลจากบ่อใกล้หลุมฝังกลบขยะทั้ง 2 แห่ง มีความเป็นด่างค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 242-265 mg/L as CaCO<sub>3</sub> แม้กระนั้นก็ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภคซึ่งกำหนดค่าที่เหมาะสมคือต้องไม่เกินกว่า 300 mg/L as CaCO<sub>3</sub>

ความขุ่น (turbidity) เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมทั้งตะกอนแขวนลอยต่างๆ เช่น ดิน ซากพืช ซากสัตว์ ความขุ่นของน้ำมีหน่วย Nephelometric Turbidity Units (NTU) น้ำธรรมชาติมีความขุ่นอยู่เสมอ น้ำใสมีค่าความขุ่นไม่เกิน 25 NTU น้ำขุ่นปานกลางมีค่า 25-100 NTU น้ำขุ่นมากมีค่าความขุ่นเกิน 100 NTU เกณฑ์ความขุ่นของแหล่งน้ำทั่วไปคือน้อยกว่า 100 NTU เพราะจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2557) ความขุ่นของน้ำในอ่างเก็บน้ำสะเดามีค่าต่ำ ส่วนความขุ่นน้ำจากอ่างเก็บน้ำคลองหลามีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 32-58 NTU ส่วนน้ำดิบประปามีความขุ่นค่อนข้างสูงโดยมีค่า 8-51 NTU โดยน้ำที่ความขุ่นสูงที่สุดคือน้ำดิบประปาหาดใหญ่เนื่องจากตั้งอยู่บริเวณท้ายน้ำ สำหรับความขุ่นของน้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีน มีค่าอยู่ในช่วง 0.7-1.7 NTU และน้ำบาดาลมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-1.1 NTU น้ำประปามีความขุ่นน้อยกว่า 1.7 NTU (ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคกำหนดความขุ่นในน้ำใช้ต้องไม่เกิน 5 NTU) ซึ่งน้ำประปาจากระบบประปาทั้ง 3 แห่งมีค่าความขุ่นต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีตัวแทนได้แก่ Dissolved organic carbon (DOC), ultraviolet adsorption at wavelength 254 (UV-254) และ specific ultraviolet adsorption (SUVA)

ตารางที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนละลายน้ำในน้ำจากน้ำดิบในคลองอุต๊ะเกา อ่างเก็บน้ำ น้ำประปา และบ่อบาดาล จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1 และ 2

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พารามิเตอร์คุณภาพน้ำ				ปริมาณและลักษณะสารอินทรีย์							
		พีเอช	อุณหภูมิ	ความเป็นด่าง	ความขุ่น	DOC	UV-254	SUVA	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N	DON	
อ่างเก็บน้ำสะเดา	1	7.5	30.5	7.0	2.1	2.3	0.06	0.02	0.02	0.10	0.00	0.0	
	2	6.9	30.0	12.0	3.0	2.0	0.13	0.06	0.06	0.01	0.00	0.0	
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	1	7.1	32.0	28.5	58.3	2.1	0.43	0.20	0.26	0.30	0.00	0.0	
	2	7.0	31.0	31.5	32.6	1.9	0.39	0.20	0.29	0.00	0.00	0.0	
น้ำดิบสะเดา	1	7.8	27.0	15.5	27.1	2.8	0.06	0.02	0.02	0.20	0.00	0.0	
	2	7.0	28.0	14.5	13.6	2.2	0.21	0.09	0.19	0.00	0.00	0.0	
น้ำดิบพะตง-พังลา	1	6.9	28.0	27.0	43.0	3.8	0.26	0.06	0.17	1.50	0.01	0.8	
	2	6.8	28.0	20.0	8.2	3.0	0.18	0.06	0.16	0.48	0.00	0.7	
น้ำดิบหาดใหญ่	1	7.0	28.0	20.5	51.6	4.4	0.46	0.10	0.56	1.10	0.08	0.3	
	2	6.7	30.0	26.0	25.7	4.3	0.33	0.07	0.62	0.34	0.00	0.4	
น้ำประปาสะเดา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	7.6	27.5	7.5	0.7	1.6	0.04	0.02	ND	0.40	0.01	0.0	
	2	6.5	28.0	12.0	1.1	1.5	0.08	0.05	0.01	0.03	0.00	0.2	
น้ำประปาพะตง (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	6.7	29.0	13.5	0.7	2.7	0.06	0.02	ND	2.00	0.03	1.4	
	2	6.5	28.0	11.5	0.6	1.8	0.09	0.05	0.02	0.38	0.00	0.5	
น้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	6.4	29.5	17.5	1.1	2.6	0.07	0.02	0.08	1.30	0.00	0.5	
	2	6.7	29.0	20.0	0.8	2.5	0.11	0.04	0.06	0.46	0.00	0.9	
น้ำประปาสะเดา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	6.3	29.0	2.0	1.4	1.6	0.02	0.01	ND	0.20	0.02	0.0	
	2	6.8	28.0	12.5	0.8	1.7	0.10	0.06	0.03	0.03	0.00	0.1	
น้ำประปาพะตง (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	6.6	28.0	8.0	1.2	2.4	0.05	0.02	ND	1.70	0.00	1.3	
	2	6.6	28.5	11.0	0.7	1.7	0.13	0.07	0.02	0.56	0.00	0.6	
น้ำประปาหาดใหญ่ (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	6.5	29.5	11.5	1.7	2.5	0.17	0.06	ND	1.00	0.00	0.6	
	2	6.5	29.0	17.5	0.7	2.5	0.10	0.04	0.05	0.49	0.01	0.7	
น้ำบาดาล 1 ใกล้หลุมฝังกลบขยะ	1	7.6	29.5	265.0	0.7	0.3	0.00	0.00	ND	0.10	0.00	ND	
	2	7.9	29.5	265.0	0.7	0.4	0.06	0.15	0.04	ND	0.00	ND	
น้ำบาดาล 2 ในบริเวณหลุมฝังกลบขยะ	1	7.9	29.5	241.5	1.1	0.3	0.00	0.02	ND	0.30	0.00	ND	
	2	8.0	31.5	243.5	0.4	0.8	0.08	0.10	0.04	0.02	0.00	ND	
น้ำบาดาล 3 ในชุมชนคอหงส์	1	6.2	27.0	13.0	0.6	0.2	0.01	0.03	ND	0.10	0.00	ND	
	2	5.6	29.5	11.5	0.4	0.4	0.08	0.17	0.01	0.01	0.00	ND	

หมายเหตุ: อุณหภูมิ หน่วย °C; ความเป็นด่าง หน่วย mg/L as CaCO<sub>3</sub>; ความขุ่น หน่วย NTU; DOC หน่วย mg C/L; NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N และ DON หน่วย mg N/L; UV-254 หน่วย cm<sup>-1</sup>; SUVA หน่วย L/mg-m; ND = not detected.

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนละลายน้ำ พบว่าน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.9-2.3 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร น้ำดิบประปาทั้ง 3 แห่งจากระบบประปาสะเตา พะตง และหาดใหญ่มีค่า DOC อยู่ในช่วง 2.2-2.8 3.1-3.8 และ 4.3-4.5 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร ตามลำดับ โดยค่า DOC มีค่าเพิ่มขึ้นขึ้นจากต้นน้ำ กลางน้ำ ไปยังปลายน้ำ น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่า DOC อยู่ในช่วง 1.5-2.7 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร และน้ำบาดาลมีค่า DOC อยู่ในช่วง 0.3-0.8 มิลลิกรัมคาร์บอนต่อลิตร น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า UV-254 อยู่ในช่วง  $0.062-0.435 \text{ cm}^{-1}$  น้ำดิบประปามีค่า UV-254 อยู่ในช่วง  $0.062-0.465 \text{ cm}^{-1}$  น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่าอยู่ในช่วง  $0.022-0.172 \text{ cm}^{-1}$  และน้ำบาดาลมีค่า UV-254 ค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง  $0.003-0.089 \text{ cm}^{-1}$  จากการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในแหล่งน้ำต่างๆ สรุปได้ว่าน้ำดิบประปามีค่า DOC และ UV-254 สูงที่สุด รองลงมาคือน้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำจากระบบประปา และน้ำบาดาล ตามลำดับ สำหรับปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำบาดาลทั้ง 3 แห่งนี้มีค่าน้อย โดยทั่วไปยังไม่มีรายงานการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในน้ำบาดาล อาจกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำบางส่วนได้ผ่านการกรองในชั้นใต้ดินเมื่อถูกชะลงสู่บ่อบาดาลชั้นลึกทำให้ค่า DOC ลดลง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้วิเคราะห์เฉพาะสารอินทรีย์ มิได้มุ่งเน้นวิเคราะห์สารอื่นๆ เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้น้ำควรมีการวิเคราะห์สารปนเปื้อนอื่นๆ ก่อนนำน้ำไปอุปโภคและบริโภคต่อไป

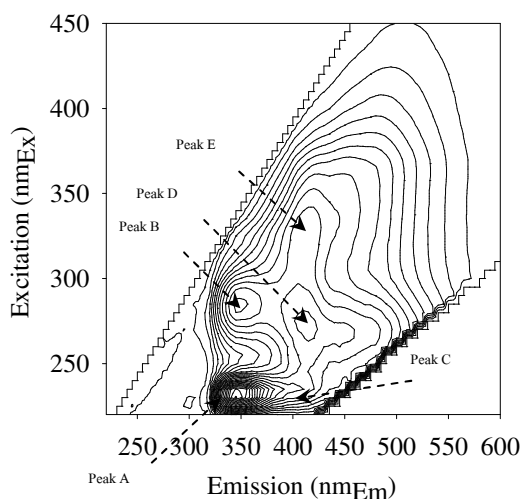
การวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนละลายน้ำ ดังตารางที่ 4-1 น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีปริมาณแอมโมเนีย ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) อยู่ในช่วง 0.02-0.29 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำดิบประปามี  $\text{NH}_4\text{-N}$  ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 0.02-0.62 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร โดยน้ำดิบประปาหาดใหญ่มี  $\text{NH}_4\text{-N}$  สูงสุด น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมี  $\text{NH}_4\text{-N}$  อยู่ในช่วง 0.0-0.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร สำหรับค่ามาตรฐานแอมโมเนียในน้ำผิวดินกำหนดว่าต้องไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าแอมโมเนียในน้ำจากน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภามีค่าต่ำกว่าค่าดังกล่าวยกเว้นน้ำดิบประปาหาดใหญ่ เมื่อพิจารณาค่าไนเตรต ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) สำหรับน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  อยู่ในช่วง 0.004-0.3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำดิบประปาทั้ง 3 แห่งมีค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  ต่ำโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0-1.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่าอยู่ในช่วง 0.03-2.0 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และน้ำบาดาลมีค่า  $\text{NO}_3\text{-N}$  อยู่ในช่วง ND-0.3 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร สำหรับค่ามาตรฐาน  $\text{NO}_3\text{-N}$  ในน้ำผิวดินกำหนดไว้ว่าต้องไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับปริมาณไนไตรต์ ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) ของน้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.003-0.005 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำดิบประปามีค่า  $\text{NO}_2\text{-N}$  อยู่ในช่วง 0.001-0.087 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ส่วนน้ำประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่า  $\text{NO}_2\text{-N}$  อยู่ในช่วง 0.003-0.036 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และน้ำบาดาลมีค่า  $\text{NO}_2\text{-N}$  อยู่ในช่วง 0.002-0.007 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งค่ามาตรฐานสำหรับปริมาณ  $\text{NO}_2\text{-N}$  ในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลยังไม่ได้มีการกำหนดไว้

พิจารณาค่า DON (ดังตารางที่ 4-1) น้ำจากอ่างเก็บน้ำมีค่า DON ต่ำอยู่ในช่วง 0.02-0.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำดิบประปามีค่า DON อยู่ในช่วง 0.04-0.88 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ซึ่งน้ำดิบประปาสะเตาตั้งอยู่บริเวณต้นน้ำของกลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภามีค่า DON ค่อนข้างน้อยในช่วง 0.04-0.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร ในขณะที่น้ำดิบประปาพะตงซึ่งตั้งอยู่บริเวณกลางลำน้ำมีค่า DON สูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.70-0.88 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำจากระบบประปาก่อนและหลังเติมคลอรีนมีค่า DON อยู่ในช่วง 0.01-1.47 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร สำหรับน้ำบาดาลจากบ่อบาดาลทั้ง 3 บ่อ มีค่า DON น้อยมากๆ จึงไม่สามารถตรวจวัดค่าได้ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับน้ำตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่ามีความแปรปรวนของค่า DON บ้างเล็กน้อย โดยเฉพาะตัวอย่างของน้ำดิบประปาและน้ำจากระบบประปา ซึ่งอาจเกิดมาจากการปนเปื้อนจากกิจกรรมทางการเกษตร ชุมชน อุตสาหกรรม หรือการชะสารอินทรีย์ไนโตรเจนโดยน้ำที่ลงสู่คลองอู่ตะเภา

## 4.2 การวิเคราะห์ลักษณะสารอินทรีย์ด้วยเทคนิค Fluorescent excitation-emission matrix (FEEM)

Three-dimensional fluorescent spectroscopy (excitation-emission matrix, FEEM) เป็นวิธีการที่ค่อนข้างใหม่ในการวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ อย่างไรก็ตาม FEEM เป็นวิธีการวัดที่สะดวก รวดเร็ว ใช้ปริมาณน้ำตัวอย่างน้อยและสามารถใช้บ่งชี้ลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำได้ตลอดจนสามารถปรับปรุงและพัฒนาเพื่อใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการวัด FEEM นั้น โมเลกุลของสารอินทรีย์ละลายน้ำถูกกระตุ้นโดยพลังงานแสงฟลูออเรสเซนซ์จากหลอดซินอนทำให้โมเลกุลดังกล่าวเปลี่ยนจาก ground state ไปสู่ low energy state แล้วโมเลกุลของสารอินทรีย์ดังกล่าวจะปล่อยพลังงานส่วนเกินที่รับเข้าไปออกมาเพื่อเปลี่ยนจาก low energy state ไปสู่ ground state อีกครั้งหนึ่ง โดยพลังงานที่ปล่อยออกมาจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่ใช้กระตุ้นและความยาวคลื่นที่วัดได้ในขณะที่โมเลกุลปล่อยพลังงานออกมาจะสูงกว่าความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น ผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยเทคนิค FEEM ของน้ำดิบประปาจากคลองอุตะเถาแสดงตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์พีกดังตารางที่ ๔-1 และรูปของ FEEM แสดงดังภาพที่ 4-1



**ภาพที่ 4-1** ตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์พีก A, B, C, D และ E สำหรับตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่ศึกษาในครั้งนี้ (พีก A และ B คือ Tryptophan-like substances; Peak C, D และ E คือ Humic and fulvic acid-like substances)

ผลการวิเคราะห์ตำแหน่งพีก FEEM ของตัวอย่างน้ำที่ศึกษานี้พบว่า สารอินทรีย์ละลายน้ำของตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา มีองค์ประกอบสำคัญของสารฮิวมิกแอซิดและฟุลวิกแอซิด (humic and fulvic acid-like substances) ที่ตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์พีก C:  $230\text{nm}_{\text{Ex}}/420\text{nm}_{\text{Em}}$  พีก D:  $275\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  และพีก E:  $330\text{nm}_{\text{Ex}}/410\text{nm}_{\text{Em}}$  และยังประกอบด้วยสารอินทรีย์ประเภททริปโทเฟน (tryptophan-like substances) ที่ตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์พีก A:  $230\text{nm}_{\text{Ex}}/345\text{nm}_{\text{Em}}$  และพีก B:  $280\text{nm}_{\text{Ex}}/355\text{nm}_{\text{Em}}$



โดยทั่วไปสารฮิวมิกแอซิดและฟุลวิกแอซิดเป็นสารอินทรีย์ที่มาจากกร่อยสลายทางธรรมชาติของพืชในแหล่งน้ำธรรมชาติ แต่สารทริปโทเฟน โดยส่วนใหญ่สามารถตรวจพบได้ในแหล่งน้ำเสีย รวมทั้งแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนสิ่งสกปรกจากน้ำทิ้งชุมชน จากตารางผนวกที่ ฉ-1 ผลการตรวจวัดฟลูออเรสเซนซ์พบฟิคของสารฮิวมิกแอซิดและฟุลวิกแอซิดในน้ำที่มาจากบ่อน้ำบาดาล อ่างเก็บน้ำตามธรรมชาติ น้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา รวมถึงน้ำประปาที่ผ่านการบำบัดแล้วที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน อาจกล่าวได้ในเบื้องต้นว่ามีสารฮิวมิกในน้ำตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันโดยน้ำในอ่างเก็บน้ำและน้ำดิบประปามีค่าค่อนข้างสูง ส่วนน้ำบาดาลมีค่าต่ำ

สำหรับผลการวิเคราะห์ฟิคของสารอินทรีย์ประเภททริปโทเฟนพบว่า ความเข้มของฟลูออเรสเซนซ์แสดงเด่นชัดในตัวอย่างน้ำจากน้ำดิบประปาของระบบผลิตน้ำประปาพะตงและประปาหาดใหญ่ซึ่งตั้งอยู่บริเวณกลางลำน้ำและท้ายน้ำของคลองอู่ตะเภา ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้อาจพิจารณาได้ว่าสารทริปโทเฟนเป็นองค์ประกอบสำคัญตัวหนึ่งของสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ละลายน้ำ และจากน้ำเสียและน้ำที่ผ่านการบำบัด และอาจส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นของสาร NDMA มีค่าสูงขึ้น

#### 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การทำนายค่าดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์โดยใช้เทคนิค Three-dimensional fluorescent spectroscopy (EEM) เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์กับค่าดัชนีตัวแทนของสารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น DOC DON และโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA

**ตารางที่ 4-2** เปรอ์เซ็นต์การลดลงของ DOC UV-254 DON และความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ของน้ำตัวอย่างจากระบบผลิตน้ำประปา 3 แห่ง

พารามิเตอร์	เปอร์เซ็นต์การลดลง (%)					
	1 <sup>st</sup> sampling			2 <sup>nd</sup> sampling		
	WTP-1	WTP-2	WTP-3	WTP-1	WTP-2	WTP-3
DOC (mg C/L)	43	35	42	21	42	42
UV-254	65	80	63	50	29	67
UV-254 (cm <sup>-1</sup> )	65	80	63	50	29	67
DON (mg N/L)	65	ND	ND	ND	ND	ND
FEEM (QSU)						
Peak A+B	46	ND	37	30	ND	28
Peak C+D+E	60	42	64	34	46	59

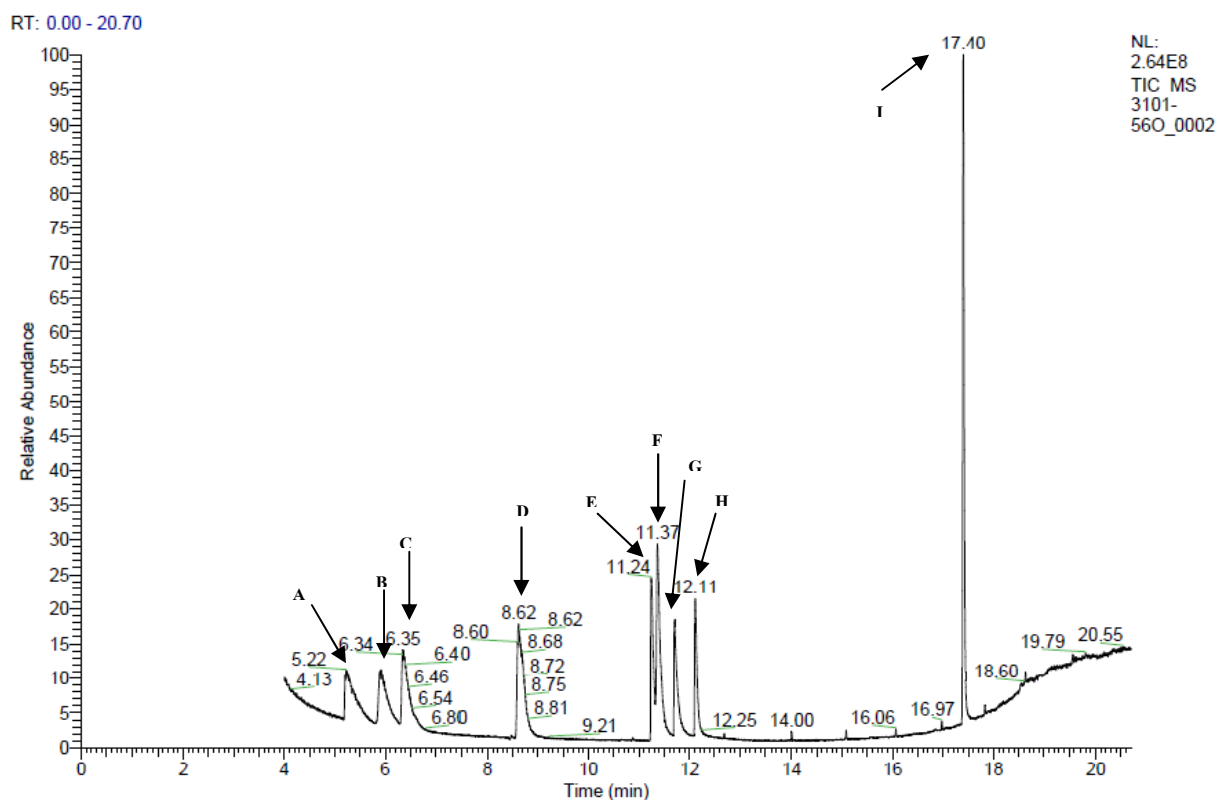
หมายเหตุ: ฟิค A และ B = Tryptophan-like substances; ฟิค C, D และ E = Humic and fulvic acid like substance; ND = not detected และ WTP-1 คือ ระบบผลิตน้ำประปาสะเดา; WTP-2 คือ ระบบผลิตน้ำประปาพะตง; WTP-3 คือ ระบบผลิตน้ำประปาหาดใหญ่

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการลดลงของ DOC DON และสารกลุ่ม Humic and fulvic acid-like substance และ Tryptophan-like substance ของน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปา 3 แห่งซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) ฟล็อกกูเลชัน (flocculation) การตกตะกอน (sedimentation) การกรอง (filtration) และการเติมคลอรีน (chlorination) กระบวนการดังกล่าวลดค่า DOC และ UV-254 ได้ 21-43 % และ 29-80 % อย่างไรก็ตาม ระบบผลิตน้ำประปาแบบทั่วไปยังไม่สามารถกำจัดค่า DON ในน้ำดิบประปาจากได้ ดังตารางที่ 4-2 สำหรับผลการศึกษานี้พบว่า ลักษณะ DON ของน้ำที่เก็บในครั้งแรกจากระบบผลิตน้ำประปาสะเดา (WTP-1) มีค่า DON ลดลงประมาณ 65 % แต่ตัวอย่างน้ำที่เก็บในครั้งที่สองจาก WTP-1 ค่า DON กลับไม่ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการสู่มเก็บตัวอย่างน้ำที่ต่างฤดูกาลกัน นอกจากนี้ยังศึกษาพบว่า การลดลงของผลรวมของค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่พีค C, D, และ E (humic and fulvic acids-like substances) มีแนวโน้มคล้ายกันกับการลดลงของค่า DOC ซึ่งอาจประเมินได้ว่าการลดลงของค่าความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่พีคของ humic and fulvic acids region สามารถนำไปใช้ทำนายค่าการลดลงของปริมาณ DOC ได้ในเบื้องต้น สำหรับการลดสารอินทรีย์กลุ่ม tryptophan-like substances ของระบบผลิตน้ำประปาสะเดา (WTP-1) และหาดใหญ่ (WTP-3) พบว่าระบบบำบัดน้ำทั้งสองแห่งนี้มีความสามารถในการลดสารอินทรีย์กลุ่มนี้ได้

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

##### 4.4.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของสารไนโตรซามีน 9 ชนิด

การยืนยันผลการวิเคราะห์สารไนโตรซามีน 9 ชนิด ด้วยเครื่อง Gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS) รุ่น Trace GC Ultra/ISQ MS, Thermo Scientific: GC-ISQMS ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ โดยคอลัมน์ที่ใช้คือ TR-WaxMS capillary column ชนิด Polyethylene Glycol ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร พิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารไนโตรซามีน มีดังนี้ อุณหภูมิของส่วนฉีดสาร (Injector) 250°C อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector) 250°C โปรแกรมอุณหภูมิของ oven เริ่มต้นที่ 40°C เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 7°C ต่อนาที จนถึง 110°C และเพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 15°C ต่อนาที จนถึง 240°C คงที่นาน 2 นาที โดยเครื่องสามารถแสดงโครมาโตแกรมของสารละลายผสมมาตรฐานของไนโตรซามีน ปรากฏพีคของไนโตรซามีน 9 ชนิด 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 5.23, 5.91, 6.35, 8.61, 11.25, 11.36, 11.71, 12.12 และ 17.40 นาที ตามลำดับ ดังโครมาโตแกรมและค่าแมสสเปกตรัม (mass spectrum) ของสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิด ที่แสดงดังภาพที่ 4-2 และตาราง 4-3 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-2 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานไนโตรซามีน 9 ชนิด  
ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-MS

ตารางที่ 4-3 ค่าแมสสเปกตรัม ( $m/z$ ) ของสารประกอบไนโตรซามีน 9 ชนิด

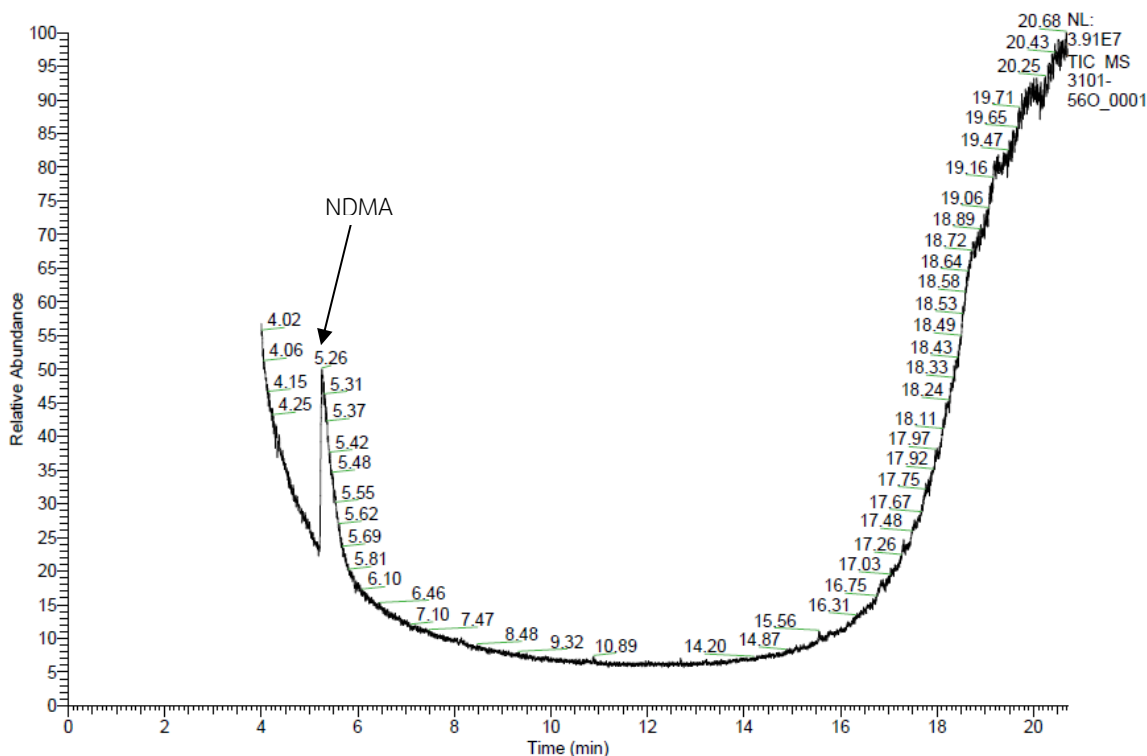
RT (นาที)		สารประกอบ	ชื่อย่อ	$m/z$
5.23	A	<i>N</i> -nitrosodimethylamine	NDMA	74
5.91	B	<i>N</i> -nitrosomethylethylamine	NMEA	88
6.35	C	<i>N</i> -nitrosodiethylamine	NDEA	102
8.61	D	<i>N</i> -nitrosodi- <i>n</i> -propylamine	NDPA	130
11.25	E	<i>N</i> -nitrosopiperidine	NPiP	114
11.36	F	<i>N</i> -nitrosodi-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

จากตารางที่ 4-3 การวิเคราะห์ยืนยันสารไนโตรซามีน 9 ชนิด ได้แก่ NDMA, NMEA, NDEA, NDPA, NPIP, NDBA, NPyr, NMor และ NDPhA โดยการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Wiley โดยน้ำหนักมวลต่อประจุที่ใช้ยืนยันคือ 74, 88, 102, 130, 114, 158, 100, 116 และ 169 ตามลำดับ จากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐานแบบผสมของสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิดที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่อง GC-MS พบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจัดว่ามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานอย่างมาก (ระดับนาโนกรัมต่อลิตร) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเปลี่ยนไปใช้เครื่อง GC-NPD แทนการใช้เครื่อง GC-MS เพื่อวิเคราะห์ชนิดของสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิดในเชิงคุณภาพ ในลำดับต่อไป สำหรับผลการตรวจวัดหาสารมาตรฐานไนโตรซามีนด้วยเครื่อง GC-NPD พบว่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดสารไนโตรซามีนได้ทั้ง 9 ชนิดดังกล่าว ได้เท่ากับ 300 นาโนกรัมต่อลิตร

งานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยส่วนใหญ่ตรวจพบว่าสาร NDMA เป็นชนิดที่โดดเด่นที่สุดที่ตรวจพบในแหล่งน้ำ โดยมีรายงานปริมาณความเข้มข้นค่อนข้างน้อยมากๆ อีกทั้งความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้มักจะต่ำกว่าค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของเครื่องมือวิเคราะห์ (Krasner *et al.*, 2006; Charrois *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดปริมาณสารไนโตรซามีนชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่สาร NDMA นั้นค่อนข้างตรวจวัดได้ยาก (Russell *et al.*, 2012) เนื่องจากสารดังกล่าวมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำเพียงแค่ระดับนาโนกรัมต่อลิตร (ng/L) รายงานก่อนหน้านี้พบว่าสาร NDMA สามารถก่อตัวได้ในกระบวนการบำบัดน้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสารคลอรีนและคลอรามิน (Mitch and Sedlak 2002; Choi and Valentine 2002) แม้ว่าการใช้สารฆ่าเชื้อในน้ำก่อให้เกิดสารพลอยได้อื่นๆ หลายชนิดที่ไม่ได้ตั้งใจให้เกิดขึ้น (Disinfection by-products, DBPs) แต่ยังไม่มียางานตรวจพบการก่อตัวของสารไนโตรซามีนชนิดอื่นๆ ว่าเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Charrois *et al.* 2004; Zhao *et al.* 2006) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งสนใจตรวจวัดเชิงปริมาณสาร NDMA เพียงชนิดเดียว แต่ในเชิงคุณภาพจะทำการตรวจหาสารไนโตรซามีนจำนวน 9 ชนิด ในตัวอย่างน้ำที่เก็บจากแหล่งน้ำต่างๆ สำหรับใช้เป็นน้ำดิบผลิตประปาจากคลองอู่ตะเภา รวมทั้งน้ำจากกระบวนการผลิตน้ำประปา และน้ำจากบ่อบาดาลในแหล่งชุมชน

#### 4.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร NDMA

การยืนยันผลการวิเคราะห์สาร NDMA ด้วยเครื่อง Gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS) รุ่น Trace GC Ultra ISQ MS, THERMO SCIENTIFIC: GC-ISQMS ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ คอลัมน์ที่ใช้คือ TR-WaxMS capillary column ชนิด Polyethylene Glycol ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร พิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร สภาวะที่เหมาะสมสำหรับสาร NDMA แสดงดังนี้ อุณหภูมิของส่วนฉีดสาร (Injector) 250°C อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ (detector) 250°C โปรแกรมอุณหภูมิของ oven เริ่มต้นที่ 40°C เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 7°C ต่อนาที จนถึง 110°C และเพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 15°C ต่อนาที จนถึง 240°C คงที่นาน 2 นาที โดยเครื่องสามารถแสดงโครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานของ NDMA ปรากฏพีคของ NDMA ที่ retention time (RT) เท่ากับ 5.27 นาที และแสดงโครมาโตแกรมและค่าแมสสเปกตรัม (mass spectrum) ของสาร NDMA ในภาพที่ 4-3

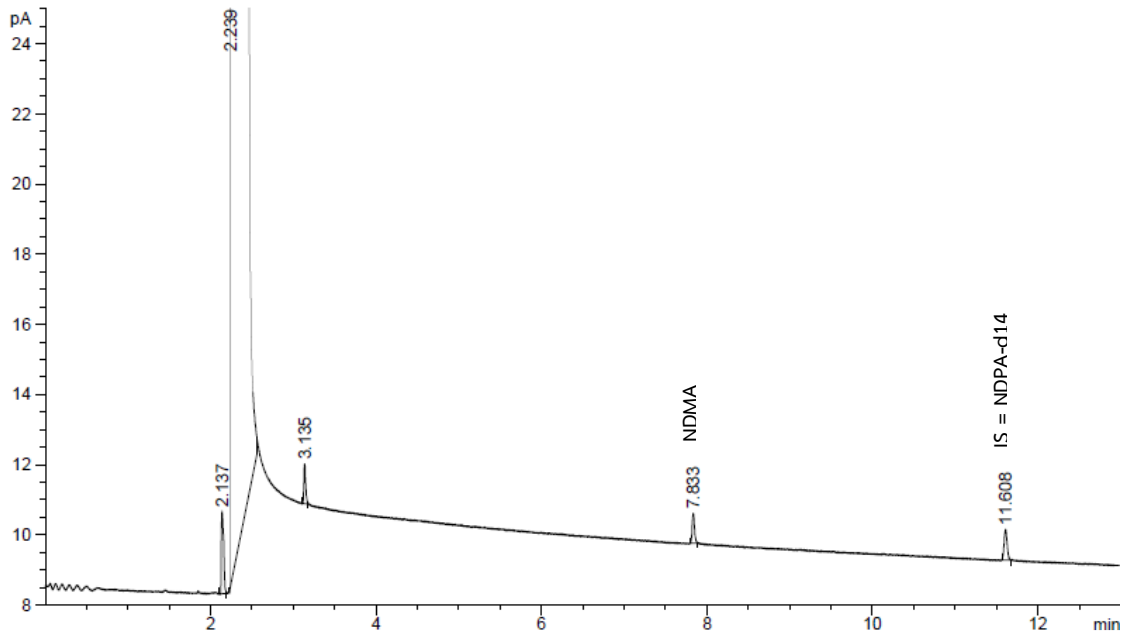


ภาพที่ 4-3 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-MS

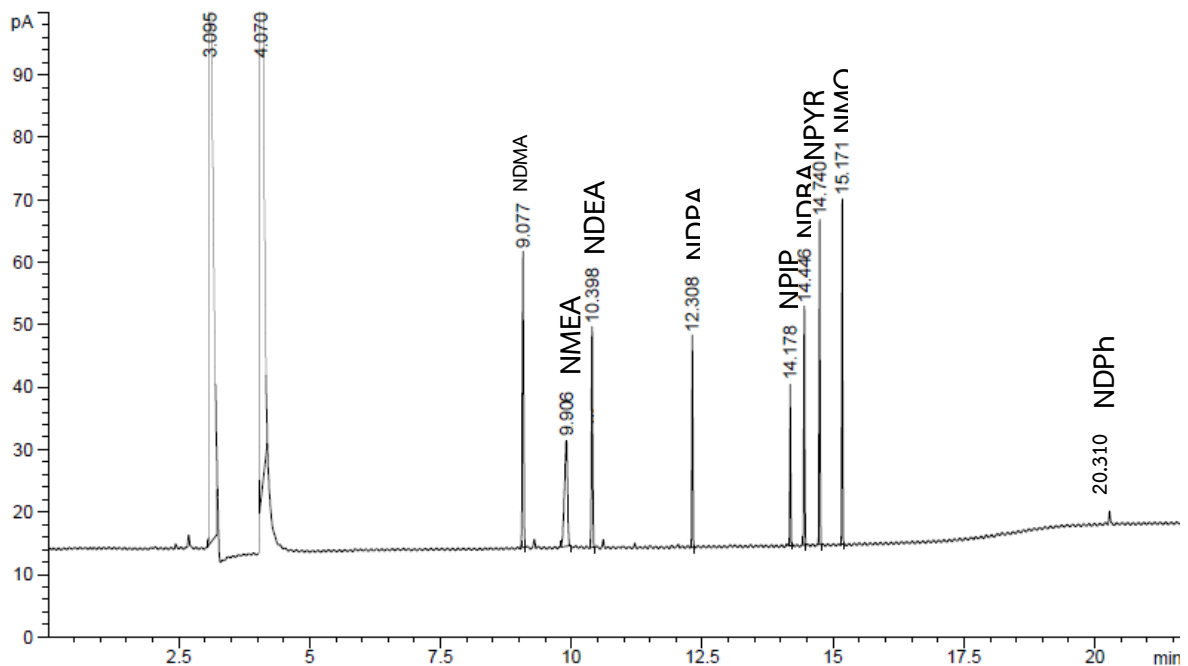
จากการวิเคราะห์ยืนยันสาร NDMA โดยการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ Wiley โดยน้ำหนักมวลต่อประจุที่ใช้ยืนยันคือ 74 จากผลทดสอบการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน NDMA ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเครื่อง GC-MS ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากขีดจำกัดของเครื่องมือ ดังนั้นเพื่อให้ได้ขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำถึงระดับนาโนกรัมต่อลิตร งานวิจัยนี้จึงเปลี่ยนไปใช้เครื่อง GC-NPD สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร NDMA ในลำดับต่อไป

#### 4.5 การวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP และชนิดของสารไนโตรซามีน

โครมาโตแกรมจากการตรวจวัดสารละลายมาตรฐาน NDMA และสารละลายผสม 9 ชนิดของไนโตรซามีนด้วยเครื่อง GC-NPD ปรากฏพีคของสาร NDMA ที่ retention time (RT)  $7.83 \pm 0.002$  นาที และปรากฏพีคของ Internal standard (สาร NDPA-d14) ที่ RT  $11.60 \pm 0.001$  นาที ดังแสดงในภาพที่ 4-4 และปรากฏโครมาโตแกรมของสารผสมไนโตรซามีน 9 ชนิด 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 RT เท่ากับ  $9.07 \pm 0.05$ ,  $9.90 \pm 0.05$ ,  $10.39 \pm 0.05$ ,  $12.30 \pm 0.05$ ,  $14.17 \pm 0.05$ ,  $14.44 \pm 0.05$ ,  $14.74 \pm 0.05$ ,  $15.17 \pm 0.05$ ,  $20.31 \pm 0.05$  นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-5 ซึ่งปรากฏพีคที่ได้แยกกันชัดเจน



ภาพที่ 4-4 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) ที่ระดับความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-NPD

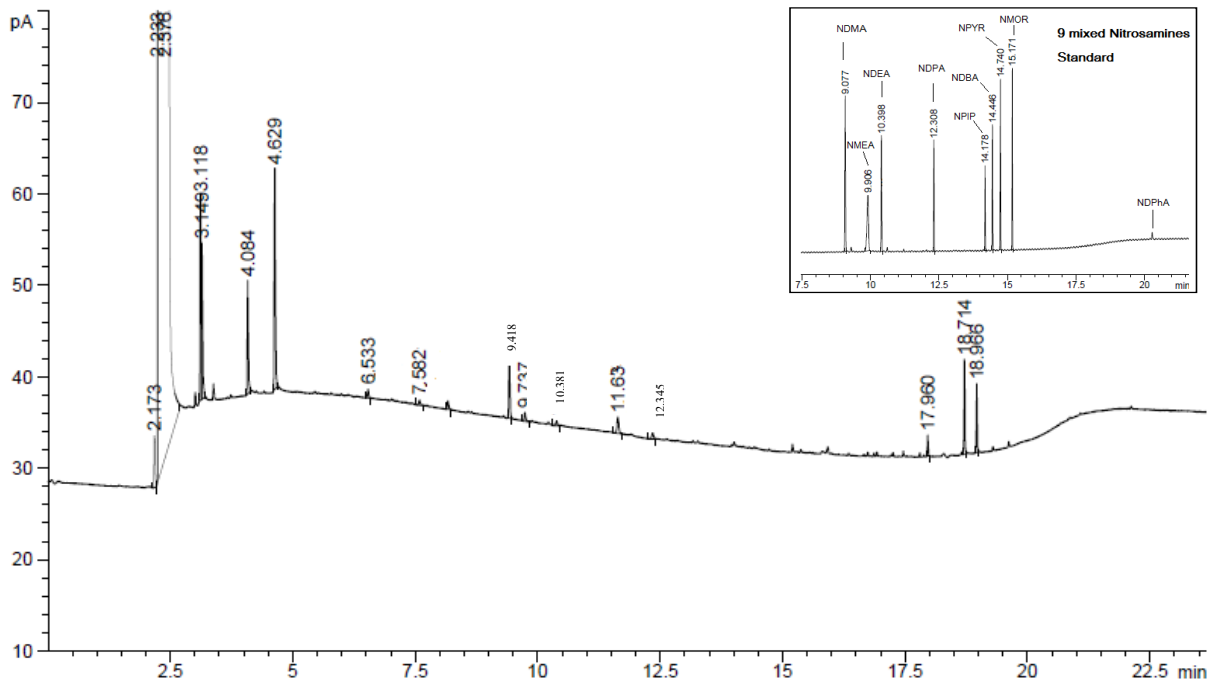


ภาพที่ 4-5 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน *N*-Nitrosamines 9 ชนิด: Peaks: 1=*N*-nitrosodimethylamine (NDMA), 2= *N*-nitrosomethylethylamine (NMEA), 3=*N*-nitrosodiethylamine (NDEA), 4= *N*-nitrosodi-*n*-propylamine (NDPA), 5= *N*-nitrosopiperidine (NPip), 6=*N*-nitrosodi-*n*-butylamine (NDBA), 7=*N*-nitroso-pyrrolidine (NPy), 8=*N*-nitrosomorpholine (NMor), 9=*N*-nitrosodiphenylamine (NDPhA) ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-NPD

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสาร NDMA ที่สกัดได้จากน้ำ 28 ตัวอย่างที่เก็บจากน้ำดิบในคลองอุตตะเภากลางเก็บน้ำ ท่อจ่ายน้ำประปา และบ่อบาดาล พบว่าตรวจไม่เจอปริมาณสาร NDMA และ NDMAFP ในตัวอย่างทั้งหมดที่ระดับขีดจำกัดต่ำสุด 17.40 นาโนกรัมต่อลิตร งานวิจัยที่ผ่านมามีรายงานตรวจพบปริมาณ NDMA ในแหล่งน้ำต่างๆ เช่น ตัวอย่างน้ำดิบจากระบบผลิตน้ำประปาในประเทศญี่ปุ่นที่เก็บในช่วงฤดูร้อนมีค่า NDMA สูงที่สุด 2.6 นาโนกรัมต่อลิตร และฤดูหนาว ตรวจพบสาร NDMA สูงสุดที่ 4.3 นาโนกรัมต่อลิตร (Asami *et al.*, 2009) โดยส่วนใหญ่ในน้ำดื่มตรวจพบค่า NDMA น้อยกว่า 10 นาโนกรัมต่อลิตร (Tomkins *et al.*, 1995) จากการศึกษาในน้ำในระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้โอโซนก่อนและหลังกระบวนการบำบัด ตรวจพบสาร NDMA ที่ความเข้มข้นสูงอยู่ในช่วง 16-290 นาโนกรัมต่อลิตร และ 14-280 นาโนกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (Kosaka *et al.* 2009) สำหรับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมีการตรวจพบสาร NDMA สูงอยู่ในช่วง 5-20 นาโนกรัมต่อลิตร (Krauss *et al.*, 2009) สำหรับผลการตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารมาตรฐาน Nitrosamines 9 ชนิด ในตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่ศึกษานี้ ไม่พบสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิดดังกล่าวเลย ที่ขีดจำกัดในการตรวจวัดที่ 300 นาโนกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ 4-6 เป็นตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารสกัด NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ พบว่าไม่ปรากฏตำแหน่งพิกตรงกับสารไนโตรซามีนทั้ง 9 ชนิด

US.EPA. กำหนดค่ามาตรฐานของสาร NDMA ที่ยอมให้มีในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 7 นาโนกรัมต่อลิตร ผลการตรวจวัดปริมาณ NDMA ในตัวอย่างน้ำประปาจากระบบผลิตประปาทั้ง 3 แห่ง และตัวอย่างน้ำบาดาลจากบ่อบาดาลในแหล่งชุมชน มีปริมาณของ NDMA ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ US.EPA. เมื่อพิจารณาค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO, 2008) กำหนดค่า guideline value ของสาร NDMA ในน้ำดื่ม ต้องไม่เกิน 100 นาโนกรัมต่อลิตร สำหรับในบางประเทศกำหนดค่าต่ำสุดอยู่ที่ 3-10 นาโนกรัมต่อลิตร (CDPH, 2008; MEO, 2009) จากผลการศึกษานี้ก็กล่าวได้ว่าค่า NDMAFP ของน้ำตัวอย่างมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของ WHO แต่จากค่าขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดสาร NDMA ไม่สามารถหาได้ว่าปริมาณสาร NDMA ในตัวอย่างน้ำต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ US.EPA. หรือไม่ การดำเนินการในอนาคตจำเป็นต้องศึกษาวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดที่มีระดับขีดจำกัดของการตรวจวัดต่ำสุดที่ระดับนาโนกรัมต่อลิตร

อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการควบคุมคุณภาพการผลิตน้ำประปาในประเทศไทยอ้างอิงมาจากมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกเป็นหลัก เมื่อพิจารณาที่ประเด็นสารก่อมะเร็งในน้ำประปาของกลุ่มสารไนโตรซามีน ซึ่งถ้าเทียบมาตรฐานขององค์การอนามัยโลกแล้ว ตัวอย่างน้ำดิบจากคลองอุตตะเภากลางและน้ำประปาที่เราใช้กันก็เรียกว่าผ่านมาตรฐาน และยังไม่อยู่ในขั้นที่ได้รับผลกระทบจากสารปนเปื้อนของสาร NDMA



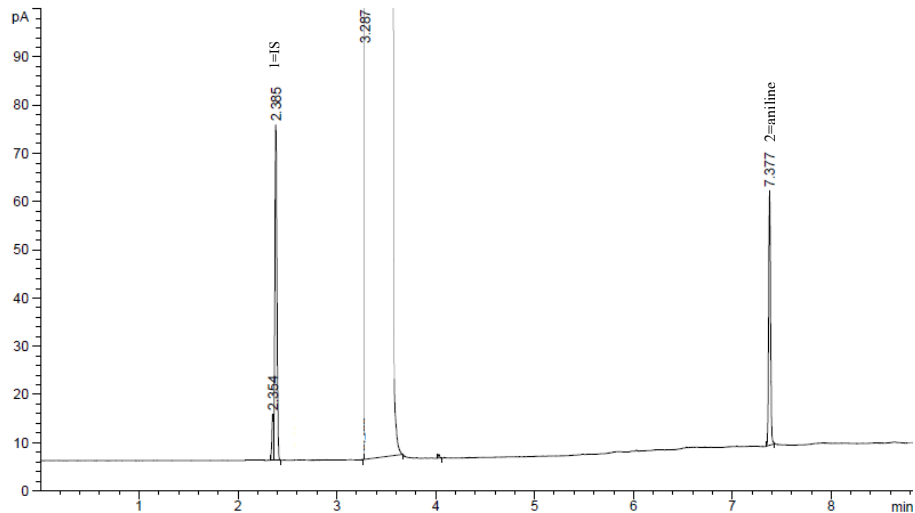
ภาพที่ 4-6 โครมาโตแกรมของสารสกัด NDMAFP ของตัวอย่างน้ำดิบประปาขนาดใหญ่จากการเก็บตัวอย่างครั้งที่ 1

#### 4.6 การวิเคราะห์ปริมาณสารตั้งต้นหลักที่มีโอกาสในการก่อตัวของสาร NDMA (NDMA precursors)

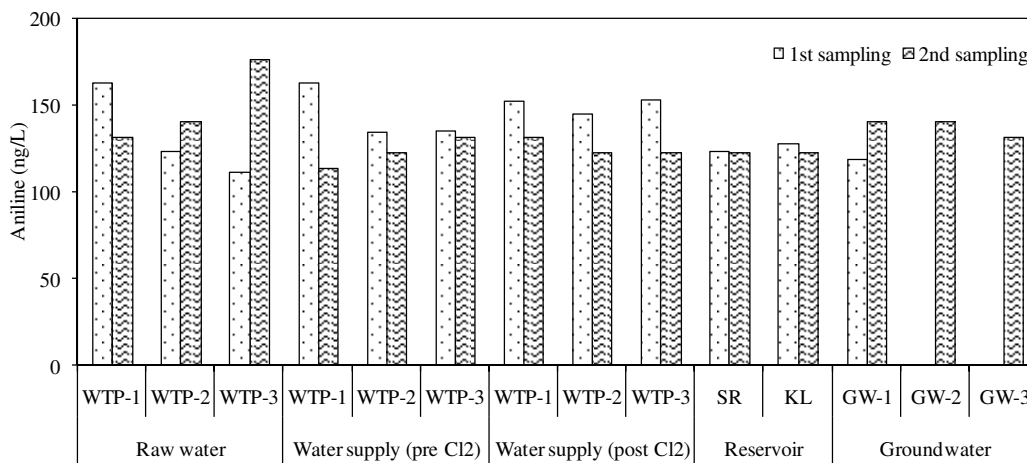
##### 4.6.1 สารอินทรีย์ตั้งต้นกลุ่มอะโรมาติก

โครมาโตแกรมของสารอะนิลีน (aniline) ปรากฏพีคของสารที่ retention time (RT) เท่ากับ  $7.37 \pm 0.006$  นาที และ Internal standard (สาร triphenylphosphate, TPP) ที่  $RT 2.38 \pm 0.008$  นาที (แสดงดังภาพที่ 4-7) ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสาร aniline ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนกลุ่มอะโรมาติกในน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ ได้แก่ น้ำจากอ่างเก็บน้ำ น้ำดิบประปา น้ำประปាក่อนและหลังเติมคลอรีน และน้ำบาดาล โดยการเก็บตัวอย่างสองครั้ง แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสาร aniline ดังภาพที่ 4-8 และตารางที่ ข-2 น้ำจากอ่างเก็บน้ำสะเดาและคลองหลามีค่า aniline อยู่ในช่วง 123-129 นาโนกรัมต่อลิตร น้ำดิบประปาจากสะเดา พะตง และหาดใหญ่ มีค่า aniline อยู่ในช่วง 111-177 นาโนกรัมต่อลิตร โดยสามารถตรวจพบปริมาณอะนิลีนสูงสุดที่ 176.8 นาโนกรัมต่อลิตรในตัวอย่างน้ำดิบประปาขนาดใหญ่ที่เก็บในครั้งที่สอง สำหรับน้ำจากระบบประปាក่อนและหลังเติมคลอรีน มีค่า aniline อยู่ในช่วง 114-164 นาโนกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ค่า DON ในน้ำบาดาลนั้นพบว่าไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ไนโตรเจนละลายน้ำรวม แต่เมื่อวิเคราะห์สารเป็นรายตัวตรวจพบสาร aniline ในระดับนาโนกรัมต่อลิตร จึงกล่าวได้ว่าน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระดับต่ำ สารอะนิลีนเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงต่อมนุษย์ (Emtiaz *et al.*, 2001) โดยส่วนใหญ่ aniline เป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ โรงงานยาง ยา สี ย้อม สารกำจัดศัตรูพืช และอุตสาหกรรมอื่นๆ (O'Neill *et al.*, 2000) มีรายงานการตรวจวัดปริมาณสาร aniline ในน้ำดิบมีปริมาณอยู่ในช่วง 2.2-12 ไมโครกรัมต่อลิตร และน้ำประปามีค่า aniline อยู่ในช่วง 1.2-27 ไมโครกรัมต่อลิตร (Jurado-Sanchez *et al.*, 2012)





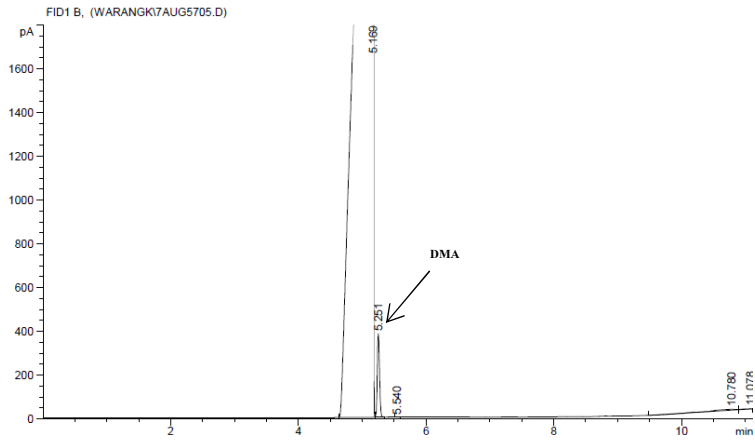
ภาพที่ 4-7 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานสารอะนิลีน: Peak1: Internal standard (IS) triphenylphosphate (TPP) และ Peak 2: สาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID



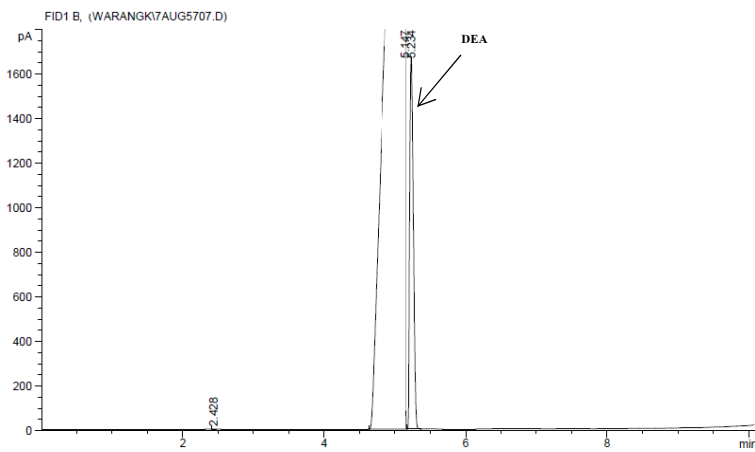
ภาพที่ 4-8 ปริมาณสาร aniline ที่ตรวจพบในแหล่งน้ำต่างๆ จากบริเวณลุ่มน้ำคลองอู่ตะเภา (WTP1 = ประปาสะเดา WTP2 = ประปาพะตง WTP3 = ประปาหาดใหญ่ SR = อ่างเก็บน้ำสะเดา KL = อ่างเก็บน้ำคลองหลา และ GW = น้ำบาดาล)

#### 4.6.2 สารอินทรีย์ตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก

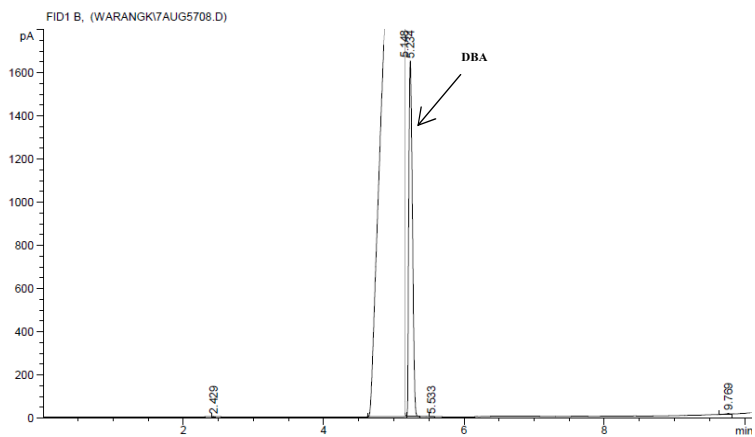
โครมาโตแกรมจากการตรวจวัดสารอินทรีย์ในไตรเจนตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก 3 ชนิด ได้แก่ DMA DEA และ DBA โดยเครื่อง Gas chromatography-Flame Ionization Detector (GC-FID) แสดงดังภาพที่ 4-9 ปรากฏพีคของสาร DMA ที่ retention time (RT)  $5.25 \pm 0.003$  นาที สำหรับสาร DEA ปรากฏพีคที่ retention time (RT)  $5.23 \pm 0.002$  นาที แสดงดังภาพที่ 4-10 และสาร DBA ปรากฏพีคที่ retention time (RT)  $5.23 \pm 0.002$  นาที แสดงดังภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-9 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DMA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID

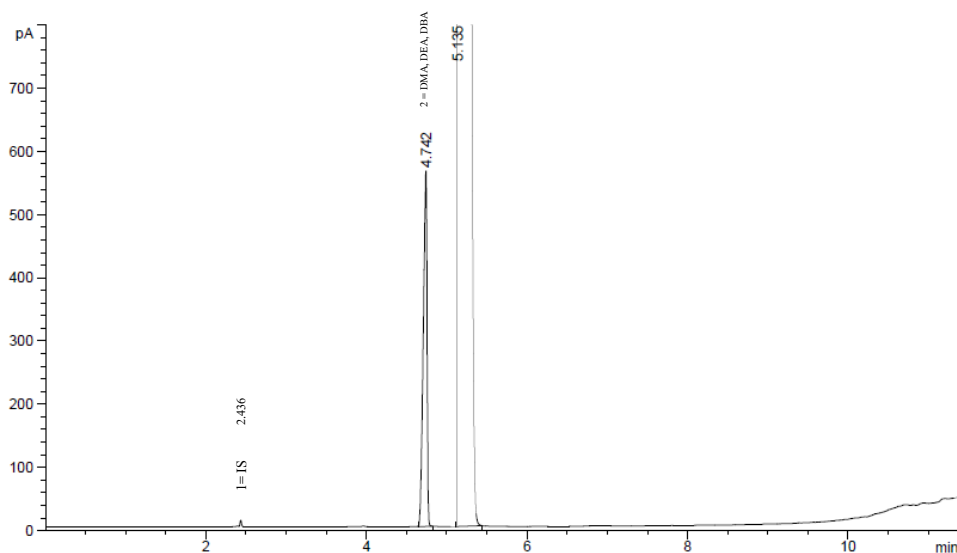


ภาพที่ 4-10 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DEA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID



ภาพที่ 4-11 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐาน DBA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID

จากการตรวจวัดสารมาตรฐานกลุ่มอะลิฟาติก ดังแสดงโครมาโตแกรมในภาพที่ 4-9, 4-10 และ 4-11 พบว่าพีคสารทั้ง 3 ตัว ได้แก่ DMA DEA และ DBA ปรากฏตำแหน่ง RT ที่ 5.25, 5.23 และ 5.23 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่อนำสารมาตรฐานทั้ง 3 ชนิดนี้มาผสมกันและนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง GC-FID เพื่อให้สารทั้ง 3 ชนิดนี้แยกพีคออกจากกันอย่างชัดเจน โดยการทดลองปรับสภาวะของเครื่อง GC ใหม่ แสดงโครมาโตแกรมดังภาพที่ 4-12 ปรากฏพีคของสารผสมมาตรฐาน 3 ชนิด ที่ RT เดียวกันคือ  $4.74 \pm 0.002$  นาที และปรากฏพีคของ Internal standard (สาร triphenylphosphate) ที่ RT  $2.43 \pm 0.005$  นาที จากการทดลองปรับสภาวะของเครื่อง GC-FID ด้วยวิธีการหลายรูปแบบแล้วนั้นก็ยังไม่สามารถทำให้พีคของสารอะลิฟาติกทั้ง 3 ตัวแยกออกจากกันได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของสารประกอบมีส่วนที่คล้ายคลึงกันมาก รวมถึงข้อจำกัดของคอลัมน์ที่ใช้งานและขีดจำกัดในการตรวจวัดสารของเครื่อง GC ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตจึงจำเป็นต้องทดลองหาสภาวะใหม่ให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ทั้งชนิดและปริมาณของสารอะลิฟาติกแต่ละตัว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้แสดงค่าการปนเปื้อนของสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีนเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน DMA DEA และ DBA



ภาพที่ 4-12 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานกลุ่มอะลิฟาติก 3 ชนิด: Peak 1: Internal standard (IS) = triphenylphosphate (TPP) และ Peak 2: สารผสม DMA DEA และ DBA ที่ระดับความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเครื่อง GC-FID

ตารางที่ 4-4 ปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (DMA+DEA+DBA) ที่ตรวจพบจากการสกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา

ตัวอย่าง	ครั้งที่	สารตั้งต้น <sup>a</sup>	สารตั้งต้น <sup>b</sup>	สารตั้งต้น <sup>c</sup>
		DMA+DEA+DBA (µg DMA/L)	DEA+DMA+DBA (µg DEA/L)	DBA+DMA+DEA (µg DBA/L)
อ่างเก็บน้ำสะเดา	1	16.2	2.6	3.3
	2	4.2	1.2	1.4
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	1	16.2	1.8	2.3
	2	5.6	1.6	1.9
น้ำดิบสะเดา	1	14.9	1.9	2.3
	2	5.6	1.8	2.2
น้ำดิบพะตง-พังลา	1	8.2	2.6	3.2
	2	5.6	1.7	2.1
น้ำดิบหาดใหญ่	1	22.9	2.1	2.6
	2	6.9	1.5	1.8
น้ำประปาสะเดา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	17.6	2.4	2.9
	2	4.2	1.5	1.8
น้ำประปาพะตง-พังลา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	4.2	2.6	3.3
	2	5.6	1.6	2.0
น้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	4.2	1.5	1.8
	2	5.6	2.1	2.6
น้ำประปาสะเดา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	5.6	1.2	1.4
	2	4.2	2.9	3.7
น้ำประปาพะตง-พังลา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	9.5	1.5	1.8
	2	4.2	1.5	1.8
น้ำประปาหาดใหญ่ (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	20.2	1.6	1.7
	2	5.6	1.6	2.5
น้ำบาดาล 1 ไกล่หลุม ฝิ่งกลบขยะ	1	16.2	1.4	1.7
	2	10.9	2.0	2.5
น้ำบาดาล 2 ในบริเวณหลุม ฝิ่งกลบขยะ	1	5.6	ND	ND
	2	17.6	2.0	2.5
น้ำบาดาล 3 ในชุมชนคอ หงส์	1	16.2	ND	ND
	2	5.6	1.7	2.1

ND = not detected; สารตั้งต้น<sup>a</sup> หมายถึงผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DMA; สารตั้งต้น<sup>b</sup> หมายถึงผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DEA; สารตั้งต้น<sup>c</sup> หมายถึงผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DBA

ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (DMA+DEA+DBA) ในตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 4-4 โดยสารตั้งต้น<sup>a</sup> คือผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DMA สารตั้งต้น<sup>b</sup> คือผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DEA และสารตั้งต้น<sup>c</sup> คือผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA เมื่อคำนวณปริมาณสารเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DBA น้ำจากอ่างเก็บน้ำ 2 แห่งมีสารตั้งต้น<sup>a</sup> ในช่วง 4.2-16.2 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร น้ำดิบประปามีสารตั้งต้น<sup>a</sup> อยู่ในช่วง 5.6-22.9 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร น้ำจากระบบประปา ก่อนและหลังเติมคลอรีนมีสารตั้งต้น<sup>a</sup> อยู่ในช่วง 4.2-20.2 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร และน้ำบาดาลมีสารตั้งต้น<sup>a</sup> อยู่ในช่วง 5.6-17.6 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร เมื่อพิจารณาสารตั้งต้น<sup>b</sup> น้ำจากอ่างเก็บน้ำ 2 แห่งมีสารตั้งต้น<sup>b</sup> อยู่ในช่วง 1.2-2.7 ไมโครกรัม DEA ต่อลิตร น้ำดิบประปามีสารตั้งต้น<sup>b</sup> อยู่ในช่วง 1.5-2.6 ไมโครกรัม DEA ต่อลิตร น้ำจากระบบประปา ก่อนและหลังเติมคลอรีนมีสารตั้งต้น<sup>b</sup> อยู่ในช่วง 1.2-2.9 ไมโครกรัม DEA ต่อลิตร และน้ำบาดาลมีสารตั้งต้น<sup>b</sup> อยู่ในช่วง ND-2.1 ไมโครกรัม DEA ต่อลิตร สำหรับสารตั้งต้น<sup>c</sup> น้ำจากอ่างเก็บน้ำตรวจพบสารตั้งต้น<sup>c</sup> อยู่ในช่วง 1.5-2.3 ไมโครกรัม DBA ต่อลิตร น้ำดิบประปามีสารตั้งต้น<sup>c</sup> อยู่ในช่วง 1.8-3.3 ไมโครกรัม DBA ต่อลิตร น้ำจากระบบประปา ก่อนและหลังเติมคลอรีนมีสารตั้งต้น<sup>c</sup> อยู่ในช่วง 1.4-3.7 ไมโครกรัม DBA ต่อลิตร และน้ำบาดาลมีสารตั้งต้น<sup>c</sup> ปริมาณน้อยอยู่ในช่วง ND-2.6 ไมโครกรัม DBA ต่อลิตร จากการทดลองสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกเอมีนมีระดับการปนเปื้อนที่ระดับไมโครกรัม ส่วนสารอินทรีย์อะโรมาติกไนโตรเจนมีระดับการปนเปื้อนที่ระดับนาโนกรัมต่อลิตร จากข้างต้นกล่าวได้ว่าสารอินทรีย์กลุ่มอะลิฟาติกเอมีนเป็นสารกลุ่มหลักที่พบในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา

ผลการศึกษาปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (DMA+DEA+DBA) ในแหล่งน้ำประเภทต่างๆ จากคลองอู่ตะเภา พบว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>a</sup> 4.2-22.9 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือสารตั้งต้น<sup>b</sup> มีอยู่ในช่วง ND-2.9 ไมโครกรัม DEA ต่อลิตร และสารตั้งต้น<sup>c</sup> ในช่วง ND-3.7 ไมโครกรัม DBA ต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกทั้ง 3 ชนิดในตัวอย่างน้ำจากทั้ง 2 ฤดูกาลที่ตรวจพบในแหล่งน้ำจากคลองอู่ตะเภาและระบบผลิตน้ำประปา ยังไม่ส่งผลกระทบต่อภารกิจของสารไนโตรซามีน ทั้ง 9 ชนิดที่ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดสารได้ที่ความเข้มข้น 300 นาโนกรัมต่อลิตร และตรวจวัดสาร NDMA ที่ขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดสารได้ที่ความเข้มข้น 17.4 นาโนกรัมต่อลิตร

งานวิจัยที่ผ่านมารายงานว่า DMA เป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนที่พบได้บ่อยที่สุดในน้ำผิวดินและมีศักยภาพในการก่อตัวของ NDMA มากที่สุด (Sacher *et al.*, 1997) ปริมาณ DMA ที่ตรวจพบในน้ำดิบมีค่าอยู่ในช่วง ND-3.9 ไมโครกรัมต่อลิตร น้ำดื่มมีค่า DMA อยู่ในช่วง ND-2.4 ไมโครกรัมต่อลิตร (Wang *et al.*, 2011) สำหรับการอะลิฟาติกเอมีนอื่นๆ ที่เป็นสารตั้งต้นสำคัญในการก่อตัวของสารไนโตรซามีน ได้แก่ diphenylamine (DPHA), diethylamine (DEA), methylethylamine (MEA), di-n-propylamine (DPA), di-n-butylamine (DBA), morpholine (Mor), pyrrolidine (Pyr) และ piperidine (Pip) โดยส่วนใหญ่สารอินทรีย์เหล่านี้จะนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและยา (Kim *et al.*, 2009)

## บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการศึกษา

1) น้ำดิบประปามีปริมาณ DOC สูงสุด รองลงมาคือน้ำประปา น้ำจากอ่างเก็บน้ำ และน้ำจากบ่อบาดาล ตามลำดับ สำหรับค่า DON ไม่สามารถตรวจวัดได้จากตัวอย่างน้ำบาดาล แต่ตรวจพบได้จากน้ำจากอ่างเก็บน้ำซึ่งมีค่า DON อยู่ในช่วง 0.02-0.08 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร น้ำดิบประปามีค่า DON อยู่ในช่วง 0.04-0.88 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร และน้ำประปามีค่า DON อยู่ในช่วง 0.01-1.37 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อลิตร

2) ตัวอย่างน้ำทั้ง 28 ตัวอย่างที่เก็บจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา ไม่สามารถตรวจพบปริมาณสาร NDMA และค่าโอกาสการก่อตัวของสาร NDMA (NDMAFP) ด้วยเครื่อง GC-NPD ที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจวัดได้คือ 17.4 นาโนกรัมต่อลิตร

3) การตรวจวัดเชิงคุณภาพของสารกลุ่มไนโตรซามีน 9 ชนิด ไม่พบสาร NDMA ในตัวอย่างน้ำที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดในการตรวจวัดของเครื่อง GC-NPD ที่ระดับ 17.4 นาโนกรัมต่อลิตร และสำหรับสารไนโตรซามีนอีก 8 ชนิด ได้แก่ NDEA, NMEA, NDPA, NMor, NPyr, NPip, NDBA และ NDPhA ตรวจไม่พบสารทุกตัวเช่นกัน ที่ระดับความเข้มข้นต่ำสุดของ 300 นาโนกรัมต่อลิตร

4) สารอินทรีย์ไนโตรเจนที่ตรวจพบในกระบวนการบำบัดน้ำประปาและแหล่งน้ำดิบจากบริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา ได้แก่ อะนิลีน (aniline) ที่ระดับความเข้มข้น 111-177 นาโนกรัมต่อลิตร และสารกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน (ผลรวมของ DMA, DEA และ DBA) ที่ระดับความเข้มข้น 4.2-22.9 ไมโครกรัม DMA ต่อลิตร

5) Fluorescent excitation-emission matrix (FEEM) ของตัวอย่างน้ำจากอ่างเก็บน้ำตรวจพบตำแหน่งฟลูออเรสเซนซ์ของสาร humic fulvic acid-like substances ส่วน FEEM ของน้ำดิบจากคลองอุตะเถาตรวจพบสารกลุ่มของ tryptophan-like substances และสารกลุ่มของ humic fulvic acid-like substances

6) เทคนิคการตรวจวัดด้วย GC สามารถบอกปริมาณสารที่ความเข้มข้นระดับต่ำได้ (นาโนกรัมต่อลิตร) เช่น ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนชนิด DMA, DEA, DBA และ aniline แต่การใช้งานเครื่อง GC มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองในการวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FEEM เป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์สารกลุ่ม humic and fulvic acid-like substances และสารอินทรีย์ประเภท tryptophan-like substances ได้ แต่ระดับความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดควรมีปริมาณสูง (ระดับมิลลิกรัมต่อลิตร) แม้กระนั้นก็ตาม การตรวจวัดพารามิเตอร์รวม (bulk measurements) เช่น ค่า DOC และ DON นั้นไม่สามารถนำมาคาดการณ์การก่อตัวของสารกลุ่มไนโตรซามีนได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองนี้ควรดำเนินการวิจัยเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาเทคนิคการสกัดสารตั้งต้นชนิด DEA และ DBA เพื่อให้ได้ % recovery สูงขึ้น
- 2) ศึกษาทดลองการแยกพีคของสารกลุ่มอะลิฟาติก 3 ชนิด (DEA, DBA และ DBA) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากน้ำตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำคลองอุตะเถา โดยการปรับสภาวะของเครื่อง GC ให้เหมาะสมสำหรับการระบุเชิงคุณภาพและปริมาณที่แน่นอนของสารแต่ละชนิดได้
- 3) ศึกษาลักษณะและการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น DMA, DEA, DBA และ aniline ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ไนโตรเจนหลักที่ก่อให้เกิดสาร NDMA ในน้ำประปา
- 4) ศึกษาปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนในระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่อาจทำให้เกิดการก่อตัวของสารก่อมะเร็งชนิด NDMA ในแหล่งน้ำต่างๆ ได้

## เอกสารอ้างอิง

- กมลนาวิน อินทนูจิตร, พะยอม รัตนมณี, ชัยศรี สุขสาโรจน์, สุรพงษ์ วัฒนะจีระ, จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์. 2551. การลดสารกลุ่มไนโตรซีน เทปโตฟานและฮิวมิกและฟลูวิคเอซิดในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภาโดยโคแอกกูเลชันที่ใช้สารส้ม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 8-9 พฤษภาคม 2551.
- กรมควบคุมมลพิษ 2557. แหล่งที่มา [http://www.pcd.go.th/contact/FAQs\\_water.html](http://www.pcd.go.th/contact/FAQs_water.html).
- กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. 2557. คู่มือการเจาะบ่อบาดาล. แหล่งที่มา [http://www.dgr.go.th/water/waterforlife2\\_1.htm](http://www.dgr.go.th/water/waterforlife2_1.htm), 2 ธันวาคม 2557.
- จรงค์พันธ์ มุสิกวงค์. 2555. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการการจำแนกลักษณะและบำบัดสารอินทรีย์กลุ่มซอบน้ำและไม่ซอบน้ำในน้ำดิบประปาจากคลองอู่ตะเภา จังหวัดสงขลา. 15 มิถุนายน 2555. 172 หน้า.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332, 2521 ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่องกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521.
- แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- อุตร จารุรัตน์ และจารุรัตน์ วรนิสรากุล. 2537. วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 224 หน้า.
- Akyuz, M., and Ata, S. 2006. Simultaneous determination of aliphatic and aromatic amines in water and sediment samples by ion-pair extraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*. 1129, 88-94.
- Andrzejewski, P., Kasprzyk-Hordern, B., and Nawrocki, J. 2005. The hazard of N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during water disinfection with strong oxidants, *Desalination*. 176, 37-45.
- Andrzejewski, P., Kasprzyk-Hordern, B., and Nawrocki, J. 2008. N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during ozonation of dimethylamine-containing waters. *Water Research*. 42, 863-870.
- 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.
- Aydin, E., Yaman, F.B., Genceli, E.A., Topuz, E., Erdim, E., Gurel, M., Ipek, M., and Pehlivanoglu-Mantas, E. 2012. Occurrence of THM and NDMA precursors in a watershed: Effect of seasons and anthropogenic pollution. *Journal of Hazardous Materials*. 221-222, 86-91.
- California Department of Health Services. 2010. NDMA in California Drinking Water. <http://www.dhs.ca.gov/ps/ddwem/chemicals/NDMA/history.htm>. (accessed November 23, 2012).
- California Department of Public Health (CDPH), NDMA and other nitrosamines-drinking water issues, 2008 as of January,



- <http://www.cdph.ca.gov/CERTLIC/DRINKINGWATER/Pages/NDMA.aspx> (2009).
- Chang, H., Chen, C., and Wang, G. 2011. Identification of potential nitrogenous organic precursors for C-, N-DBPs and characterization of their DBPs formation. *Water Research*. 45, 3753-3764.
- Charrois, J.W.A., Arend, M.W., Froese, K.L. and Hrudey, S.E. 2004. Detecting N-nitrosamines in drinking water at nanogram per liter levels using ammonia positive chemical ionization. *Environmental Science and Technology*. 38, 4835-4841.
- Charrois, J.W.A., Boyd, J.M., Froese, K.L., and Hrudey, S.E. 2007. Occurrence of N-nitrosamines in Alberta public drinkingwater distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*. 6(1), 103-114.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A., and Booksh, K. 2003. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environmental Science and Technology*. 37(24), 5701-5710.
- Chen, W.H., and Young, T.M. 2008. NDMA formation during chlorination and chloramination of aqueous diuron solutions. *Environmental Science and Technology*. 42(4), 1072-1077.
- Choi, J., and Valentine, R.L. 2001. Studies on the formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) in drinking water: a new chloramination disinfection by-product. In *Proceedings - Annual Conference American Water Works Association; AWWA: Denver, CO*, 47-55.
- Choi, J., and Valentine, R.L. 2003. N-Nitrosodimethylamine formation by free-chlorine-enhanced nitrosation of dimethylamine. *Environmental Science and Technology*. 37(21), 4871-4876.
- Croue, J.P., Korshin, G.V., and Benjamin, M. 1999. Characterization of natural organic matter in drinking water; *AWWA Research Foundation: Denver, CO*.
- Dotson, A., and Westerhoff, P. 2009. Occurrence and removal of amino acids during drinking water treatment. *Journal of the American Water Works Association (AWWA)*. 101, 101-117.
- Emtiazi, G., Satarii, M., Mazaherion, F. 2001. The utilization of aniline, chlorinated aniline, and aniline blue as the only source of nitrogen by fungi in water. *Water Research*. 35(5), 1219-1224.
- Environmental Protection Agency (EPA 521). 2012. 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. <http://www.epa.gov/nrlcwww/ordmeth.htm> (accessed November 20, 2012).
- Gangolli, S.D., van den Brandt, P.A., Feron, V.J., Janzowsky, C., Koeman, J.H. , Speijers, G.J., Spiegelhalder, B., Walker, R., and Wisnok, J.S. 1994. Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds. *European Journal of Pharmacology: Environmental Toxicology and Pharmacology*. 292(1), 1-38.

- Gerecke, A.C., Sedlak, D.L. Precursors of N-nitrosodimethylamine in natural waters. 2003. *Environmental Science and Technology*. 37(7), 1331-1336.
- Government of Ontario. Safe Drinking Water Act. 2010. Ontario Regulation 169/03, Schedule 2. <http://www.ene.gov.on.ca/environment/en/legislation/index.htm> (accessed September, 2012).
- GSI chemical properties database (GSI Environmental Inc.). 2010. <http://www.gsi-net.com/en/publications/gsi-chemical-database.html> (accessed September, 2012)
- Jenkins, S.W.D., Koester, C.J., Taguchi, V.Y., Wang, D.T., Palmentier, J.P.F., and Hong, K.P. 1995. N-nitroso dimethylamine in drinking water using a rapid, solid-phase extraction method. *Environmental Science and Pollution Research*. 2(4), 207-210.
- Jurado-Sanchez, B., Ballesteros, E., and Gallego, M. 2009. Comparison of several solid-phase extraction sorbents for continuous determination of amines in water by gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*. 79, 613-620.
- Jurado-Sanchez, B., Ballesteros, E., and Gallego, M. 2010. Screening of N-nitrosamines in tap and swimming pool waters using fast gas chromatography. *Journal of Separation Science*. 33(4-5), 610-616.
- Jurado-Sanchez, B., Ballesteros, E. and Gallego, M. 2012. Occurrence of aromatic amines and N-nitrosamines in the different steps of a drinking water treatment plant. *Water Research*. 46, 4543-4555.
- Kebbekus, B.B. and Mitra, S. 1998. *Environmental Chemical Analysis*. Blackie Academic & Professional, New York, 25-28.
- Kim, M.K., Mah, J.H., and Hwang, H.J. 2009. Biogenic amine formation and bacterial contribution in fish, squid and shellfish. *Food Chemistry*. 116(1), 87-95.
- Kodamatani, H., Yamazaki, S., Saito, K., Amponsaa-Karikari, A., Kishikawa, N., Kuroda, N., Tomiyasu, T., and Komatsu, Y. 2009. Highly sensitive method for determination of N-nitrosamines using high-performance liquid chromatography with online UV irradiation and luminol chemiluminescence detection. *Journal of Chromatography A*. 1216(1), 92-98.
- Kosaka, K., Asami, M., Konno, Y., Oya, M., and Kunikane, S. 2009. Identification of Antiyellowing Agents as Precursors of N-Nitrosodimethylamine Production on Ozonation from Sewage Treatment Plant Influent. *Environmental Science and Technology*. 43, 5236-5241.
- Krasner, S.W., Weinberg, H.S., Richardson, S.D., Pastor, S.J., Chinn, R., Sclimenti, M.J., et al. 2006. Occurrence of a new generation of disinfection byproducts. *Environmental Science and Technology*. 40, 7175-85.
- 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, 8320-8325.

- Krauss, M., Longree, P., Dorusch, F., Ort, C., and Hollender, J. 2009. Occurrence and removal of N-nitrosamines in wastewater treatment plants. *Water Research*. 43, 4381-4391.
- Kumsuvan, J. 2013. Reduction of N-nitrosodimethylamine precursors in raw water supply by enhanced coagulation with powder activated carbon. Master's thesis, Science program in environmental management (Interdisciplinary program), Graduate school Chulalongkorn university.
- Lee, C., Yoon, J., and von Gunten, U. 2007. Oxidative degradation of N-nitrosodimethylamine by conventional and the advanced oxidation process ozone/hydrogen peroxide, *Water Research*. 41, 581-590.
- Lee, W., and Westerhoff, P. 2005. Dissolved organic nitrogen measurement using dialysis pretreatment. *Environmental Science and Technology*. 39, 879-884.
- Llop, A., Borrull, F., and Pocurull, E. 2012. Pressurised hot water extraction followed by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry for the determination of N-nitrosamines in sewage sludge. *Talanta*. 88, 284-289.
- Ma, Q., Xi, H-W., Wang, C., Bai, H., Xi, G-C., Su, N., Xu, L-Y., and Wang, J-B. 2011. Determination of Ten Volatile Nitrosamines in Cosmetics by Gas Chromatography Tandem Mass Spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 39(8), 1201-1207.
- Mhlongo, S.H. 2009. Monitoring nitrosamines in large water distribution systems and their removal using cyclodextrin polyurethanes. Dissertation in fulfilment of the requirement for the degree master of science in chemistry. Faculty of Science, University of Johannesburg. 184 Pages.
- Mhlongo, S.H., Mamba, B.B., and Krause, R.W. 2009. Nitrosamines: a review on their prevalence as emerging pollutants and potential remediation options, *South African Water Research*. 35, 735-740.
- Ministry of the Environment of Ontario (MEO), Technical support document for Ontario Drinking Water Standards, objectives and guidelines as of January 2009<<http://www.ene.gov.on.ca/envision/techdocs/4449e.htm>> (2009).
- Mitch, W.A., and Sedlak, D.L. 2004. Characterization and fate of N-nitrosodimethylamine precursors in municipal wastewater treatment plants. *Environmental Science and Technology*. 38(5), 1445-1454.
- Mitch W.A., and Sedlak, D.L. 2002. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination. *Environmental Science and Technology*. 36, 588-595.
- <sup>a</sup>Mitch, W.A., Sharp, J.O., Trussell, R.R., Valentine, R.L., Alvarez-Cohen, L., and Sedlak, D.L. 2003. N-nitrosodimethylamine (NDMA) as a drinking water contaminant: A Review: *Environmental Engineering Science*. 20(5), 389-404.

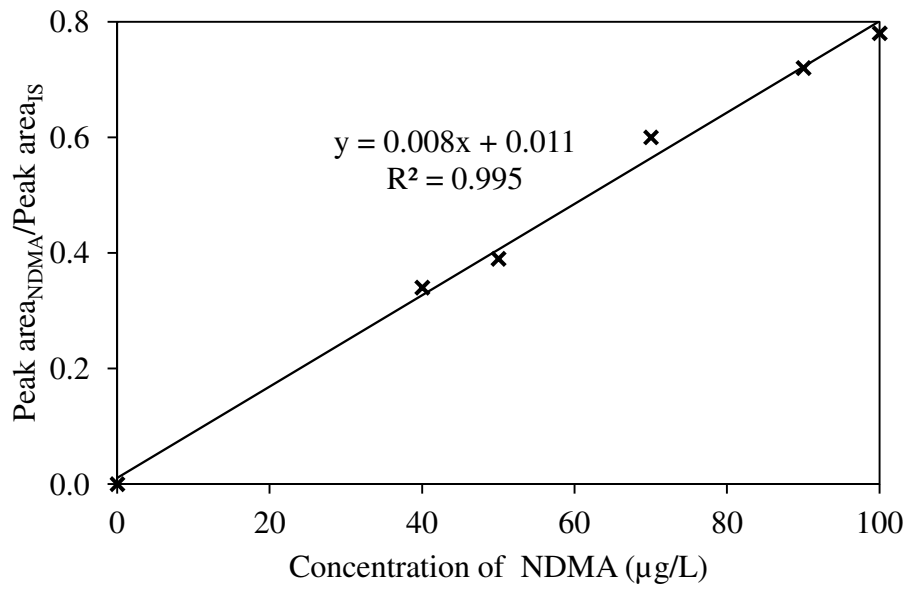
- <sup>b</sup>Mitch, W. A., Gerecke, A., and Sedlak, D.L. 2003. A N-nitrosodimethylamine (NDMA) precursor analysis for chlorination of water and wastewater. *Water Research*. 37, 3733-3741.
- Musikavong, C., Rattanamanee, P., Suksaroj, C., and Wattanachira, S. 2008. Three-dimensional fluorescent spectroscopy analysis for characterization the origin of dissolved organic matter in U-Tapao Canal, Songkla, Thailand. The proceeding of natural organic matter from source to tap, 2-4 September, 657-665.
- Musikavong, C., Wattanachira, S., Nakajima, F. and Furumai, H. 2006. Three-dimensional fluorescent spectroscopy analysis for evaluation of organic matter removal from industrial estate wastewater by stabilization ponds. *Water Science and Technology*. 55(11), 201-210.
- Najm, I., and Trussell, R.R. 2001. NDMA formation in water and wastewater. *Journal of American Water Works Association*. 93(2), 92-99.
- Nawrocki, J., and Andrzejewski, P. 2011. Nitrosamines and water. *Journal of Hazardous Materials*. 189, 1-18.
- OEHHA. 2006. Public Health Goal for N-Nitrosodimethylamine in Drinking Water, Office of Environmental Health Hazard Assessment, CA.
- O'Neill, F.J., Bromley-Challenor, K.C.A., Greenwood, R.J., Knapp, J.S. 2000. Bacterial growth on aniline: implications for the biotreatment of industrial wastewater. *Water Research*. 34(18), 4397-4409.
- Oya, M., Kosaka, K., Asami, M., and Kunikane, S. 2008. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) by ozonation of dyes and related compounds. *Chemosphere*. 73(11), 1724-1730.
- Padhye, L., Luzinova, Y., Cho, M., Mizaikoff, B., Kim, J., and Huang, C-. 2011. PolyDADMAC and dimethylamine as precursors of N-nitrosodimethylamine during ozonation: reaction kinetics and mechanisms, *Environmental Science and Technology*. 45, 4353-4359.
- Richardson, S.D. 2003. Disinfection By-Products and Other Emerging Contaminants in Drinking Water. *Trends in Analytical Chemistry*. 22(10), 666-684.
- Roux, J.L., Gallard, H., and Croué, J.-P. 2012. Formation of NDMA and Halogenated DBPs by Chloramination of Tertiary Amines: The Influence of Bromide Ion. *Environmental Science and Technology*. 46, 1581-1589.
- Russell, C.G., Blute, N.K., Via, S., Wu, X.Y. and Chowdhury, Z. 2012. Nationwide Assessment of Nitrosamine Occurrence and Trends. *Journal of the American Water Works Association (AWWA)*. 104, 3:57.
- Sacher, F., Lenz, S., and Brauch, H. 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 benzenesulfonyl 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 Research Foundation*, Denver, CO, USA.

- Schafer, A.I., Mitch, W., Walewijk, S., Munoz, A., Teuten, E. and Reinhard, M. 2010. Micropollutants in Water Recycling: A Case Study of N-Nitrosodimethylamine (NDMA) Exposure from Water versus Food. *Sustainability Science and Engineering*. Volume 2, ISSN1871-2711, DOI 10.1016/S1871-2711(09)00207-4.
- 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, 6340-6346.
- Schreiber, I.M., and Mitch, W.A. 2006. Nitrosamine formation pathway revisited: The importance of chloramine speciation and dissolved oxygen. *Environmental Science and Technology*. 40(19), 6007-6014.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1995. 19th ed, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC.
- Sumpattanavorachai, S. 2013. Treatment of N-nitrosodimethylamine precursors in coagulated water by nanofiltration and reverse osmosis membrane. Master's thesis, Science program in environmental management (Interdisciplinary program), Graduate school Chulalongkorn university.
- Taguchi, V.Y., Jenkins, S.W.D., and Wang, D.T., Palmentier, J.F.P., and Reiner, E.J. 1994. Determination of N-nitrosodimethylamine by isotope dilution, high-resolution mass spectrometry. *Canadian Journal of Applied Spectroscopy*. 39(3), 87-93.
- 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.
- U.S. EPA. 2002. Integrated Risk Information System. Office of Research and Development (ORD), National Center for Environmental Assessment; <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris/search.htm>. (accessed November 20, 2012).
- Vocht, F. de., Burstyn, I., Straif, K., Vermeulen, R., Jakobsson, K., Nichols, L., Peplonska, B., Taeger, D., and Kromhout, H. 2007. Occupational exposure to NDMA and NMor in the European rubber industry. *Journal of Environmental Monitoring*. 9(3), 253-259.
- Von Gunten, U., Salhi, E., Schmidt, C.K., and Arnold, W.A. 2010. Kinetics and mechanisms of N-nitrosodimethylamine formation upon ozonation of N,Ndimethylsulfamide-containing waters: bromide catalysis. *Environmental Science and Technology*. 44, 5762-5768.
- 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.
- WHO. 2005. Trihalomethanes in drinking-water: background document for development of who guidelines for drinking-water quality; WHO/SDE/WSH/05.08/64.

- World Health Organization (WHO), N-nitrosodimethylamine in drinking water background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. Report No.WHO/HSE/AMR/08.03/8 (2008).
- Wu, W.W., Chadik, P.A., and Delfino, J.J. 2003. The relationship between disinfection by-product formation and structural characteristics of humic substances in chloramination. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 22(12), 2845-2852.
- Xu, B., Li, D-P., Li, W., Xia S-J., Lin, Y-L, Hu, C-Y., Zhang, C-J., and Gao, N-Y. 2010. Measurements of dissolved organic nitrogen (DON) in water samples with nanofiltration pretreatment. *Water Research*. 44, 5376-5386.
- Yang, C.Y., Chiu, H.F., Cheng, M.F., and Tsai S.S. 1998. Chlorination of drinking water and cancer mortality in Taiwan. *Environmental Research, Section A*; 78, 1-6.
- Yang, L., Chen, Z., Shen, J., Xu, Z., Liang, H., Tian, J., Ben, Y., Zhai, X., Shi, W., and Li, G. 2009. Reinvestigation of the Nitrosamine-Formation Mechanism during Ozonation. *Environmental Science and Technology*. 43, 5481-5487.
- Zhao, Y.Y., Boyd, J., Hrudey, S.E. and Li, X.F. 2006. Characterization of new nitrosamines in drinking water using liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Environmental Science and Technology*. 40, 7636-7641.

## ภาคผนวก

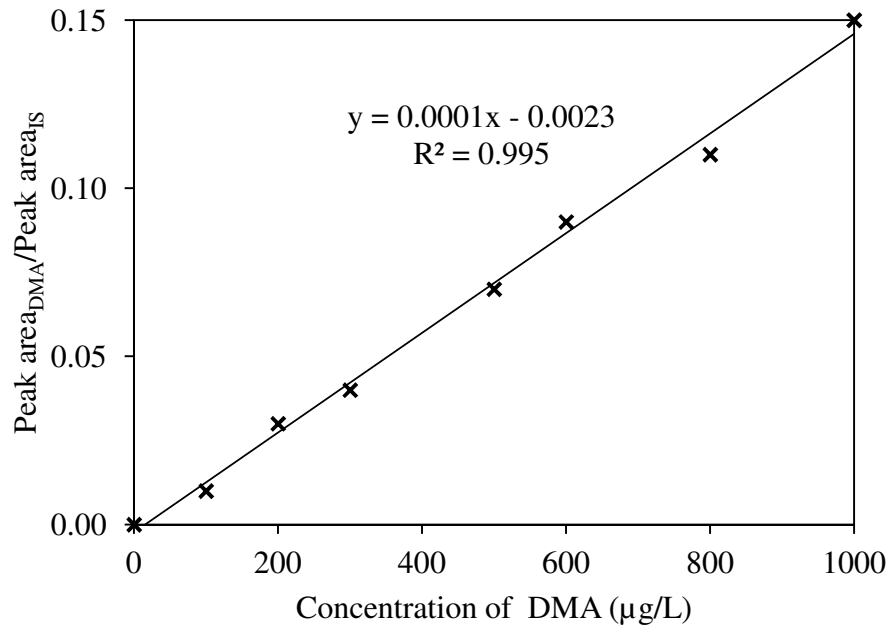
ภาคผนวก ก  
Calibration curve ของสาร NDMA



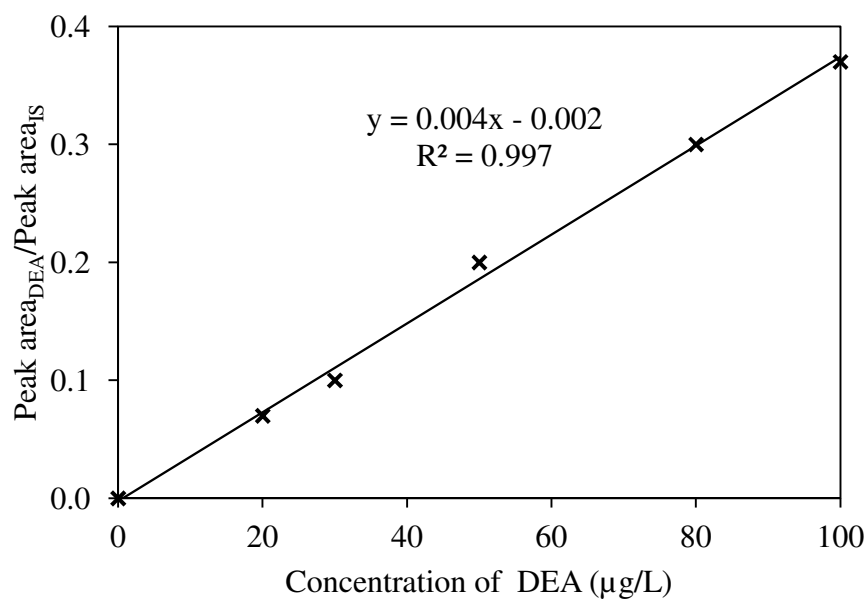
ภาพที่ ก-1 Calibration curve ของสาร NDMA ที่ระดับความเข้มข้น 40, 50, 70, 90 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ข  
Calibration curve ของสารตั้งต้นของ NDMA

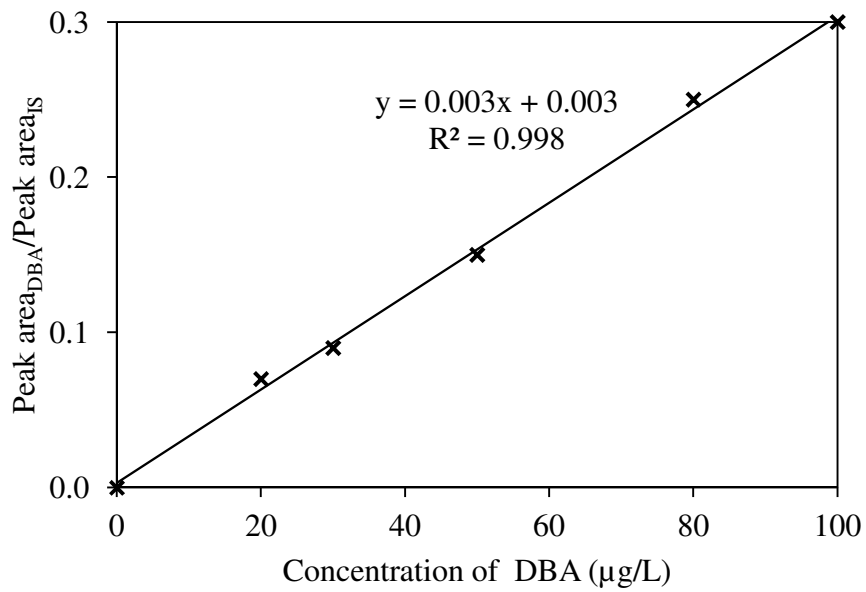


ภาพที่ ข-1 Calibration curve ของสาร DMA ที่ระดับความเข้มข้น 100, 200, 300, 500, 700, 800 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

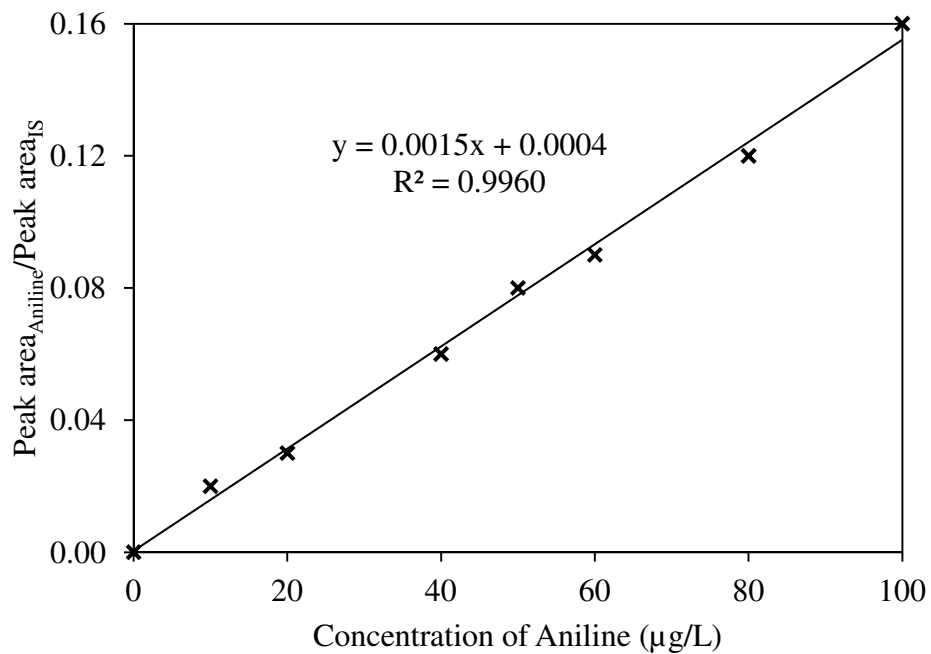


ภาพที่ ข-2 Calibration curve ของสาร DEA ที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 50, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

ภาคผนวก ข (ต่อ)

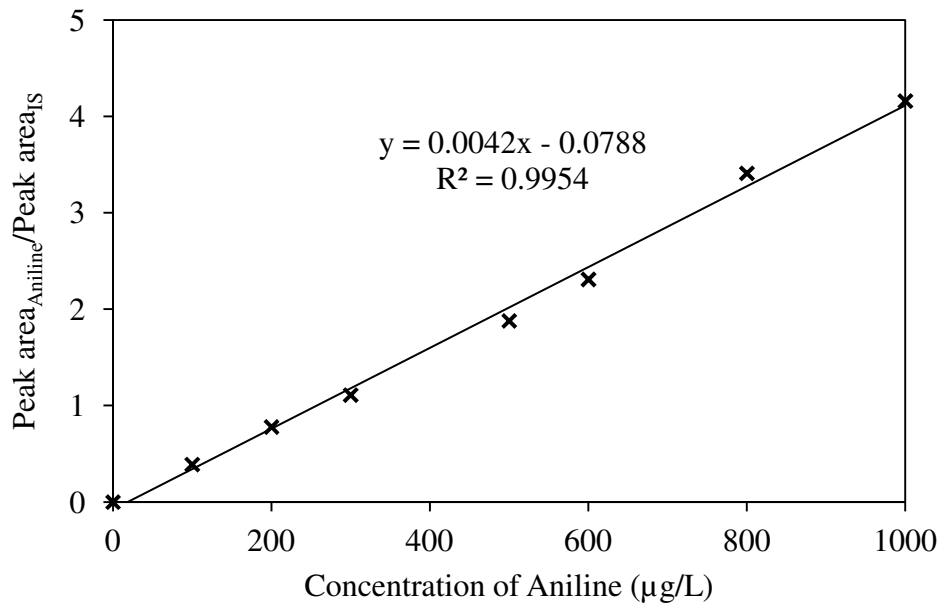


ภาพที่ ข-3 Calibration curve ของสาร DBA ที่ระดับความเข้มข้น 20, 30, 50, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาพที่ ข-4 Calibration curve ของสาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 10, 20, 40, 50, 60, 80 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

## ภาคผนวก ข (ต่อ)



ภาพที่ ข-5 Calibration curve ของสาร aniline ที่ระดับความเข้มข้น 100, 200, 300, 500, 600, 800 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร

## ภาคผนวก ค

## 1) ปริมาณสาร NDMA สารไนโตรซามีน 9 ชนิด และสารตั้งต้นของ NDMA

ตารางที่ ค-1 ปริมาณสาร NDMA ชนิดของสารไนโตรซามีน และปริมาณสาร NDMA-FP จากการสกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณคลองอู่ตะเภา

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ปริมาณสาร NDMA ( $\mu\text{g/L}$ )	ชนิดของสารไนโตรซามีน	ปริมาณสาร NDMA-FP ( $\mu\text{g/L}$ )
อ่างเก็บน้ำสะเดา	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำดิบสะเดา	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำดิบพะตง-พังลา	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำดิบหาดใหญ่	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำประปาสะเดา (ก่อน $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำประปาพะตง-พังลา (ก่อน $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อน $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำประปาสะเดา (หลัง $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	-
	2	ND	ND	-
น้ำประปาพะตง-พังลา (หลัง $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	-
	2	ND	ND	-
น้ำประปาหาดใหญ่ (หลัง $\text{Cl}_2$ )	1	ND	ND	-
	2	ND	ND	-
น้ำบาดาล 1 ใกล้หลุมฝังกลบขยะ	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำบาดาล 2 ในบริเวณหลุมฝังกลบขยะ	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND
น้ำบาดาล 3 ในชุมชนคอหงส์	1	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND

ND = not detected; LOD of NDMA = 2.65  $\mu\text{g/L}$

### ภาคผนวก ค (ต่อ)

ตารางที่ ค-2 ปริมาณสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก (DMA DEA และ DBA) และสารกลุ่มอะโรมาติก (aniline) ที่ตรวจพบจากการสกัดตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำต่างๆ บริเวณคลองอู่ตะเภา

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ปริมาณสาร สารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติก : DMA DEA และ DBA (µg/L)	ปริมาณสาร สารตั้งต้นกลุ่มอะโรมาติก : aniline (ng/L)
อ่างเก็บน้ำสะเดา	1	✓	124
	2	✓	123
อ่างเก็บน้ำคลองทลา	1	✓	128
	2	✓	123
น้ำดิบสะเดา	1	✓	163
	2	✓	132
น้ำดิบพะตง-พังลา	1	✓	124
	2	✓	141
น้ำดิบหาดใหญ่	1	✓	111
	2	✓	176
น้ำประปาสะเดา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	✓	163
	2	✓	114
น้ำประปาพะตง-พังลา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	✓	134
	2	✓	123
น้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	✓	135
	2	✓	132
น้ำประปาสะเดา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	✓	152
	2	✓	132
น้ำประปาพะตง-พังลา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	✓	145
	2	✓	123
น้ำประปาหาดใหญ่ (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	✓	153
	2	✓	123
น้ำบาดาล 1 ใกล้หลุมฝังกลบ ขยะ	1	✓	119
	2	✓	141
น้ำบาดาล 2 ในบริเวณหลุมฝัง กลบขยะ	1	✓	ND
	2	✓	141
น้ำบาดาล 3 ในชุมชนคอหงส์	1	✓	ND
	2	✓	132

ND = not detected; ✓ หมายถึง ตรวจสอบพบแต่ไม่สามารถระบุเชิงปริมาณของสารแต่ละชนิดได้; LOD of DMA = 2.6 µg/L; LOD of DEA = 1.0 µg/L; LOD of DBA = 2.8 µg/L; LOD of aniline = 4.2 µg/L

## ภาคผนวก ง

## การคำนวณปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีน

ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นกลุ่มอะลิฟาติกเอมีนของน้ำได้โดยตรงจากเครื่อง GC-NPD จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณสารตั้งต้นชนิด a, b และ c ดังนี้

1. ปริมาณสารตั้งต้น<sup>a</sup> คือผลรวมของสาร DMA+DEA+DBA (หน่วย  $\mu\text{g DMA/L}$ ) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DMA สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>a</sup> ได้จากกราฟมาตรฐานของสาร DMA ดังสมการ

$$y = 0.0001x - 0.0023$$

เมื่อ  $x$  คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>a</sup> ( $\mu\text{g DMA/L}$ )

$y$  คือ  $\text{Peak area}_{\text{DMA}}/\text{Peak area}_{\text{IS}}$

2. ปริมาณสารตั้งต้น<sup>b</sup> คือผลรวมของสาร DEA+DMA+DBA (หน่วย  $\mu\text{g DEA/L}$ ) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DEA สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>b</sup> ได้จากกราฟมาตรฐานของสาร DEA ดังสมการ

$$y = 0.004x - 0.002$$

เมื่อ  $x$  คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>b</sup> ( $\mu\text{g DEA/L}$ )

$y$  คือ  $\text{Peak area}_{\text{DEA}}/\text{Peak area}_{\text{IS}}$

3. ปริมาณสารตั้งต้น<sup>c</sup> คือผลรวมของสาร DBA+DMA+DEA (หน่วย  $\mu\text{g DBA/L}$ ) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ DBA สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>c</sup> ได้จากกราฟมาตรฐานของสาร DBA ดังสมการ

$$y = 0.003x + 0.003$$

เมื่อ  $x$  คือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น<sup>c</sup> ( $\mu\text{g DBA/L}$ )

$y$  คือ  $\text{Peak area}_{\text{DBA}}/\text{Peak area}_{\text{IS}}$

## ภาคผนวก จ

### การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

#### 1. การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Method validation)

ทดสอบ Performance characteristics ต่างๆ ได้แก่ Linearity, Accuracy, LOD และ LOQ โดยใช้ตัวอย่างน้ำดิบประปาและน้ำประปาเป็น sample blank สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร NDMA ทดสอบตามวิธีการมาตรฐาน EPA521 และสำหรับวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร DMA, DEA และ DBA ทดสอบตามวิธีการสกัดแบบ liquid-liquid extraction (LLE) ที่ดัดแปลงจาก Sacheret *al.* (1997) และ Mitch and Sedlak (2003) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสาร Aniline ทดสอบตามวิธีการสกัดแบบ solid phase extraction (SPE) ที่ดัดแปลงจาก Jurado-Sanchez *et al.* (2012)

##### (1) ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

นำกราฟมาตรฐานที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlation coefficient,  $r$ ) ซึ่งต้องได้ค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.995 จึงจะยอมรับได้ (แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม, 2534)

(2) ขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) (Kebbekus and Mitra, 1998)

Limit of detection (LOD) เป็นความเข้มข้นต่ำสุดของสารในตัวอย่างที่สามารถตรวจพบได้ ซึ่ง LOD คือปริมาณสารที่ให้สัญญาณเป็น 3 เท่าของสัญญาณรบกวน

Limit of quantitation (LOQ) เป็นค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารได้โดยที่มีความแม่นยำและความเที่ยงเป็นที่ยอมรับได้ ซึ่ง LOQ คือปริมาณสารที่ให้สัญญาณเท่ากับ 10 เท่าของสัญญาณรบกวน

LOD และ LOQ หาได้โดยการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุด จำนวน 10 ซ้ำ หาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard derivation, SD) และนำค่า SD มาคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\text{LOD} = 3\text{SD}$$

$$\text{LOQ} = 10\text{SD}$$

##### (3) ความแม่นยำ (Accuracy)

การหาค่าเปอร์เซ็นต์การได้คืนกลับของสารที่วิเคราะห์ เป็นการทดสอบ fortified sample โดยการ spike สารละลายมาตรฐานที่ใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่าง (น้ำดิบประปาและน้ำประปา) เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมสารมาตรฐานลงไป วิเคราะห์อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสาร NDMA, DMA, DEA, DBA และ Aniline ตามวิธีการในหัวข้อ 3.4.7 และ 3.4.9 แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์การได้คืนกลับของสารมาตรฐาน (% recovery) ในตัวอย่างน้ำดังกล่าวที่ (5)

$$\% \text{ Recovery} = \frac{C_s - C_u}{C} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ  $C_s$  = ความเข้มข้นที่วัดได้ของ fortified sample

$C_u$  = ความเข้มข้นที่วัดได้ของตัวอย่าง

$C$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่เติมลงไปในตัวอย่างไม่

## ภาคผนวก จ (ต่อ)

### 2. ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์

#### 2.1 ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of detection, LOD) และขีดจำกัดของการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

จากการทดสอบหาความเข้มข้นของสาร NDMA ตามวิธีการมาตรฐาน EPA521 สามารถตรวจพบได้โดยทำการวิเคราะห์ 10 ครั้ง ที่ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เป็น 0.884 ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ (LOD) ของ NDMA มีค่าเป็น 2.65 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (LOQ) ของ NDMA มีค่าเป็น 8.83 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) ในกราฟมาตรฐานมีค่าสูงกว่า 0.995 ดังแสดงในภาคผนวกภาพที่ ก-1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดี

ผลการทดสอบหาความเข้มข้นของสารตั้งต้นชนิด Dimethylamine (DMA), Diethylamine (DEA) และ Dibutylamine (DBA) โดยวิธีการแบบ liquid-liquid extraction (LLE) สามารถตรวจพบได้โดยทำการวิเคราะห์ 10 ครั้ง ที่ความเข้มข้น 100, 20 และ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับสาร DMA, DEA และ DBA ตามลำดับ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เป็น 7.070 0.354 และ 0.948 สำหรับสาร DMA, DEA และ DBA ตามลำดับ ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ (LOD) ของ DMA มีค่าเป็น 21.21 ไมโครกรัมต่อลิตร LOD ของ DEA มีค่าเป็น 1.061 ไมโครกรัมต่อลิตร และ LOD ของ DBA มีค่าเป็น 2.84 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (LOQ) ของ DMA มีค่าเป็น 70.70 ไมโครกรัมต่อลิตร LOQ ของ DEA มีค่าเป็น 3.53 ไมโครกรัมต่อลิตร และ LOQ ของ DBA มีค่าเป็น 9.475 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) ของสารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดนั้น ในกราฟมาตรฐานมีค่าสูงกว่า 0.995 ดังแสดงในภาคผนวกภาพที่ ข-1, 2, 3 แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดี

ผลการทดสอบหาความเข้มข้นของสาร aniline โดยวิธีการแบบ solid phase extraction (SPE) สามารถตรวจพบได้ความเข้มข้นต่ำสุดที่ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เป็น 1.414 ดังนั้นความเข้มข้นต่ำสุดที่ตรวจพบได้ (LOD) ของ aniline มีค่าเป็น 4.24 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้ (LOQ) มีค่าเป็น 14.14 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, r) ในกราฟมาตรฐานของสาร Aniline มีค่าสูงกว่า 0.995 ดังแสดงในภาคผนวกภาพที่ ข-4, 5 แสดงว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดี

#### 2.2 ค่าความแม่นยำของการสกัดสาร NDMA และสารตั้งต้นของ NDMA จากตัวอย่างน้ำ

ความแม่นยำของการสกัดสาร NDMA และสารตั้งต้น 4 ชนิด ได้แก่ DMA DEA DBA และ aniline ในตัวอย่างน้ำดิบประปาและน้ำประปา สามารถแสดงได้ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืน (% recovery) ในตารางที่ จ-1

จากตารางที่ จ-1 ค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร NDMA จากการทดสอบด้วยวิธีการสกัดแบบ SPE ที่ระดับความเข้มข้น 300, 600 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำ โดยใช้จำนวนตัวอย่างน้ำ 3 ตัวอย่าง สำหรับแต่ละความเข้มข้น ซึ่งวิเคราะห์ได้จากตัวอย่างน้ำดิบประปาและน้ำประปาขนาดใหญ่ พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 50.7 และ 57.5 % ตามลำดับ



### ภาคผนวก จ (ต่อ)

ตารางที่ จ-1 เเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร NDMA และสารตั้งต้นชนิดต่างๆ

สารสกัด	น้ำดิบประปา <sup>a</sup>		น้ำประปา <sup>a</sup>	
	Accuracy (% recovery)	Precision (RSD)	Accuracy (% recovery)	Precision (RSD)
NDMA	50.7±11.90	23.6	57.5±7.4	12.8
DMA	75.4±20.23	26.8	-	-
DEA	7.7±0.28	3.7	-	-
DBA	6.8±0.22	3.3	-	-
aniline	112.4±6.52	5.8	-	-

a. ตัวอย่างน้ำจากประปาขนาดใหญ่

ผลการทดสอบค่าความแม่นยำของการสกัดสาร DMA ที่ระดับความเข้มข้น 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำโดยใช้จำนวนตัวอย่างน้ำ 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละความเข้มข้นค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร DMA (ดังตารางที่ จ-1) ในน้ำดิบประปามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 75.4 % ผลการทดสอบค่าความแม่นยำ (Precision) ของสาร DEA และ DBA ในน้ำที่ระดับความเข้มข้น 100, 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยใช้จำนวนตัวอย่างน้ำ 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละความเข้มข้นแสดงผลดังตารางที่ จ-1 พบว่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสารทั้งสองชนิด มีค่าความแม่นยำน้อยมาก (ต่ำกว่า 7 %) เนื่องจาก % recovery มีค่าต่ำมาก จึงถือว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ (Sacher *et al.*, 1997) ยังไม่มีความแม่นยำพอผลการทดสอบค่าความแม่นยำของสาร Aniline ที่ระดับความเข้มข้น 100 500 และ 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำโดยใช้จำนวนตัวอย่างตัวอย่างน้ำ 3 ตัวอย่างสำหรับแต่ละความเข้มข้นค่าเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสาร DMA (ดังตารางที่ จ-1) ในน้ำดิบประปามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 112.4 % ซึ่งค่อนข้างสูง จึงถือว่าการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำในช่วงความเข้มข้น 100-1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร มีความแม่นยำที่สามารถยอมรับได้

โดยสรุป จากการตรวจวัดปริมาณสาร NDMA ของตัวอย่างด้วยเครื่อง GC-NPD พบว่ามีค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดที่ 8.83 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยมีค่า % recovery เท่ากับ 50.7 % และตัวอย่างน้ำถูก concentrated 1,000 เท่า ดังนั้น ค่า LOQ ของการตรวจวัดปริมาณสาร NDMA จึงมีค่าเป็น 17.40 นาโนกรัมต่อลิตร สำหรับสารตั้งต้นทั้งกลุ่มอะลิฟาติกและอะโรมาติก ได้แก่ DMA DEA DBA และ Aniline ตรวจพบว่ามีค่า % recovery เท่ากับ 75.4 %, 7.7 %, 6.8 % และ 112.4 % ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า LOQ ของการตรวจวัดปริมาณสาร DMA ได้เท่ากับ 938 นาโนกรัมต่อลิตรค่า LOQ ของ DEA เท่ากับ 459.74 นาโนกรัมต่อลิตรค่า LOQ ของ DBA เท่ากับ 1.40 ไมโครกรัมต่อลิตร และค่า LOQ ของ Aniline เท่ากับ 50.50 นาโนกรัมต่อลิตร

## ภาคผนวก ฉ

ตารางที่ ฉ-1 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 1 และ 2

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ (QSU)							
		Peak: A 230nm <sub>Ex</sub> /3 45nm <sub>Em</sub>	Peak: B 280nm <sub>Ex</sub> / 355nm <sub>Em</sub>	Peak: C 230nm <sub>Ex</sub> / 420nm <sub>Em</sub>	Peak: D 275nm <sub>Ex</sub> / 410nm <sub>Em</sub>	Peak: E 330nm <sub>Ex</sub> / 410nm <sub>Em</sub>	Tyrosine acid-like substances (Peak A+B)	Humic and fulvic acid-like substances (Peak C+D+E)	Total
อ่างเก็บน้ำสะเดา	1	0.6	0.5	2.1	1.3	1.2	1.1	4.6	5.7
	2	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	1.0	1.9	2.9
อ่างเก็บน้ำคลองหลา	1	0.7	0.4	4.0	0.9	1.3	1.1	6.2	7.3
	2	0.7	0.5	3.4	1.0	1.2	1.2	5.6	6.8
น้ำดิบสะเดา	1	0.6	0.5	2.0	1.3	1.2	1.1	4.5	5.6
	2	0.5	0.5	1.4	1.0	0.8	1.0	3.2	1.8
น้ำดิบพะตง-พังลา	1	4.8	2.5	1.9	2.4	2.2	7.3	6.5	13.8
	2	8.4	3.4	2.1	1.9	1.4	11.8	5.4	17.2
น้ำดิบหาดใหญ่	1	13.0	5.6	4.1	3.2	2.4	18.6	9.7	28.3
	2	16.7	7.2	4.1	3.5	2.3	23.9	9.9	33.8
น้ำประปาสะเดา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	0.5	1.0	0.7	0.8	0.7	1.5	2.2	3.7
	2	0.5	0.4	0.7	0.7	0.6	0.9	2.0	2.9
น้ำประปาพะตง-พังลา (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	7.6	3.1	1.3	1.4	1.0	10.7	3.7	14.4
	2	7.0	2.7	1.1	1.1	0.8	9.7	3.0	12.7
น้ำประปาหาดใหญ่ (ก่อน Cl <sub>2</sub> )	1	11.4	4.4	1.8	1.7	1.4	15.8	4.9	20.7
	2	14.5	5.4	2.0	1.9	1.4	19.9	5.3	25.3

## ภาคผนวก ฉ (ต่อ)

ตารางที่ ฉ-1 ความเข้มแสงฟลูออเรสเซนซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำ ครั้งที่ 1 และ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	ความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนซ์ (QSU)							
		Peak: A 230nm <sub>Ex</sub> / 45nm <sub>Em</sub>	Peak: B 280nm <sub>Ex</sub> / 355nm <sub>Em</sub>	Peak: C 230nm <sub>Ex</sub> / 420nm <sub>Em</sub>	Peak: D 275nm <sub>Ex</sub> / 410nm <sub>Em</sub>	Peak: E 330nm <sub>Ex</sub> / 410nm <sub>Em</sub>	Tyrosine acid-like substances (Peak A+B)	Humic and fulvic acid-like substances (Peak C+D+E)	Total
น้ำประปาสะเดา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	1.8	2.3
	2	0.3	0.4	0.7	0.6	0.8	0.7	2.1	1.7
น้ำประปาพะตง-พังลา (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	8.8	3.7	1.3	1.4	1.1	12.5	3.8	16.3
	2	9.2	3.1	1.2	1.0	0.7	12.3	2.9	15.2
น้ำประปาหาดใหญ่ (หลัง Cl <sub>2</sub> )	1	8.6	3.1	1.3	1.2	1.0	11.7	3.5	15.2
	2	12.6	4.6	1.7	1.4	1.0	17.2	4.1	21.3
น้ำบาดาล 1 ไกล หลุมฝังกลบขยะ	1	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.8	0.5	1.3
	2	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	1.0	0.3	1.3
น้ำบาดาล 2 ในบริเวณ หลุมฝังกลบขยะ	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.4	0.6	1.0
	2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.3	0.7
น้ำบาดาล 3 ในชุมชนคอหงส์	1	-	0.8	0.1	0.1	0.3	0.8	0.5	1.3
	2	-	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5