

การกำจัดกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้าง
และรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**REMOVAL OF HALOACETIC ACIDS (HAAS) IN WATER
SUPPLY BY COAGULATION - FLOCCULATION AND
ACTIVATED CARBON ADSORPTION PROCESSES**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering**

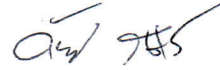
Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การกำจัดการฮาโลอะซีติก (HAAs) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้าง
และรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้หน่วยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



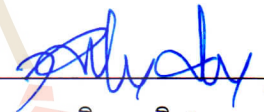
(อ. ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.สุจิตต์ คุรุจิต)

กรรมการ



(ผศ. ดร.พัชรินทร์ ราโช)

กรรมการ



(อ. ดร.สุพรรณณี จันทร์ภิรมณ์)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พงศธร แสงสุทธิ : การกำจัดกรดฮาโลอะซีติก (HAA_s) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (REMOVAL OF HALOACETIC ACIDS (HAA_s) IN WATER SUPPLY BY COAGULATION - FLOCCULATION AND ACTIVATED CARBON ADSORPTION PROCESSES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา, 171 หน้า

กรดฮาโลอะซีติก (HAA_s) เป็นสารพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็ง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดกรดฮาโลอะซีติก (HAA_s) ในน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon (GAC) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หมู่บ้าน โศกกรวด และหมู่บ้านหนองรังกา 2) การทดลองแบบทีละเทเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ละลายน้ำ (DOC) รวมทั้งศึกษาความสามารถการดูดซับ HAA_s ของ GAC และ 3) การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด HAA_s ด้วยอัตราการไหล และชั้นความสูงของ GAC ผลการศึกษาคุณลักษณะของน้ำประปาของทั้ง 3 ระบบผลิตน้ำประปาพบว่ามีความคลอรีนอิสระคงค้างสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ในช่วง 0.20 - 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบอยู่ในช่วง 0.53 - 2.78 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบปริมาณความเข้มข้น HAA_s ในน้ำประปาของโรงอาหารกาสะลองคำ หอพักสุรนิวศ 13 หมู่บ้าน โศกกรวด และหมู่บ้านหนองรังกาสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ US.EPA. กำหนดไว้ที่ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยพบอยู่ในช่วง 68.63 - 347.34 ไมโครกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาระบบที่ละเทสารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพดีที่สุดในกำจัดความขุ่นร้อยละ 96.84 และมีประสิทธิภาพกำจัด DOC ร้อยละ 64.42 และส่งผลทำให้สามารถลดการเกิด HAA_s ได้ร้อยละ 66.66 นอกจากนี้การกำจัด HAA_s โดยการดูดซับด้วย GAC ให้ค่าความสามารถในการดูดซับแบบไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ 54.95 ไมโครกรัมต่อกรัม และผลการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่าอัตราเร็วการไหลที่ช้า และชั้นความสูงของ GAC ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA_s เพิ่มขึ้น โดยมีค่าความสามารถการดูดซับ HAA_s ในคอลัมน์เท่ากับ 36.68 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีอายุการใช้งาน 23.8 ชั่วโมง ผลการศึกษาทั้ง 3 การทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาเพื่อลดการเกิดและกำจัด HAA_s ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา พงศธร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ประพัฒน์

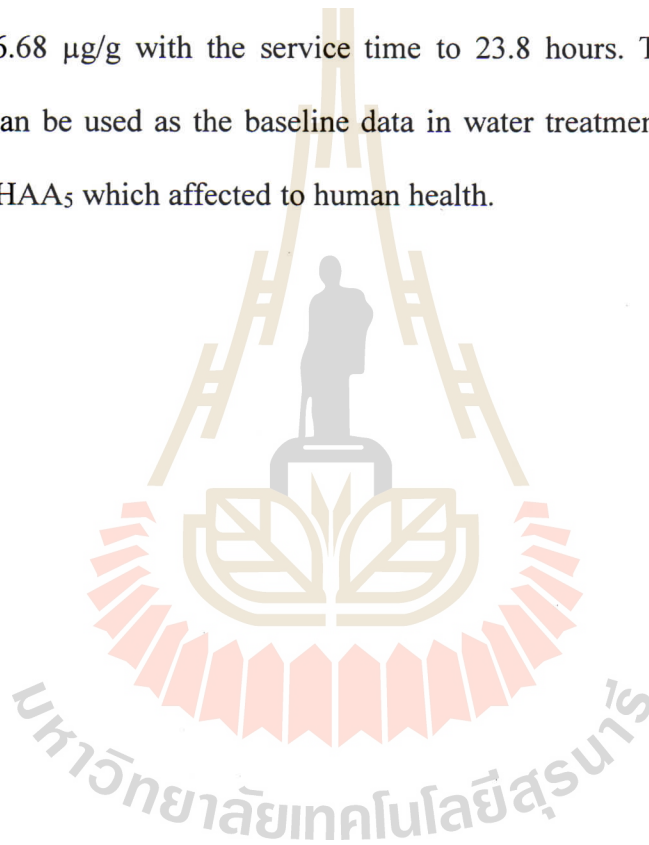
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ประพัฒน์

PHONGTHON SAENGCHUT : REMOVAL OF HALOACETIC ACIDS
(HAAs) IN WATER SUPPLY BY COAGULATION - FLOCCULATION
AND ACTIVATED CARBON ADSORPTION PROCESSES. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. PRAPAT PENTAMWA, Ph.D., 171 PP.

HALOACETIC ACIDS/ COAGULATION - FLOCCULATION PROCESS/
ADSORPTION PROCESS

Haloacetic acids (HAAs) is disinfection by products (DBPs), having the potential to be carcinogenicity cancer. The purposes of this study were removed the 5 types of HAAs (HAA₅) in water supply by coagulation-flocculation process and adsorption process by granular coconut shell activated carbon adsorbent (GAC). The experiments were divided into three steps: 1) to study water characteristics of the water treatment systems namely Suranaree University of Technology, Khok Kruat village and Nongrunka village 2) to determine the optimum conditions (batch experiment) for remove turbidity and dissolved organic carbon (DOC) including to study HAA₅ adsorption capacity of GAC and 3) to determine the removed efficiency of HAA₅ (column experiment) by investigate flow rate and bed height factor of GAC. Results showed that the water characteristics of 3 water treatment systems of residuals chlorine were found between 0.53 - 2.78 mg/L which higher than the standard set of 0.20 - 0.50 mg/L. They also found the high concentration of HAA₅ in water at the Kasalongkum canteen, dormitory No.13, Khok Kruat village and Nongrunka village with the US.EPA. standard set of 60 µg/L that found in the range of 68.63 - 347.34 µg/L. For batch experiment, the highest removal efficiency of

turbidity and DOC by using PACl with the concentration of 30 mg/L and cationic polymer with the concentration of 0.5 mg/L, found at 96.84% and 62.42% respectively. By this following process, it could also removed 66.66% of HAA₅. The adsorptive capacity by Langmuir isotherm calculation was 54.95 µg/g. The column experiment showed that at both lower flow rate and bed height of GAC increasing the best removal to HAA₅ and also found that adsorption capacity for HAA₅ was 36.68 µg/g with the service time to 23.8 hours. The result from three experiments can be used as the baseline data in water treatment process application for removing HAA₅ which affected to human health.



School of Environmental Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature _____ มณเฑียร

Advisor's Signature _____ วชิระพันธ์

Co-Advisor's Signature _____ ชัชวาลย์

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพัฒน์ เป็นตามวา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิต กระจิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ยังต่องานวิจัย รวมทั้งได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ เล่มนี้จนทำให้มีความบริบูรณ์พร้อมทางด้านวิชาการ

อาจารย์ ดร.อภิชน วัชรนทร์วงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ราโช และอาจารย์ ดร.สุพรรณิ จันท์ภิรมณ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการเครื่องมือวิเคราะห์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ กองทุนสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน และคุณนารี กลิ่นกลาง เลขานุการประจำสำนักวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตทุกท่านที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอระลึกถึงคุณพระศรีรัตนตรัย คุณครูบาอาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ได้ให้การเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ส่งเสริมการศึกษา ตลอดจนให้กำลังใจ ด้วยความรักและความเข้าใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

พงศ์ธร แสงชุตติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 สมมติฐานของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (Water treatment process).....	6
2.2 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs).....	9
2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ธรรมชาติ.....	9
2.2.2 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ	10
2.2.3 การตรวจวัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ.....	12
2.3 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)	13
2.3.1 ปฏิกริยาของคลอรีนในน้ำ.....	14
2.4 กลไกการเกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs)	18
2.5 กรดฮาโลอะซีติก (HAAs)	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 การเกิดกรดฮาโลอะซีติก	20
2.5.2 ชนิดโครงสร้าง และสมบัติทางกายและเคมีของกรดฮาโลอะซีติก	20
2.5.3 ความเป็นอันตรายของกรดฮาโลอะซีติก	22
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดฮาโลอะซีติก	23
2.6 กระบวนการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก	27
2.7 กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation process)	27
2.7.1 หลักการของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน	28
2.7.2 กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	28
2.7.3 สารสร้างตะกอน (Coagulant)	29
2.7.4 สารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid)	33
2.7.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)	36
2.8 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)	37
2.8.1 หลักการของการดูดซับ	37
2.8.2 กลไกของการดูดซับ	37
2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	38
2.8.4 วัสดุดูดซับ	40
2.8.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาของการดูดซับ	43
2.8.6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ	44
2.9 การดูดซับโดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์	46
2.9.1 ความสามารถในการบำบัดกรดฮาโลอะซีติกของชุดทดลองแบบคอลัมน์	46
2.10 สรุปปริทัศน์วรรณกรรม	47
3 วิธีดำเนินการวิจัย	49
3.1 รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง	49
3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	50
3.2.1 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง	50
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	50

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	52
3.3.1 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำเบื้องต้นของระบบการผลิตน้ำประปา.....	53
3.3.2 การทดลองแบบทีละเท (Batch test)	56
3.3.3 การดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test).....	65
3.4 ดัชนีคุณภาพน้ำ และวิธีการวิเคราะห์.....	70
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล	72
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล	74
4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา	74
4.1.1 คุณลักษณะของน้ำดิบผลิตน้ำประปา	74
4.1.2 คุณลักษณะของน้ำประปา	76
4.2 ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test)	84
4.2.1 ผลการศึกษาของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	84
4.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของ สารคลอรีน และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิติก.....	88
4.2.3 ผลการศึกษาจนผลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซิติก.....	92
4.2.4 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก	96
4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test)	99
4.3.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด กรดฮาโลอะซิติก.	99
4.3.2 ผลการศึกษาชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัด กรดฮาโลอะซิติก	101
4.3.3 ผลการศึกษากราฟเบรกทู (Breakthrough curve) ของการดูดซับ กรดฮาโลอะซิติก.	103
4.4 การนำผลการวิจัยเบื้องต้นประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา.....	107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	110
5.1	สรุปผลการศึกษา	110
5.1.1	คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา.....	110
5.1.2	ผลการศึกษการทดลองแบบทีละเท (Batch test).....	111
5.1.3	ผลการศึกษการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test)	112
5.1.4	การนำผลการวิจัยเบื้องต้นประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา.....	114
5.2	ข้อจำกัด/ ข้อควรระวังในการศึกษา	114
5.3	ข้อเสนอแนะ	115
5.3.1	ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย	115
5.3.2	ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป	115
	รายการอ้างอิง	116
	ภาคผนวก.....	124
	ภาคผนวก ก. วิธีวิเคราะห์หัตถ์ชนิคุณภาพน้ำ.....	124
	ภาคผนวก ข. กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซีติก	127
	ภาคผนวก ค. คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปาที่ศึกษา.....	132
	ภาคผนวก ง. ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test).....	138
	ภาคผนวก จ. ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test)	145
	ภาคผนวก ฉ. การคำนวณความสามารถบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์	150
	ภาคผนวก ช. การคำนวณค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย.....	155
	ภาคผนวก ซ. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	160
	ภาคผนวก ฌ. สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนที่ศึกษา	166
	ภาคผนวก ฎ. งบประมาณการดำเนินงานวิจัย	169
	ประวัติผู้เขียน	171

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทั่วไป.....13
2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง HOCI กับ OCI ในแต่ละระดับพีเอช.....15
2.3	สมบัติทางกายและเคมีของกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิด.....21
2.4	ศักยภาพของการก่อกัมเริงของกรดฮาโลอะซิติก.....22
2.5	เกณฑ์มาตรฐานกรดฮาโลอะซิติกในน้ำประปาที่แต่ละหน่วยงานกำหนดไว้.....23
2.6	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละกระบวนการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก.....27
2.7	การศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา.....32
2.8	การศึกษาประสิทธิภาพของสารช่วยสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา.....35
2.9	การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการดูดซับมลสารแต่ละชนิด.....42
3.1	สรุปสถานที่และจุดเก็บตัวอย่างน้ำ.....54
3.2	ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน PACI และความเข้มข้นของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer.....58
3.3	วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำในแต่ละดัชนีคุณภาพน้ำ.....70
3.4	สถานะการวิเคราะห์กรดฮาโลอะซิติกโดยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer71
3.5	วิธีการเก็บรักษาตัวอย่าง71
4.1	คุณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา.....75
4.2	ค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซิติก95
4.3	ค่าตัวแปรต่างๆ ของไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนด์ลิช98
4.4	ค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 พื้นที่ใต้กราฟของกรดฮาโลอะซิดิกแต่ละชนิดตามความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานของกรดฮาโลอะซิดิก	128
ค.1 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	133
ค.2 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด.....	134
ค.3 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรงกา	134
ค.4 ผลการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	135
ค.5 ผลการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี	136
ค.6 ผลการวิเคราะห์หากรดฮาโลอะซิดิกจากน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	136
ค.7 ผลการวิเคราะห์หากรดฮาโลอะซิดิกจากน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี.....	137
ง.1 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดความขุ่น	139
ง.2 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ	140
ง.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน	และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิดิก.....142
ง.4 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก	143
ง.5 ผลของการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก	144
จ.1 ผลของการศึกษาอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง	146
จ.2 ผลของการศึกษาอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง.....	146
จ.3 ผลของการศึกษาชั้นความสูง 10 เซนติเมตร ของตัวกลางดูดซับในคอลัมน์.....	147
จ.4 ผลของการศึกษาชั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร ของตัวกลางดูดซับในคอลัมน์.....	148
จ.5 ผลของการศึกษากราฟเบรกทู (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก	148
ฉ.1 การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก	152
ช.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ANOVA Test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นและสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	161

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ช.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ Tukey ทดสอบประสิทธิภาพกำจัดความชุ่ม และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน	164
ฅ.1 สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนการศึกษา	167
ญ.1 งบประมาณของการวิจัย	170



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการผลิตน้ำประปา.....8
2.2	องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำผิวดิน.....11
2.3	โครงสร้างของสารประกอบฮิวมิก.....11
2.4	การกระจาย HOCl และ OCl ⁻ ในน้ำที่พีเอชต่างๆ.....14
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และ สารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ.....16
2.6	รูปแสดงการเกิด Breakpoint chlorination.....18
2.7	โครงสร้างของปฏิกิริยาการเกิดกรดฮาโลอะซิติก.....19
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติกกับปริมาณคลอรีน ที่ทำปฏิกิริยา.....24
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติกกับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา.....25
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติกกับพีเอชที่ทำปฏิกิริยา.....26
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกรดไดคัลอโรอะซิติกและกรดไตรคัลอโรอะซิติกกับอุณหภูมิ.....26
2.12	โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACl และ Alum.....31
2.13	กราฟเบรกทู (Breakthrough curve).....47
3.1	ขั้นตอนในการศึกษา.....52
3.2	แผนผังขั้นตอนกระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์และการใช้สารคลอรีน ในการฆ่าเชื้อโรค.....60
3.3	แผนผังขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและการศึกษา ไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก.....64
3.4	ชุดทดลองแบบคอลัมน์.....65
3.5	แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test).....69
4.1	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติกในน้ำประปาแต่ละ สถานที่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำประปาแต่ละสถานที่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	78
4.3 ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มของกรดฮาโลอะซีติกในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โลกกรวด.....	79
4.4 ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โลกกรวด.....	80
4.5 ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มของกรดฮาโลอะซีติกในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา.....	81
4.6 ความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิต น้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา.....	82
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ DOC ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	87
4.8 การเปรียบเทียบระดับความขุ่นกับการเกิดกรดฮาโลอะซีติก.....	89
4.9 การเปรียบเทียบระดับสารอินทรีย์ละลายน้ำกับการเกิดกรดฮาโลอะซีติก.....	89
4.10 การเกิดกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาและน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	90
4.11 การเปรียบเทียบการเกิดกรดฮาโลอะซีติกกับคลอรีนอิสระคงค้างในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	91
4.12 การเกิดกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน.....	92
4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut activated shell carbon.....	93
4.14 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน.....	94
4.15 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน.....	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	จดนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซิดิกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน.....95
4.17	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก.....97
4.18	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชของการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิก.....97
4.19	ไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิดิกวิเคราะห์ด้วยสมการแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิช.....98
4.20	การติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์.....99
4.21	ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซิดิกที่อัตราการไหล 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง.... 101
4.22	ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซิดิกในแต่ละชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon102
4.23	ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซิดิกที่อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง และความสูง 15 เซนติเมตร ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ชนิด Coconut shell activated carbon104
4.24	รูปเบรกทรูแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิดิก...105
4.25	รูปเบรกทรูแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิดิก..106
ข.1	รูปมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิดิก.....129
ฉ.1	การคำนวณจากรูปเบรกทรูระหว่างปริมาณน้ำกับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิดิก.....151
ฉ.2	การคำนวณจากรูปเบรกทรูระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิดิก.....153
ช.1	ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....156

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มก./ล.	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
มล.	=	มิลลิลิตร
ไมโครกรัม/ล.	=	ไมโครกรัมต่อลิตร
Alum	=	Aluminium sulphate
DBPs	=	Disinfection by Products
DOC	=	Dissolve Organic Carbon
DCAA	=	Dichloroacetic acid
DBAA	=	Dibromoacetic acid
FeCl ₃	=	Ferric chloride
GAC	=	Granular activated carbon
HAAs	=	Haloacetic Acids
MBAA	=	Monobromoacetic acid
MCAA	=	Monochloroacetic acid
MCLs	=	Maximum Contaminate Levels
ml	=	มิลลิลิตร
mg	=	มิลลิกรัม
mg/L	=	มิลลิกรัมต่อลิตร
NOMs	=	Natural Organic Matters
NTU	=	Nephelometric Turbidity Unit
PAC	=	Powder activated carbon
PACl	=	Polyaluminum chloride
pH	=	ค่าความเป็นกรด-ด่าง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

THMs	=	Trihalomethanes
TCAA	=	Trichloroacetic acid
UV ₂₅₄	=	การดูดซับที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร
%	=	ร้อยละ
µg/L	=	ไมโครกรัมต่อลิตร



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำนับเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งต่อสิ่งมีชีวิต การใช้น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อการอุปโภคบริโภคในอดีตไม่พบปัญหาคุณภาพน้ำมากนักเพียงอาศัยการปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างง่าย เช่น การกวนด้วยสารส้มและปล่อยให้ตกตะกอนเอง หรือนำไปต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรค ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการนำน้ำไปใช้ ในปัจจุบันแหล่งน้ำธรรมชาติทั่วไปมีการปนเปื้อนสิ่งสกปรกต่างๆ ทำให้มีคุณภาพน้ำเสื่อมโทรมลง การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบผลิตน้ำประปาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งคุณภาพน้ำที่ดีต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่สะอาดและปลอดภัย ปราศจากการปนเปื้อนของสารพิษและเชื้อโรคจึงจะสามารถนำไปใช้อุปโภคบริโภคได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภค

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแหล่งน้ำผิวดินที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปามีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters: NOMs) อยู่ในช่วง 1.20 - 10.60 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hong et al., 2013) โดยประกอบด้วยสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์ (มันสีน คัดณฑลเวศม์, 2545) โดยระบบผลิตน้ำประปาของประเทศไทยร้อยละ 70 เป็นระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน (กรมทรัพยากรน้ำ, 2548) ซึ่งระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านส่วนใหญ่มีขั้นตอนการผลิตน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสี ความขุ่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ สารแขวนลอยในน้ำโดยใช้กระบวนการสร้างตะกอน-รวมตะกอน (Coagulation-flocculation process) (Pentamwa et al., 2013) และเพื่อลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในน้ำซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้อุปโภคบริโภคในกระบวนการผลิตน้ำประปาจึงมีการเติมสารคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคเนื่องจากคลอรีนเป็นสารเคมีที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะดวกต่อการใช้ หาซื้อง่าย และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น อย่างไรก็ตามวิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนกลับทำให้เกิดสารตกค้างประเภทต่างๆ เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารคลอรีนในรูป HOCl และ OCl⁻ ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOMs) เช่น สารฮิวมิก เป็นต้น (มันสีน คัดณฑลเวศม์, 2537) ทำให้เกิดสร้างสารกลุ่มที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็ง คือ สารอินทรีย์ฮาโลเจน (Halogenated organic by-products) ซึ่งสารเคมีกลุ่มใหญ่ที่เกิดในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคนี้ คือ สารไตรฮาโลมีเทน (THMs) รองลงมา คือ

กลุ่มกรดฮาโลอะซีติก (HAAs) (US.EPA., 2012; มัลลิกา ปัญญาคะโป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี, 2550) HAAs เป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และกลายเป็นไอได้น้อย สามารถละลายในน้ำได้ดีและค่อนข้างเสถียร ซึ่ง HAAs มีทั้งหมด 9 ชนิด (HAA₉) แต่มี 5 ชนิด (HAA₅) ที่มีการออกกฎหมายควบคุมในน้ำดื่มเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA) และกรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA) (Harman et al., 2011; ชุติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) HAAs เป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง ได้แก่ มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ และมะเร็งลำไส้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อหญิงมีครรภ์ ซึ่งหากหญิงมีครรภ์ได้รับ HAAs เข้าสู่ร่างกายอาจทำให้เกิดภาวะผิดปกติต่อทารกในครรภ์ได้ นอกจากนี้ที่กล่าวมาแล้วนั้นความเป็นพิษของ HAAs ยังส่งผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ การคลอโรระบบไหลเวียนโลหิต ระบบประสาท และอาจส่งผลกระทบต่ออวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต เป็นต้น (Nikolaou et al., 2004; WHO, 2006) ความเป็นพิษดังกล่าวองค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานไว้ไม่เกิน 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (US.EPA., 2012) และองค์การอนามัยโลกได้กำหนดมาตรฐานของ MCAA DCAA และ TCAA ไว้ไม่เกิน 20 50 และ 200 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (WHO, 2006) และจากการตรวจวัดคุณภาพน้ำประปาในจังหวัดมหาสารคามพบค่าการปนเปื้อนของ HAAs ถึง 39.37 ไมโครกรัมต่อลิตร (Uansiri, 2009) นอกจากนี้ที่เมืองอาลากันต์ ประเทศสเปนพบ HAAs ปนเปื้อนในน้ำดื่มถึง 50.41 ไมโครกรัมต่อลิตร (Villanueva et al., 2003) ดังนั้นวิธีการกำจัด HAAs ในน้ำประปาเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งเทคโนโลยีในปัจจุบันนี้มีหลายวิธี เช่น การกำจัดด้วยวิธีสร้างตะกอนและรวมตะกอนสามารถกำจัด HAAs ได้ในช่วงร้อยละ 27 - 58 (Chuang et al., 2011; Metcalfe et al., 2015) การกำจัดด้วยโอโซนสามารถกำจัด HAAs ได้ในช่วงร้อยละ 20 - 37 (Guay et al., 2005; Ratasuk et al., 2008) หรือการกำจัดด้วยการดูดซับก็สามารถกำจัด HAAs ได้ร้อยละ 94 (Babi et al., 2007) เป็นต้น โดยการกำจัด HAAs ในแต่ละวิธีมีประสิทธิภาพในการกำจัดแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม HAAs ในน้ำประปาไม่สามารถกำจัดได้หมดด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2537) เพียงอย่างเดียว การหาวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการกำจัด HAAs ร่วมกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยวิธีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ วิธีการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของวัสดุดูดซับด้วย ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการดูดซับอาจเป็นวัสดุที่มีโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิวดูดซับที่เหมาะสม เช่น ซีโอไลต์ (Zeolite) ซิลิกา (Silica) อะลูมินา (Activated alumina) หรือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นต้น (ชัยยศ ตั้งสฤตย์กุลชัย, 2554) โดยพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัด NOMs ในน้ำได้

ร้อยละ 98 (ภูวดล ศิริสินเลิศ, 2552) และสามารถกำจัดสาร N-Nitrosodimethylamine ได้มากกว่าร้อยละ 60 (Hanigan et al.,2012; Sacher et al.,2008) ซึ่งวิธีการนี้สามารถทำได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดต่ำ ดังนั้นการศึกษาวิจัยนี้จึงทำการศึกษากำจัด HAAs ในน้ำประปา ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัด HAAs ทั้ง 5 ชนิด ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และเป็นทางเลือกในนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงระบบผลิตน้ำประปาให้ดีขึ้นเพื่อลดความเสี่ยงต่อการได้รับสารก่อมะเร็งในน้ำประปา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปริมาณของสารสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก (HAA₅) บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดกรดฮาโลอะซีติก (HAA₅) ในชุดทดลองแบบคอลัมน์ (Column test) ที่มีถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเป็นตัวกลางดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1.3.1 การศึกษานี้ศึกษาเฉพาะระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่มีกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน โดยการใช้แหล่งน้ำดิบประเภทผิวดิน สารสร้างตะกอน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารคลอรีน เนื่องจากระบบผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ของประเทศไทยร้อยละ 70 เป็นระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่มีกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (กรมทรัพยากรน้ำ, 2548)

1.3.2 การศึกษานี้ทำการศึกษาคูณภาพน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาโดยใช้ตัวอย่างน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด หมู่บ้านหนองรังกา และทำการศึกษาคูณภาพน้ำประปาโดยใช้ตัวอย่างน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา คือ น้ำประปาจากหมู่บ้านโคกกรวด และน้ำประปาจากหมู่บ้านหนองรังกา

1.3.3 การศึกษานี้ใช้สารโพลีออลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นสารสร้างตะกอน ใช้สาร Cationic polymer ที่ใช้เป็นสารช่วยสร้างตะกอน ใช้คลอรีนชนิดเกิดเพิ่มความเข้มข้นร้อยละ 60 เป็นสารฆ่าเชื้อโรค และวัสดุตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการดูดซับประกอบด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกิดชนิด Coconut shell activated carbon และใช้น้ำตัวอย่าง HAA₅ สังเคราะห์ เตรียมจากสารละลาย HAAs มาตรฐาน (Standard mixtures of HAAs) ผลิตภัณฑ์ Supelco โดยใช้น้ำกลั่นซึ่งมีสารละลายผสมของ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA ที่ความเข้มข้น 25 30 50 60 75 100 200 และ 300 ไมโครกรัมต่อลิตร (Ratasuk et al., 2008; Uansiri, 2009; ชุติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) และน้ำตัวอย่างที่ผ่านจากกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน โดยมีการใช้สารคลอรีนที่ทำให้เกิด HAA₅ ของการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

1.3.4 การศึกษาคุณลักษณะของน้ำในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ความขุ่น สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolve Organic Carbon: DOC) คลอรีนอิสระคงค้าง และ HAA₅ ตามลำดับ และคุณลักษณะของน้ำจากกระบวนการดูดซับพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำ คือ HAA₅

1.3.5 การศึกษานี้ทำการทดลองและวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำที่อาคารปฏิบัติการพื้นฐาน วิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และ เทคโนโลยีการเกษตร (F10) และอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในช่วงเดือนเมษายน - เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2560

1.4 สมมติฐานของการวิจัย

1.4.1 การใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACl ที่ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนสามารถลดความขุ่น และ NOMs ในรูปของ DOC ในน้ำดิบ (น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระ) สำหรับการผลิตน้ำประปาได้

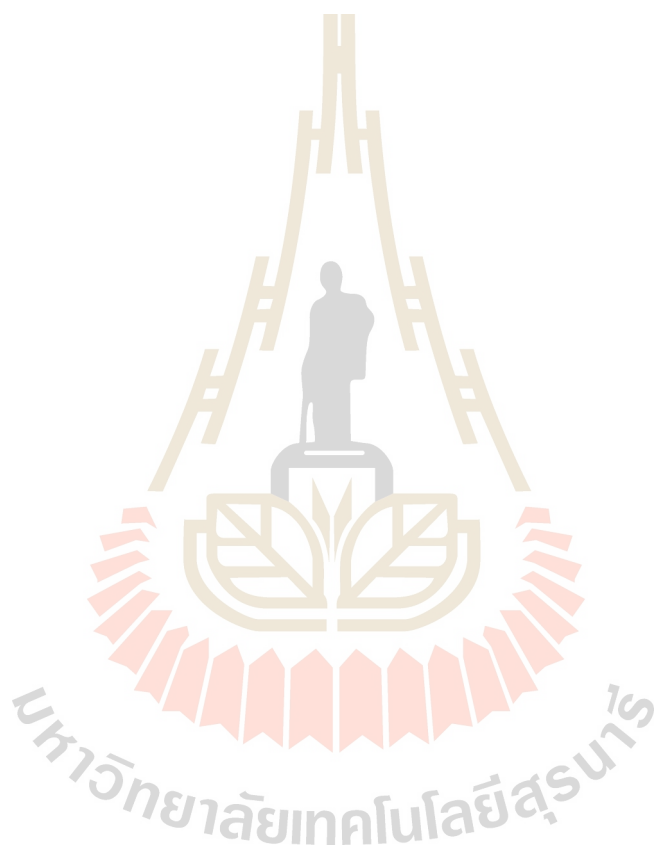
1.4.2 การใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACl ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนสามารถลดการเกิด HAA₅ ในน้ำประปาได้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทราบข้อมูลระดับการปนเปื้อน HAA₅ ในน้ำประปา

1.5.2 ทราบปัจจัยที่ทำให้เกิด HAA₅ ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

1.5.3 ทราบกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่สามารถนำไปใช้แทนหรือควบคู่กับกระบวนการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันอาจทดแทนในบางขั้นตอนหรือทั้งกระบวนการผลิตเพื่อลดการเกิด HAA₅ ในน้ำประปาอันจะเป็นการลดความเสี่ยงของสารนี้ที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แต่น้ำที่มนุษย์สามารถนำไปใช้อุปโภคบริโภคได้นั้นควรมีความสะอาดปราศจากสิ่งเจือปนทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยแหล่งน้ำในธรรมชาติอาจมีสิ่งเจือปนทั้งที่มองเห็นและมองไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่า ระบบการผลิตน้ำประปาจึงมีความสำคัญในการทำให้คุณภาพน้ำมีความสะอาดปลอดภัยเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยมีหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการศึกษามีดังนี้

- 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (Water treatment processes)
- 2.2 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs)
- 2.3 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)
- 2.4 กลไกการเกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs)
- 2.5 กรดฮาโลอะซิติก (HAAs)
- 2.6 กระบวนการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก
- 2.7 กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation process)
- 2.8 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)
- 2.9 การดูดซับโดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์
- 2.10 สรุปปริทัศน์วรรณกรรม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (Water treatment processes)

โดยทั่วไปแล้วความจำเป็นของระบบทำความสะอาดน้ำประปาขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบ และของน้ำประปาที่ต้องการ กระบวนการทำความสะอาดน้ำประปา อาจแบ่งออกอย่างง่าย ๆ ได้เป็น 3 ประเภทคือ ประเภทที่กำจัดสารแขวนลอย ได้แก่กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการกรองน้ำ (Filtration) ประเภทที่กำจัดสารละลาย ได้แก่กระบวนการตกผลึก (Precipitation) การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น ส่วน

ประเภทสุดท้ายคือการฆ่าเชื้อโรคกระบวนการนี้ถือเป็นกระบวนการที่ต้องมีเสมอไม่ว่าการทำความสะอาดน้ำประปาจะเป็นแบบใดก็ตาม (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2537) ดังนั้นน้ำประปาจึงเป็นน้ำที่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ โดยใช้น้ำดิบจากแหล่งต่างๆ มาเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปา เช่น น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน เพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพได้มาตรฐาน รวมทั้งมีความปลอดภัยในการนำมาใช้ อุปโภคบริโภค (ประพัฒน์ เป็นตาวา, 2555; ราชัน ชีระพิทยาตระกูล, 2545) กระบวนการผลิตน้ำประปาแสดงผังรูปที่ 2.1 และมีรายละเอียดมีดังนี้

1. การสูบน้ำ การผลิตน้ำประปาเริ่มจากโรงสูบน้ำแรงต่ำทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติเพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องเป็นน้ำที่ไม่เสีย ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส หรือมีสารปนเปื้อนเกินกว่าที่กำหนดและต้องมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมาผลิตน้ำประปาได้อย่างต่อเนื่อง

2. การสร้างและรวมตะกอน การสร้างตะกอนทำให้อนุภาคความขุ่นของน้ำสูญเสียเสถียรภาพและจับตัวกับกับสารสร้างตะกอน (Coagulant) เกิดเป็นเม็ดตะกอน (Floc) ขนาดเล็กและรวมตัวกันจนเป็นตะกอนที่โตพอจะถูกกำจัดออกจากน้ำได้ง่าย น้ำดิบที่สูบน้ำเข้ามาแล้วจะนำมาผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาวเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ สารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการรวมตะกอนและสารละลายปูนขาวจะช่วยปรับความเป็นด่างรวมทั้งยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ

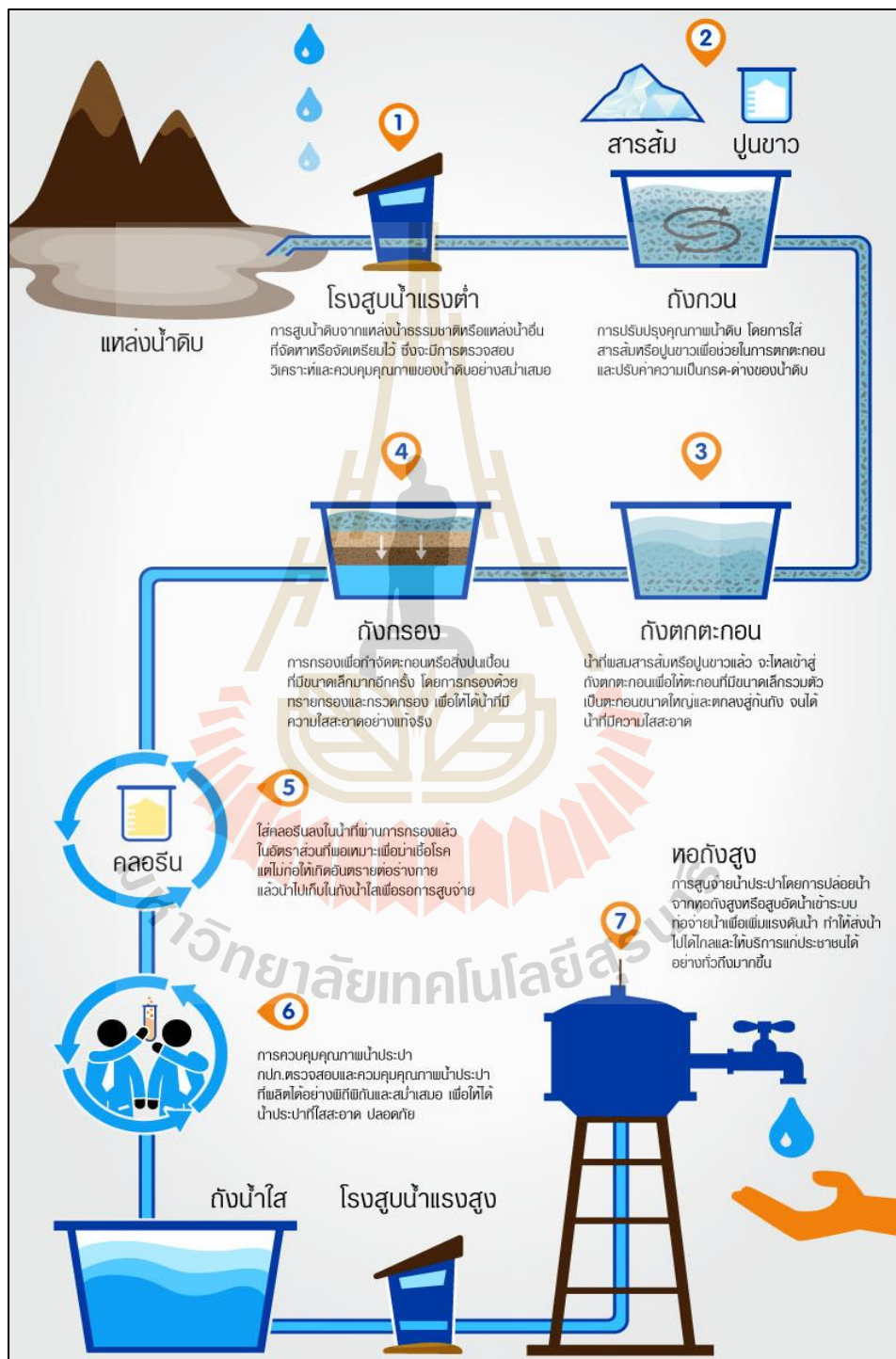
3. การตกตะกอน ขั้นตอนนี้จะนำน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนแล้วเข้าสู่ถังตกตะกอนทำให้ตะกอนตกลงสู่ก้นถังและถูกดูดทิ้ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำซึ่งต้องควบคุมอัตราการไหลให้ค่อยๆตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก และเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4. การกรอง เป็นด่านสุดท้ายที่กรองน้ำให้ใสถึงกรองจะต้องมีการล้างหน้าทรายกรองอยู่เสมอ โดยถึงกรองใช้ตัวกลางต่างๆ เช่น ทราย ถ่านแอนทราไซต์ เพื่อการกรองตะกอนที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ น้ำที่ผ่านการกรองจะมีความขุ่นเหลืออยู่ประมาณ 0.20 - 2 NTU

5. การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่ผ่านการกรองแล้วอาจมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่ จึงจะต้องทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารฆ่าเชื้อโรค เช่น สารคลอรีน น้ำที่ผสมคลอรีนแล้วเรียกว่า น้ำประปา จะจับเก็บไว้ในถังขนาดใหญ่ เรียกว่า ถังน้ำใส และสามารถนำมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคได้

6. การควบคุมคุณภาพน้ำประปา ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะน้ำประปาที่ทำการผลิตมาแล้วนั้นจะต้องตรวจสอบคุณภาพเพื่อให้ได้น้ำประปาที่ปลอดภัยสำหรับการอุปโภคบริโภค โดยต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

7. การสูบน้ำง่าย น้ำที่ผ่านจากการควบคุมคุณภาพจะเก็บในถังสำหรับเก็บน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองแล้วที่เรียกว่าถังน้ำใส และหอถังสูงที่เก็บน้ำจะสูบน้ำขึ้นมาจากถังน้ำใส เพื่อทำให้เกิดแรงดันน้ำในการจ่ายน้ำให้บริการไปตามเส้นท่อถึงบ้านผู้อุปโภคและผู้บริโภค



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2553)

2.2 สารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs)

สารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters: NOMs) เกิดจากการเจริญเติบโตหรือการเน่าเปื่อยของพืช และเกิดจากกระบวนการสลายตัวของจุลินทรีย์ต่างๆ (Matilainen et al., 2010) สิ่งปฏิกูลจากการเลี้ยงสัตว์ รวมถึงการทำลายป่าไม้ทำให้สารอินทรีย์ในดินถูกน้ำชะล้างลงสู่แหล่งน้ำมากขึ้น ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีมากเกินไปทำให้ออกซิเจนละลายน้ำในธรรมชาติมีไม่พอเพียงเกิดสภาวะขาดอากาศซึ่งมีผลทำให้เกิดการเน่าเหม็นของแหล่งน้ำ และการเสียชีวิตของสัตว์น้ำต่างๆ ที่ขาดออกซิเจน โดยพบว่าสิ่งปนเปื้อนในน้ำ ยังเกิดจากสิ่งสกปรกที่แขวนลอยในน้ำ (Suspended Impurities) ได้แก่ อนุภาคของดินขนาดต่างๆ แร่ธาตุ (Mineral Matter) สารอินทรีย์ (Organic Matter) สาหร่าย (Algae) โปรโตซัว (Protozoa) และแบคทีเรีย (Bacteria) ซึ่งรวมทั้งชนิดที่ทำให้เกิดโรคและชนิดที่ไม่ทำให้เกิดโรค (Pathogenic and Non-pathogenic Bacteria) สารเหล่านี้จะทำให้ให้น้ำมีสี กลิ่นและความขุ่นสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำ (Dissolved Impurities) ได้แก่ แก๊สต่างๆ เช่น ออกซิเจน (Oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) แอมโมเนีย (Ammonia) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide) มีเทน (Methane) คลอไรด์ (Chloride) ไนไตรต์ (Nitrite) ไนเตรต (Nitrate) เป็นต้น ส่วนสารคอลลอยด์ในน้ำ (Colloidal Impurities) ได้แก่ อนุภาคที่เล็กที่สุดของซิลิกาและอินทรีย์วัตถุที่เน่าเปื่อย (Organic Matter) ซึ่งอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่ไม่ตกตะกอน (Colloidal or Pseudo Solution) (สุกุลยา ทับอุไร, 2554)

2.2.1 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

สารอินทรีย์ในน้ำมีบทบาทสำคัญในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (มันสิน ตันทุพลเวศม์, 2545) โดยทั่วไปสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1. สารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรีย์สาร ซากพืชซากสัตว์ในน้ำธรรมชาติที่เรียกว่า Natural Organic Matters (NOMs) เกิดเป็นสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจนสามารถละลายน้ำได้ เช่น สารกลุ่มฮิวมิก (Humic Acid) และฟุลวิก (Fulvic Acid) ซึ่งสารทั้งสองนี้ยังมีส่วนทำให้เกิดสีในน้ำ (สีน้ำตาลอ่อนหรือสีชา)
2. สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นด้วยจุลินทรีย์ ประกอบด้วยโปรโตซัว แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่ายเซลล์เดียว สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นนี้อาจละลายปนเปื้อนมากับน้ำโดยตรง หรือเกิดจากซากจุลินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ภายในเซลล์ละลายปนมากับน้ำตัวอย่าง เช่น สารกลุ่มไมโครซิสติน (Microcystin) ที่เกิดจากสาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว Microcystin Aeruginosa ซึ่งสารกลุ่มนี้บางตัวเป็นสารพิษ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียวชื่อ

โอซีลลาโตเรียลิโมซา (Oscillatoria Limosa) จะผลิตสารกลุ่มที่เกิดจากการเผาผลาญในเซลล์ของสาร Methylisomeol ซึ่งเป็นสารที่ทำให้น้ำมีกลิ่นไม่พึงประสงค์เป็นต้น

3. สารอินทรีย์ที่เกิดจากน้ำเสียชุมชน กิจกรรมทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ตลอดจนการขับถ่าย ขำระล้างร่างกายของมนุษย์มีส่วนทำให้มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนไปกับน้ำได้ รวมทั้งสารเคมี ยาฆ่าแมลงและปุ๋ย เป็นต้น

4. สารอินทรีย์ที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียและระบบปรับสภาพน้ำ เช่น สารเร่งการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งมักจะมีสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่อาจย่อยสลายได้ ตลอดจนซากจุลินทรีย์หลงเหลือปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านระบบบำบัด เมื่อผ่านระบบการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอาจทำให้สารเหล่านี้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้นได้

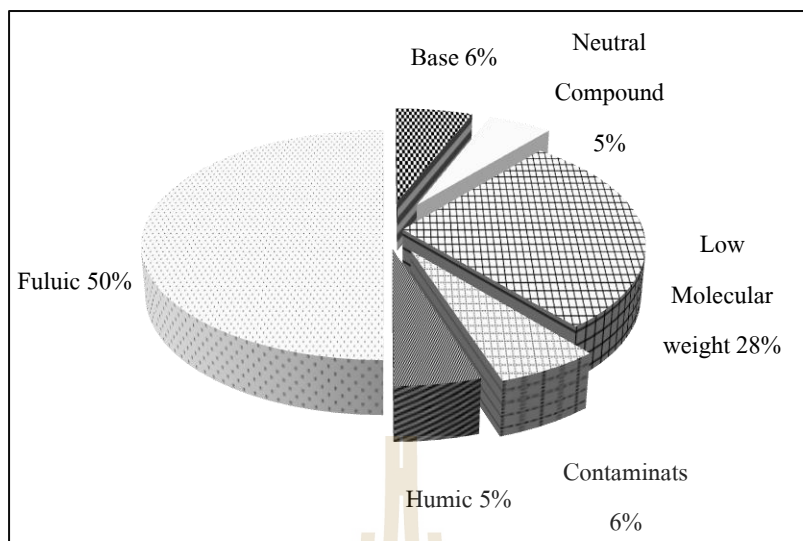
2.2.2 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ธรรมชาติ

โดยทั่วไปสามารถจำแนกสารอินทรีย์ที่อยู่ในแหล่งน้ำดิบ ไว้ดังนี้

1. สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (Dissolve Organic Carbon: DOC) แบ่งได้เป็น Humic Substance (Hydrophobic) เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟูลวิก

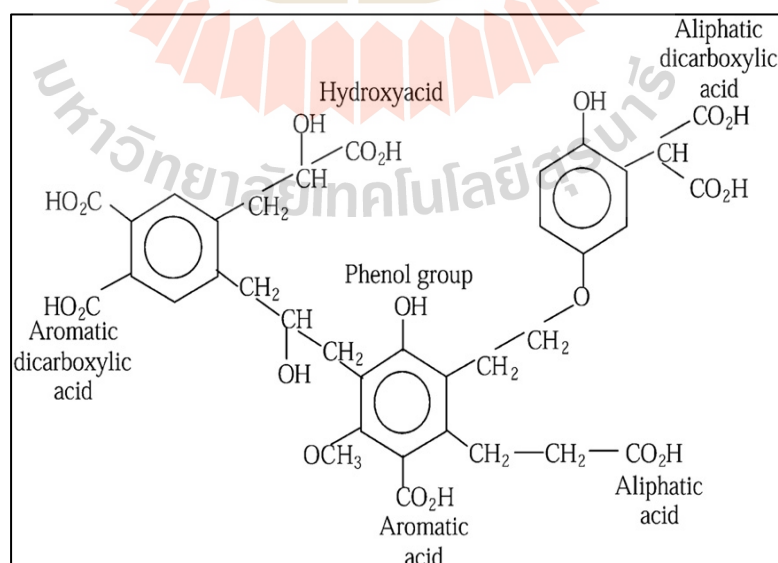
2. สารอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (Particulate Organic Matter: POM) แบ่งได้เป็น Non- Humic Substance เช่น Hydrophilic Proteins Aminoacids Carbohydrate และ Carboxylic acids

โดยกลุ่มสารประกอบฮิวมิก ได้แก่ กรดฮิวมิก และกรดฟูลวิก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติสารประกอบฮิวมิกมากกว่าร้อยละ 50 เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชหรือสัตว์ ถ้าในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของ DOC สูงกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำในแหล่งน้ำนั้นจะมีสี ส่วนที่ไม่ใช่สารประกอบฮิวมิกมีประมาณร้อยละ 35 - 55 (Hong et al., 2013) แสดงดังรูปที่



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำผิวดิน (ปรับปรุงมาจาก สุกุลยา ทับอุไร (2554))

โครงสร้างของสารประกอบฮิวมิกใน NOMs ไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดมีส่วนประกอบที่ซับซ้อนมากมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ส่วนมากมักเป็นโครงสร้างจากการทำนายหรือการตั้งสมมติฐานขึ้น แต่พอสรุปได้ว่าสารประกอบฮิวมิกเป็นโครงสร้างที่มีวงแหวนอะโรมาติกมากและมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เช่น หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล เป็นต้นกลุ่มฟังก์ชันต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อการละลายน้ำของสารประกอบฮิวมิก และเป็นส่วนที่ทำให้ปฏิกิริยากับคลอรีนจนเกิดเป็นสารก่อมะเร็งในน้ำประปา (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545) ตัวอย่าง โครงสร้างสารประกอบฮิวมิกแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของสารประกอบฮิวมิก (Matilainen et al., 2010)

2.2.3 การตรวจวัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ

การตรวจวัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) ในน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและคุณภาพน้ำที่ได้หลังผ่านกระบวนการบำบัด เช่น มีความสำคัญต่อสารที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน และยังพบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มี NOMs หลงเหลืออยู่นั้น เมื่อทำการเติมคลอรีนลงไปจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรคที่เรียกว่า Disinfection by Products (DBPs) ซึ่งจะเปลี่ยนรูปไปเป็น HAAs โดย NOMs ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ NOMs ได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและนิยมใช้ในการวิเคราะห์ คือ การวัดในรูปของสารอินทรีย์ทั้งหมด โดยทั่วไปใช้เป็นตัวชี้วัดแทนเพื่อใช้วัดความเข้มข้นของ NOMs ซึ่ง DOC เป็นการแยกสารอินทรีย์ละลายน้ำออกจากสารแขวนลอยซึ่งวัดในรูปของ DOC และการดูดซับที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สำหรับการวัดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เป็นตัววัดดัชนีของสารที่มีอยู่ในน้ำจะมีความสัมพันธ์ต่อการวัด DOC และเป็นตัวแทนสำหรับการหาค่าสารอินทรีย์ธรรมชาติในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดสารตั้งต้น DBPs ซึ่งก่อให้เกิดสารกลุ่ม HAAs แม้ว่าแนวโน้มส่วนใหญ่ในน้ำจะมีสารประกอบมากมายที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของ NOMs ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง UV_{254} และ DOC จะสามารถบอกรถึงคุณภาพของน้ำได้ โดยน้ำที่มี UV_{254} สูงก็จะมีค่า DOC สูงด้วย (Chow et al., 2004) โดยน้ำมี ค่า UV_{254} สูงจึงมีศักยภาพในการเกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคมามาก (มัลลิกา ปัญญาะโป และ ผ่องศรี เฝ้าภูรี, 2550) ซึ่งการตรวจวัดค่า DOC อาจใช้สมการเส้นตรงในการคำนวณจากการตรวจวัดค่า UV_{254} ได้ ซึ่งสมการต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะของน้ำดิบที่ใกล้เคียงกับการศึกษา เช่น ค่าพีเอช ค่าความขุ่น เป็นต้น เช่นเดียวกับสมการ 2.1 (CBCL limited, 2011; ต่อตระกูล วัฒนารกิจกุล, 2545) และจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในแหล่งน้ำดิบทั่วไปมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำที่นำมาศึกษาแสดงดังตารางที่ 2.1

$$DOC = \frac{UV_{254} + 0.07}{0.045} \quad (2.1)$$

เมื่อ DOC = ค่าสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

UV_{254} = ค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในน้ำ (cm^{-1})

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำทั่วไป

แหล่งน้ำดิบ	คุณลักษณะน้ำดิบ		ที่มา
	DOC (มก./ล.)	UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	
อ่างเก็บน้ำศรีตรัง, สงขลา	4.30	0.098	ทัศนาศึกษา (2553)
อ่างเก็บน้ำสุระ, นครราชสีมา	13.24	0.230	สุกฤษยา ทับอุไร (2554)
Nakdong River, Korea	1.93	0.049	Jung et al. (2008)
Hoedong Reservoir, Korea	1.79	0.028	

2.3 การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Chlorination)

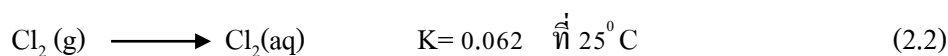
การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนซึ่งเรียกว่า คลอรีเนชัน (Chlorination) หรือการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ (Disinfection) โดยใช้คลอรีนในการเติมในระบบประปา ถือเป็นขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการผลิตน้ำประปา (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) ซึ่งคลอรีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 3 รูปแบบ ได้แก่

1. แก๊สคลอรีน มีการบรรจุในถังขนาด 100 กิโลกรัม 1,000 กิโลกรัม และ 20 - 25 ตัน มีสีเหลืองแกมเขียว มีความหนาแน่นประมาณ 2.5 เท่าของอากาศ
2. สารละลายคลอรีน (NaClO) หรือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ อยู่ในสถานะของเหลวมีสีเขียวทองอ่อน มีความเข้มข้นของคลอรีนร้อยละ 7 - 15 นำไปใช้ได้ง่ายเนื่องจากอยู่ในรูปของเหลวไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการจ่ายผสมกับน้ำ
3. คลอรีนผง (Ca(OCl)₂) มีลักษณะเป็นผง เม็ด หรือเกล็ดสีขาวมีความเข้มข้นร้อยละ 65 - 71 ในการนำมาใช้ต้องนำมาละลายน้ำก่อน คลอรีนรูปนี้สามารถเก็บรักษาได้ง่ายและไม่ทำให้ความเข้มข้นสูญเสียไป

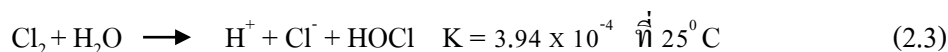
การใช้คลอรีนเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและใช้กันมานาน เนื่องจากราคาถูก มี Oxidizing power สูงทำให้หยุดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียส่วนใหญ่ได้ และคงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคในเส้นท่อได้นาน รวมทั้งง่ายในการจัดหา การวัดและควบคุมปริมาณในการใช้ ได้กำหนดให้มีคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำประปาไว้ไม่ต่ำกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณสูงสุดไม่ควรเกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการใช้คลอรีนฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปาอาจมีข้อด้อยอยู่บ้างคือ ทำให้เกิดกลิ่น และการรวมตัวของคลอรีนกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำธรรมชาติทำให้เกิดสารก่อมะเร็งขึ้น (ประพัฒน์ เป็นตามวา, 2555)

2.3.1 ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ

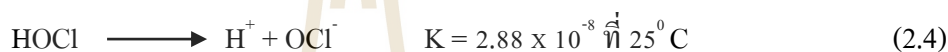
สมการสมดุลคลอรีนแก๊ส ($\text{Cl}_2(\text{g})$) และรูปของเหลว ($\text{Cl}_2(\text{aq})$)



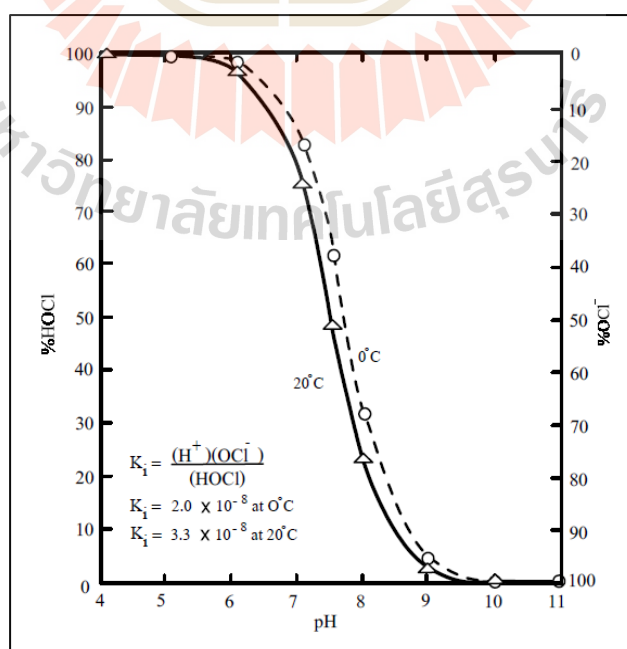
เมื่อมีการเติมแก๊สคลอรีนลงไปใต้น้ำบริสุทธิ์จะมีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วดังนี้



กรดเกลือ (HCl) สามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์กลายเป็น H^+ และ Cl^- แต่กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) เป็นกรดอ่อนแตกตัวได้เป็นบางส่วน



ด้วยเหตุนี้ในน้ำจึงมีคลอรีนที่อยู่ในรูปกรดเกลือที่แตกตัว HOCl, OCl^- และมีแก๊สคลอรีนเหลืออยู่ในรูปอิสระบ้างเล็กน้อย กรดที่เกิดขึ้นทำให้ค่าพีเอชของน้ำมีค่าลดลง แต่ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคลดลง HOCl และ OCl^- รวมเรียกว่า คลอรีนอิสระ (Free available chlorine) ซึ่งฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ระดับการแตกตัวเป็นไอออนของกรดไฮโปคลอรัสขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าถ้าค่าพีเอชต่ำ น้ำจะมี HOCl มาก ถ้าน้ำมีค่าพีเอชสูง จะมี OCl^- มาก



รูปที่ 2.4 การกระจาย HOCl และ OCl^- ในน้ำที่พีเอชต่างๆ (มันสัน คณิตกุลเวศม์, 2542)

แต่เนื่องจาก HOCl มีอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่า OCl⁻ หลายเท่า การทำคลอรีนชั้น ที่พีเอชต่ำได้ผลมากกว่าที่พีเอชสูง เหตุผล เพราะว่า HOCl มี Oxidizing power สูงกว่า OCl⁻ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง HOCl กับ OCl⁻ ในแต่ละระดับพีเอช

pH	HOCl (%)	OCl ⁻ (%)
6	96.80	3.20
7	75.20	24.80
7.50	49.10	50.90
8	23.20	76.80
9	2.90	97.10

ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์ (2541)

เนื่องจาก OCl⁻ มีประจุลบทำให้ไม่เป็นที่ต้องการของ Cell ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน HOCl ไม่มีประจุจึงสามารถสัมผัสกับ Cell ได้ง่ายกว่าเพราะไม่ถูกผลักการเติมสารประกอบคลอรีน เช่น แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ (Ca(OCl)₂) ให้กับน้ำบริสุทธิ์ จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังนี้



จะเห็นว่ามีคลอรีนอิสระ HOCl OCl⁻ เกิดขึ้นทั้งสองตัว เช่นเดียวกับกรณีการเติมแก๊สคลอรีนให้กับน้ำ แตกต่างกันว่า (Ca(OCl)₂) ทำให้น้ำมีค่าพีเอชสูงขึ้น แต่ Cl₂(g) ทำให้น้ำมีค่าพีเอชของน้ำลดลง

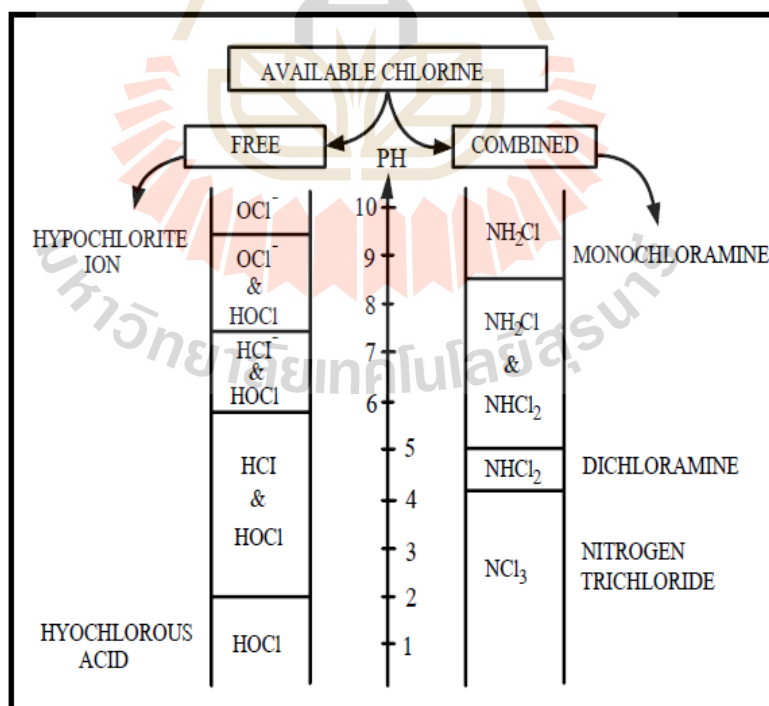
ในกรณีที่น้ำมีสารละลายหรือตะกอนแขวนลอย ปฏิกิริยาของคลอรีนจะมีเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลอรีนสามารถทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ได้แทบทุกชนิดสารประกอบที่ควรพิจารณา คือ แอมโมเนีย (NH₃) เมื่อเติมคลอรีน หรือสารประกอบของคลอรีนให้กับน้ำที่มี NH₃ (มีอยู่เองหรือเติมลงไป) กรดไฮโปคลอรัสจะทำปฏิกิริยากับ NH₃ ทำให้เกิดสารประกอบโมโนคลอรามิน (NH₂Cl) ไดคลอรามิน (NHCl₂) และไตรคลอรามิน (NCl₃) ดังนี้



อัตราส่วนระหว่างสารคลอรามินทั้งสามชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำปฏิกิริยาทั้งคู่ และพีเอชเมื่ออัตราส่วนของจำนวนโมลระหว่างคลอรีนและแอมโมเนียไม่เกิน 1:1 NHCl_2 จะเกิดขึ้นได้ ทั้งคู่ อย่างไรก็ตามปริมาณของสารทั้งสองขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังนี้



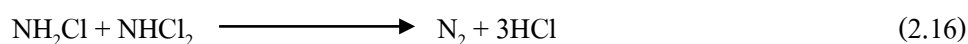
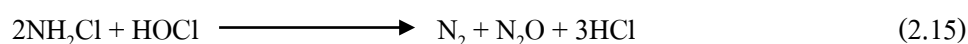
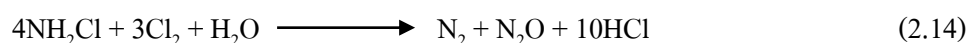
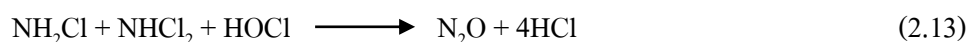
เมื่อพีเอชต่ำ จะมีสาร NHCl_2 มาก แต่ถ้าพีเอชสูงจะมีสาร NH_2Cl มากกว่า ดังรูปที่ 2.5 เมื่ออัตราส่วนระหว่างคลอรีนและ NH_3 สูงกว่า 1:1 จะมี NCl_3 เกิดขึ้น สำหรับในน้ำที่มีอยู่เล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนระหว่างคลอรีนและ $\text{NH}_3 = 2 : 1$ จะได้ N_2O เกิดขึ้น



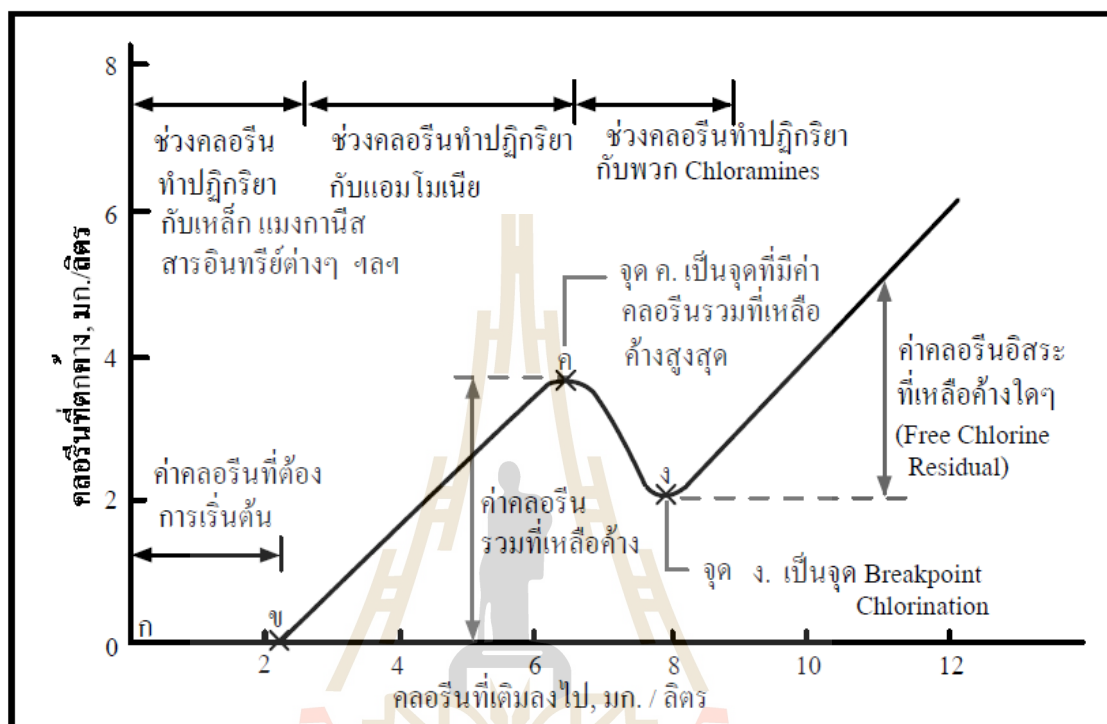
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและสารประกอบคลอรีนชนิดต่างๆ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

สารประกอบคลอรามินทั้งสามชนิด รวมเรียกว่า คลอรีนรวม (Combined available chlorine) ซึ่งมีอำนาจในการฆ่าเชื้อต่ำกว่าคลอรีนอิสระมาก แต่มีข้อดีคือ สามารถคงตัวอยู่ในน้ำได้นานกว่าคลอรีนอิสระทำให้มีอำนาจการฆ่าเชื้ออยู่ได้นานๆ จึงเหมาะสมสำหรับใช้ในระบบท่อส่งน้ำเพื่อให้มีคลอรีนตกค้างจนถึงมือผู้ใช้น้ำ อีกประการหนึ่งคือ มีอำนาจในการฆ่าเชื้อโรคที่พิเศษมากกว่า 10 ใด้ต่ำกว่าคลอรีนอิสระ

การฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยคลอรีนจะได้ผลอย่างแน่นอนก็ต่อเมื่อการเติมคลอรีนจนกระทั่งมีคลอรีนอิสระตกค้าง (Free chlorine residual) ปรากฏอยู่ในน้ำ วิธีการเช่นนี้เรียกว่า Breakpoint chlorination แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคลอรีนที่เติมและปริมาณคลอรีนตกค้างถ้าทดลองเติมคลอรีนในปริมาณต่างๆ ให้กับน้ำ และวัดปริมาณคลอรีนตกค้างหลังจากเวลาสัมผัส 30 นาทีตามทฤษฎีแล้วเมื่อเติมคลอรีนให้กับน้ำบริสุทธิ์จะได้คลอรีนตกค้างเท่ากับคลอรีนที่เติมเนื่องจากไม่มีการสูญเสียคลอรีนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมคลอรีนให้กับน้ำประปาที่สะอาดย่อมมีการสูญเสียคลอรีนเกิดขึ้นเสมอ ในกรณีที่น้ำประปามีแอมโมเนียหรือสารอื่นๆ กราฟที่ได้จะเป็น (ดังรูปที่ 2.6) ช่วงแรกของรูป (ระยะ กข) มีคลอรีนตกค้างต่ำมาก เนื่องจากคลอรีนถูกสารประกอบอินทรีย์จับไว้เกือบหมด นอกจากนี้คลอรีนยังมีปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ต่างๆที่อยู่ในน้ำระยะ ขค มีปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับแอมโมเนียเกิดขึ้น ทำให้ได้สารคลอรามินต่างๆ ซึ่งเป็นคลอรีนรวม (Combined chlorine) ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าคลอรีนอิสระจะลดลงแต่คลอรีนรวมมีเพิ่มมากขึ้น กราฟ ขค จึงยังปรากฏให้เห็นการเพิ่มของคลอรีนตกค้าง เมื่อเติมคลอรีนเพิ่มขึ้นอีกจนเลยจุด ค ปฏิกิริยา Oxidation ยังเกิดต่อไปแต่เป็นการทำลายสารประกอบคลอรามินให้กลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ ปริมาณคลอรีนตกค้างจึงลดลง แอมโมเนียและสารประกอบคลอรามินจะลดลงจนเหลือน้อยที่สุดที่จุด ง จุดนี้เรียกว่า Breakpoint แสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารในน้ำถึงที่สุดแล้ว จากนั้นไปคลอรีนตกค้างจะอยู่ในรูปคลอรีนอิสระซึ่งใช้ฆ่าเชื้อโรค คลอรีนตกค้างจะเท่ากับคลอรีนที่เติมเมื่อถึงและเลยจุด ง ไปแล้ว



ระบบประปาขนาดกลางและขนาดใหญ่ นิยมใช้ก๊าซคลอรีนสำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ส่วนระบบประปาขนาดเล็กนิยมใช้คลอรีนผงหรือน้ำ เพราะไม่ต้องเสียเงินลงทุนเบื้องต้นสูงมากนัก และผู้ควบคุมไม่ต้องมีความรู้สูง



รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเกิด Breakpoint chlorination (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2541)

2.4 กลไกการเกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (DBPs)

สารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products: DBPs) แบ่งเป็น 3 กลุ่ม (กฤษดา ทองนาค, 2553) ได้แก่

1. สารพลอยได้ที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรค (Disinfectant residuals) ได้แก่ คลอรีนอิสระ (Free chlorine) คลอรามิน (Chloramines)
2. สารพลอยได้ประเภทสารอนินทรีย์ (Inorganic by-products) เช่น คลอเรตไอออน คลอไรต์ไอออน เป็นต้น
3. สารพลอยได้ประเภท Halogenated organic by-products ได้แก่ สารประกอบกลุ่ม Trihalomethanes (THMs) กลุ่ม Haloacetic acids (HAAs) กลุ่ม Haloacetonitriles กลุ่ม Haloketones กลุ่ม Chlorophenols เป็นต้น ซึ่งสารตกค้างกลุ่มนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) ในน้ำกับคลอรีน

การเกิดสารก่อมะเร็ง (DBPs) ในน้ำประปา เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารคลอรีนอิสระ (ในรูป HOCl และ OCl⁻) กับ NOMs ในน้ำที่มีกลุ่มโพรพาโนนเป็นองค์ประกอบ (CH₃COCCCl₃) เช่น กรดฮิวมิก และกรดฟุลวิก โดยโครงสร้างของกรดฮิวมิกมีโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกมากและมีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่เอไมด์ และฟีนอลิก ที่ยื่นออกมาจากโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนที่คลอรีนสามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็นสารประกอบฮาโลเจนที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเป็นองค์ประกอบ และอาจมีการแทนที่ด้วย ฟลูออรีน (F) ไอโอดีน (I) คลอรีน (Cl) โบรมีน (Br) หรือธาตุเหล่านี้ทุกตัวรวมกัน (Ghomsheh et al., 1790; Marhaba et al., 1998) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

Monohaloacetic acid	Dihaloacetic acid	Trihaloacetic acid
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{X}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H} \\ \text{X} = \text{Cl or Br} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{X} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{X}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{H} \\ \text{X} = \text{Cl or Br} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{X} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{X}-\text{C}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{X} \\ \text{X} = \text{Cl or Br} \end{array}$

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของปฏิกิริยาการเกิดกรดฮาโลอะซีติก

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนสมการ ดังนี้



CHCl₂COOH (กรดโมโนคลอโรอะซีติก) BrCH₂COOH และ (กรดโบรมอิลอะซีติก) เป็นตัวอย่างของ HAAs ที่เกิดขึ้น CHCl₃ (Chloroform) และ CHBr₃ (Bromoform) เป็นตัวอย่างของ THMs ที่เกิดขึ้น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ต่อกันอย่างไม่อิ่มตัว (Unsaturated Linkage) ก็สามารถทำปฏิกิริยากับสารคลอรีนได้เป็นอย่างดี สารคลอรีนยังมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับฮาโลเจนตัวอื่น เช่น โบรมีน ดังสมการที่ 2.18 HOBr ก็เป็นสารฆ่าเชื้อโรคและสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ด้วยอัตราที่เร็วกว่าสารคลอรีน การทำคลอรีนชันในน้ำที่มีโบรมีนจึงมักพบว่าอัตราปฏิกิริยาที่รวดเร็วกว่า THMs เป็นสารก่อมะเร็งที่พบบ่อยมากที่สุดคือน้ำประปาและตามด้วย HAAs (มันติน ตันกุลเวศม์, 2545)

2.5 กรดฮาโลอะซีติก (HAAs)

2.5.1 การเกิดกรดฮาโลอะซีติก

HAAs เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำดื่มและน้ำประปาโดยเกิดร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) HAAs นั้นเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี และกลายเป็นไอได้น้อย นอกจากนี้ยังสามารถละลายในน้ำได้ดีและค่อนข้างเสถียร โดยปกติแล้วจะไม่ได้พบ HAAs ในธรรมชาติทั่วไป แต่จะเกิดเมื่อมีการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค HAAs ที่มีโบรมีนเนื่องมาจากปริมาณโบรมีนที่อยู่ในธรรมชาติ แหล่งกำเนิด HAAs อื่นๆนอกจากธรรมชาติ HAAs จะเกิดจากกระบวนการต่างๆที่มีการใช้สารเคมี เช่น กระบวนการฟอกเนื้อไม้ ในโรงงานกระดาษ การฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำดื่ม และกระบวนการบำบัดน้ำเสียเป็นต้น

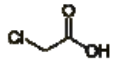
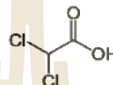
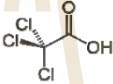
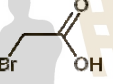
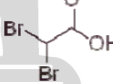
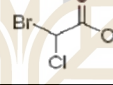
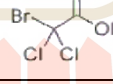
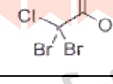
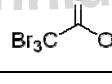
การเกิด HAAs มีสารอินทรีย์ธรรมชาติเป็นสารตั้งต้น ขณะที่ไอของคลอรีน (Cl) หรือไอของโบรมีน (Br) เป็นสารที่ถูกเติมในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยการเกิด HAAs นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำที่เข้าสู่ระบบ ทั้งปริมาณคาร์บอนทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ แอมโมเนีย และอัลคาไลน์ิตี้เป็นต้น รวมทั้งสภาวะในการเดินระบบ เช่น ปริมาณสารฆ่าเชื้อโรค เวลาสัมผัส การกำจัด NOMs ออกก่อนที่จะถึงจุดทำการฆ่าเชื้อโรค หรือการเติมสารฆ่าเชื้อโรคก่อน

การเกิด HAAs สามารถพบได้ เมื่อน้ำดื่มมีคลอรีนภายใต้สภาวะพีเอชเป็นกรดเล็กน้อย และมีความเข้มข้นโบรมีนต่ำ ความเข้มข้นกรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) และกรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) จะใกล้เคียงกับความเข้มข้นของคลอโรฟอร์ม และความเข้มข้นของ HAAs ทั้งหมดจะมากกว่าร้อยละ 50 ของความเข้มข้นของ THMs ในน้ำที่ได้จากกระบวนการสุดท้าย (Metcalf et al., 2015; Nissinen et al., 2002; ชูติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551)

2.5.2 ชนิดโครงสร้าง และสมบัติทางกายและเคมีของกรดฮาโลอะซีติก

HAAs มีทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดโมโนโบรมอะซีติก (MBAA) กรดไดโบรมอะซีติก (DBAA) กรดไตรโบรมอะซีติก (TBAA) กรดโบรมไดคลอโรอะซีติก (BDCAA) กรดไดโบรมคลอโรอะซีติก (DBCAA) และกรดโบโมคลอโรอะซีติก (BCAA) โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายและเคมีของกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิด

ชื่อกรดฮาโลอะซิติก	สูตร โครงสร้าง	น้ำหนัก โมเลกุล (g/mol)	pK _a	จุดเดือด (°C)	ครึ่งชีวิต (วัน)
Monochloroacetic acid (MCAA)		94.50	2.87	188	42
Dichloroacetic acid (DCAA)		128.90	1.25	194	10
Trichloroacetic acid (TCAA)		163.40	0.77	196	6
Monobromoacetic acid (MBAA)		138.95	2.90	157	63
Dibromoacetic acid (DBAA)		217.85	1.47	128-130	14
Bromochloroacetic acid (BCAA)		173.36	1.39	210-212	18
Bromodichloroacetic acid (BDCAA)		252.26	1.09	-	-
Dibromochloroacetic acid (DBCAA)		207.81	1.09	-	-
Tribromoacetic acid (TBAA)		296.74	2.10	245	8

ที่มา: U. Dmitruk et al. (2007) และ Uansiri (2009)

ซึ่งลักษณะของสารประกอบที่แตกต่างกันนี้ขึ้นอยู่กับ NOMs ที่มีอยู่ในน้ำ และปริมาณของสารฆ่าเชื้อโรคที่มีฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบ โครงสร้างและสมบัติทางกายและเคมีของ HAAs ชนิดต่างๆ (Chalatip et al., 2009; Ling et al., 2012)

2.5.3 ความเป็นอันตรายของกรดฮาโลอะซิติก

HAA's จัดอยู่ในสารตกค้างประเภท Halogenated organic by-products โดยส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสืบพันธุ์ การคลอด ระบบไหลเวียนโลหิต และอาจส่งผลกระทบต่ออวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต เป็นต้น ตัวอย่างเช่น TCAA เป็นสารที่มีความอันตรายกับตัวมนุษย์และอาจทำให้เกิดโรกระบบประสาทและความผิดปกติในตัวอ่อนของหนู (Nikolaou et al., 2004) และจากรายงาน WHO (2006) MCAA ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมในหนู รวมทั้งการได้รับสัมผัสจาก DCAA ส่งผลต่อการเกิดมะเร็งในมนุษย์และมะเร็งในตับของหนู ศักยภาพของการก่อมะเร็งของ HAA's แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ศักยภาพของการก่อมะเร็งของกรดฮาโลอะซิติก

สารตกค้าง	ศักยภาพของการก่อมะเร็ง
Monochloroacetic acid (MCAA)	D
Dichloroacetic acid (DCAA)	B
Trichloroacetic acid (TCAA)	C

หมายเหตุ ศักยภาพของการก่อมะเร็งมีดังนี้

ระดับ A หมายถึง เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์

ระดับ B หมายถึง สามารถก่อมะเร็งในมนุษย์ได้

ระดับ C หมายถึง อาจก่อมะเร็งในมนุษย์ได้

ระดับ D หมายถึง ไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะระบุว่าเป็นสารก่อมะเร็ง

ที่มา: U.S.EPA (2012)

สารที่ใช้มาเชื้อในการผลิตน้ำประปานั้น เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างคลอรีนกับ NOMs ที่มาจากสารประกอบฮาโลเจนที่เกิดเป็น DBPs โดยสารที่เกิดนอกจาก THMs แล้วคือ HAA's จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งในการกำหนด ค่ามาตรฐานของน้ำประปา หรือที่เรียกว่า ค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminate Levels: MCLs) ของสารปนเปื้อนในน้ำประปาถูกกำหนดโดยมาตรฐานของแต่ละหน่วยงานดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์มาตรฐานกรดฮาโลอะซิติกในน้ำประปาที่แต่ละหน่วยงานกำหนดไว้

หน่วยงาน	กลุ่มสาร	Maximum Contaminant Levels (ไมโครกรัม/ล.)	ที่มา
องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (US.EPA.)	Dichloroacetic acid (DCAA)	Zero	US.EPA. (2012)
	Trichloroacetic acid (TCAA)	20	
	Monochloroacetic acid (MCAA)	70	
	Monobromoacetic acid (MBAA)	Regulated with this group but has no MCLs	
	Dibromoacetic acid (DBAA)		
	Sum of five HAAs	60	
องค์การอนามัยโลก (WHO)	Dichloroacetic acid (DCAA)	50	WHO (2006)
	Trichloroacetic acid (TCAA)	200	
	Monochloroacetic acid (MCAA)	20	

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดฮาลอะซีติก

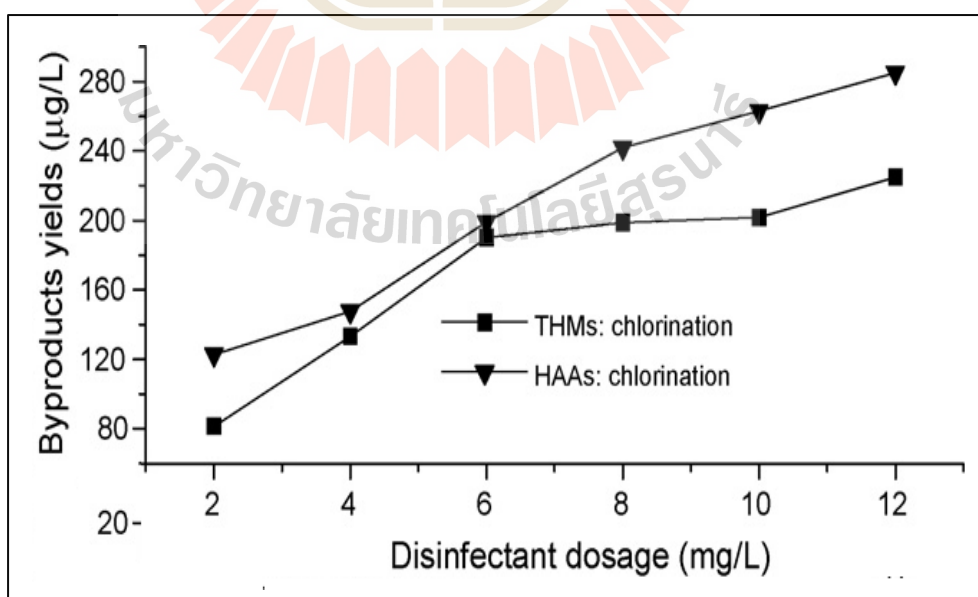
HAA's ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) ในน้ำ กับคลอรีน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ NOMs พิเศษ อุณหภูมิของน้ำ และปริมาณคลอรีนที่เติม ในที่นี้จะกล่าวถึงปัจจัยที่สำคัญดังนี้

1. สารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOMs)

NOMs เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดสารตกค้างจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน NOMs เป็นของผสมระหว่างสารประกอบฮิวมิก (Humic substances) ซึ่ง NOMs ประกอบด้วยกรดฮิวมิก กรดฟลูวิก และสารที่ไม่ใช่สารประกอบฮิวมิก สารฮิวมิกมีอยู่ทั่วไปในน้ำและแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดย NOMs มีบทบาทสำคัญต่อปัญหาที่เกิดขึ้นกับน้ำประปา (Singer, 1999) และจากการศึกษาของ มัลลิกา ปัญญาคะโป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี (2550) ยังพบว่า NOMs มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติก (สารประกอบฮิวมิก) จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดสารตกค้างได้มาก

2. ปริมาณคลอรีน

ปริมาณคลอรีนที่เติมจะมีผลต่อชนิดและความเข้มข้นของสารตกค้าง โดยเมื่อความเข้มข้นคลอรีนที่เติมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความเข้มข้นของสารตกค้างสูงขึ้น และจากการศึกษาของ Lu et al. (2009) พบว่าในปริมาณของ NOMs ที่เท่ากัน เมื่อยิ่งเพิ่มปริมาณฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนกันมีผลทำให้การเกิด HAA's ยิ่งเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 2.8

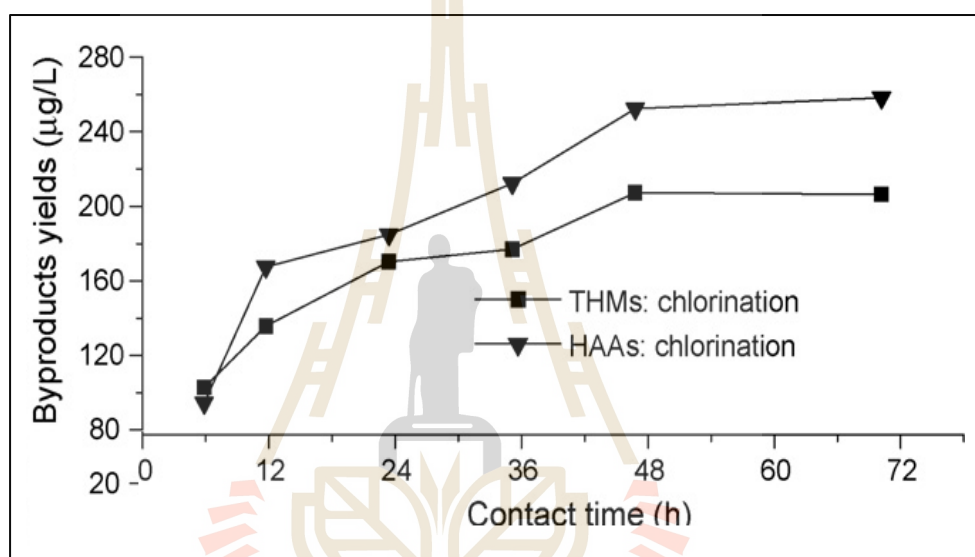


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาลอะซีติกกับปริมาณคลอรีนที่ทำปฏิกิริยา

(Lu et al., 2009)

3. ระยะเวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสระหว่าง NOMs และคลอรีนมีผลต่อการเกิด HAAs จากงานวิจัยของ Guay et al. (2005) พบว่าหลังจากเติมคลอรีนลงในน้ำปริมาณ HAAs จะเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วง 60 ชั่วโมงแรก โดยปฏิกิริยาจะเริ่มช้าลงและคงที่หลังจาก 60 - 90 ชั่วโมงนอกจากนี้จากงานวิจัยของ Lu et al. (2009) พบว่าหลังจากเติมคลอรีนลงในน้ำปริมาณ HAAs จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 48 ชั่วโมงแรกและหลังจากนั้นปฏิกิริยาจะเริ่มช้าลงในช่วง 48 - 72 ชั่วโมงถัดไปตามเวลาที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2.9

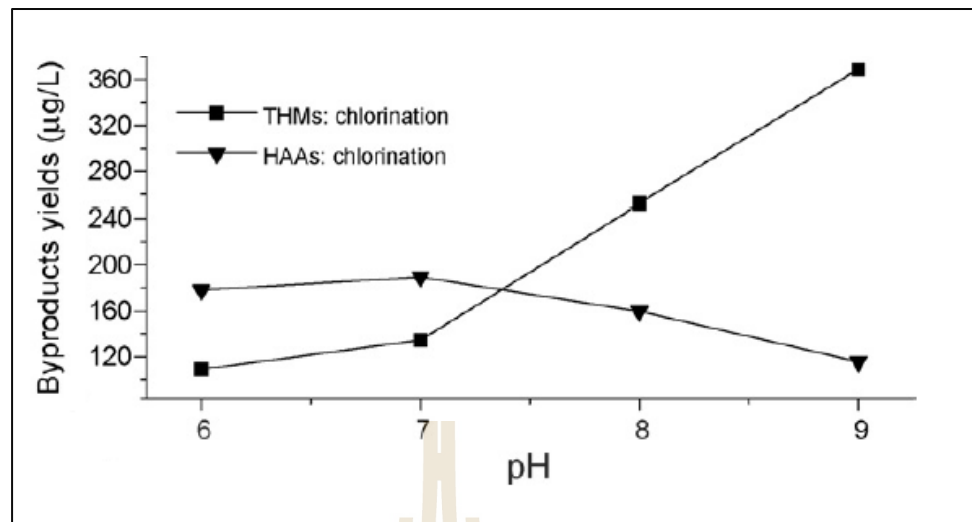


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติกกับระยะเวลาที่ทำปฏิกิริยา (Lu et al., 2009)

4. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช: pH)

สำหรับผลของพีเอช NOMs ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปประจุลบและสามารถจับตัวกันกลายเป็นคอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมื่อค่าพีเอชเพิ่มมากขึ้นประจุลบของ NOMs ก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งประจุลบส่วนใหญ่เกิดในกลุ่มคาร์บอกซิล (COO^-) โดยที่ H^+ จะไอออนเข้ามาที่พีเอชระหว่าง 3 - 8 ถ้าค่าพีเอชสูงมากกว่านี้จะมีประจุลบมากขึ้น ดังนั้นสารอินทรีย์จะมีเสถียรภาพสูงทำให้ปฏิกิริยาการสร้างตะกอนเกิดได้ยาก จึงเหลือ NOMs ตกค้างจากการตกตะกอนมากขึ้นและเกิดการรวมตัวกับคลอรีนเกิดเป็น HAAs เพิ่มขึ้นด้วย (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2537)

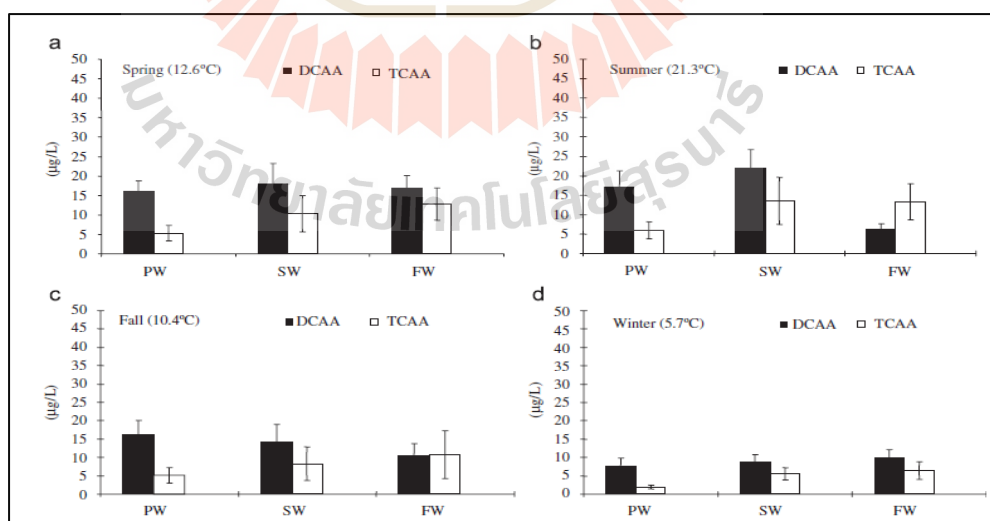
จากการรายงานของ Bond et al. (2012) พบว่าปริมาณ HAAs จะเกิดเมื่อมีค่าพีเอชอยู่ที่ 5 - 7 และหลังจากที่พีเอช 7 การเกิด HAAs จะลดลงเช่นเดียวกับการศึกษาของ Lu et al. (2009) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซีติกกับพีเอชที่ทำปฏิกิริยา (Lu et al., 2009)

5. อุณหภูมิ

อุณหภูมิของน้ำส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับ NOMs เร็วขึ้น ผลการวิจัยของ Rodriguez et al. (2007) พบว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ในช่วงอุณหภูมิต่ำจะเกิดกรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) และกรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) ในปริมาณที่น้อยกว่าช่วงอุณหภูมิสูงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกรดไดคลอโรอะซีติกและกรดไตรคลอโรอะซีติกกับอุณหภูมิ (Rodriguez et al., 2007)

2.6 กระบวนการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก

ในการกำจัด HAAs มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารก่อมะเร็งออกจากน้ำประปา โดยกระบวนการต่างๆ ไปที่นิยมใช้การกำจัด HAAs ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) การสร้างตะกอน-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) และการกำจัดด้วยโอโซน (Ozonation) (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2545) ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละกระบวนการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก

(ปรับปรุงมาจาก ทศณา เกื้อเส้ง (2553))

กระบวนการ	ประสิทธิภาพในการกำจัด HAAs (%)	ความซับซ้อนของกระบวนการ	ค่าใช้จ่ายของกระบวนการ	ที่มา
การสร้างตะกอนและรวมตะกอน	27 - 58	ปานกลาง	ต่ำ-ปานกลาง	Chuang et al. (2011) Metcalf et al. (2015)
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	70.42 - 94	ปานกลาง-สูง	ปานกลาง	Babi et al. (2007) ชุติมา กัลยาประสิทธิ์ (2551)
โอโซน	20 - 37	ปานกลาง	ปานกลาง-สูง	Guay et al. (2005) Ratasuk et al. (2008)

ซึ่งการกำจัด HAAs ในน้ำประปามีหลายวิธี ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีมาในการกำจัด HAAs เช่นกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) หรืออัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) แต่การใช้เทคโนโลยียังมีข้อจำกัดราคาสูงและต้องใช้ผู้มีความเชี่ยวชาญในการควบคุม โดยการศึกษาที่ใช้นั้นใช้กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน และกระบวนการดูดซับในการกำจัด HAAs ในน้ำประปา

2.7 กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation)

อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ย่อมมีน้ำหนักมากพอที่จะแยกตัวออกจากน้ำและตกตะกอนสู่พื้นล่างของน้ำได้ด้วยตัวเองเมื่อตั้งทิ้งไว้ ตะกอนที่ตกลงสู่พื้นน้ำเรียกว่า สลัดจ์ (sludge) ส่วนอนุภาคที่ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองเรียกว่า คอลลอยด์ (colloidal) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่ในช่วง 10^{-6} มิลลิเมตร (1 นาโนเมตร) จนถึง 10^{-3} มิลลิเมตร (1 ไมครอน) กระจายตัวอยู่ในน้ำ ได้แก่

สำหรับ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความขุ่น กลิ่นและสีในน้ำ จึงต้องกำจัดออกจากน้ำแต่เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็ก และมีน้ำหนักน้อยไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยตัวเองในเวลาจำกัด

2.7.1 หลักการของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน

กระบวนการสร้างและรวมตะกอนคือ การทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุเป็นลบจึงเกิดการผลักกันไม่สามารถรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นจึงต้องสะเทินประจุของอนุภาคเหล่านั้น ขั้นตอนในการสร้างและรวมตะกอนทางเคมี (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) จะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1. Coagulation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยในน้ำมีประจุเป็นกลาง โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุบวกหรือเรียกว่า Coagulant เพื่อให้เกิดการสะเทินประจุที่ผิวของสารแขวนลอยทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงและรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น

2. Flocculation คือ กระบวนการที่ทำให้สารแขวนลอยที่สะเทินประจุแล้วเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกว่า ฟลอค (Floc) เมื่อกลุ่มตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักก็มากขึ้นทำให้สามารถจมตัวลงสู่ก้นถังได้เร็วมากขึ้นซึ่งกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเป็นวิธีที่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ HAAs

2.7.2 กลไกของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

กลไกการทำให้คอลลอยด์หรือสารแขวนลอยรวมตัวกันตกตะกอนออกจากน้ำได้ คือการทำลายเสถียรภาพของสารแขวนลอย (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2537) แบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

1. โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) การเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค จะทำให้จำนวนไอออนต่างประจุ (Counter-Ion) ในชั้นกระจายเพิ่มขึ้น และทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลง เนื่องจากจำนวนของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิม ทำให้อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันจนเกาะกันได้ด้วยแรงดึงดูด

2. โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคแขวนลอย (Adsorption Charge Neutralization) สารเคมีบางชนิดสามารถแตกตัวให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคแขวนลอยและมีความสามารถในการดูดติดกับอนุภาคแขวนลอย ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคแขวนลอยลดลง

(แรงผลักดันระหว่างอนุภาคตกลง) และทำลายเสถียรภาพของอนุภาคแขวนลอยจนทำให้สามารถเข้าใกล้กันแล้วรวมตัวกันเป็นตะกอนตกลงได้

3. โดยการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในตะกอนของสารประกอบโดยห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก (Sweep Coagulation) เป็นการเติมสารประกอบของเกลือของโลหะบางชนิด ซึ่งมีความสามารถในการตกผลึกอย่างรวดเร็วโดยใช้อนุภาคแขวนลอยเป็นแกนกลางทำให้อนุภาคมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและอิทธิพลของประจุไฟฟ้าลดลง อนุภาคจึงสัมผัสกันและตกตะกอนได้

4. โดยการใส่สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคแขวนลอย (polymer bridging) โพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดนี้อาจเป็นผลจากประจุต่างกัน หรือเป็นแรงทางปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์กับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่แล้ว โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) อนุภาคนี้สามารถจับกับอนุภาคอื่นๆได้ โดยอาศัยโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อม ในกรณีที่ปลายอิสระของสารโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะจับบนอนุภาคอื่นๆ ปลายอิสระจะจับบนอนุภาคคอลลอยด์เดิมทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับกับอนุภาคอื่นๆ และทำให้ตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ แต่ในกรณีที่ใส่สารโพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียได้ เพราะสารโพลีเมอร์หลายโมเลกุลไปเกาะบนพื้นผิวของคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีตำแหน่งว่างบนพื้นผิวอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ การกวนที่รุนแรงหรือนานเกินไปทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วกลับแตกออกเป็นส่วนๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาคคอลลอยด์เดิมอนุภาคจึงคืนเสถียรภาพอีกครั้ง

2.7.3 สารสร้างตะกอน (Coagulant)

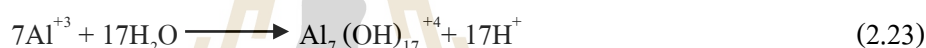
สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการสร้างตะกอน เรียกว่า สารสร้างตะกอน หรือ โคแอกกูแลนต์ (coagulant) ซึ่งสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ สารส้ม PACI และสารประกอบเหล็กบางตัว เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปในน้ำ มันจะแตกตัวเป็นไอออนบวกและลบที่มีวาเลนซ์ (Valence) สูง ไอออนบวกสามารถทำปฏิกิริยากับ OH^- ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก ไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบ ทำให้ความขุ่นกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพให้กับความขุ่นนั่นเอง (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2537)

1. สารส้ม (Alum)

Alum มีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot x H_2O$ โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 ซึ่งแตกตัวในน้ำได้เป็นไอออนบวกดังสมการที่ 2.20



เมื่อ Alum ละลายน้ำ อลูมิเนียมไอออนจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Al^{+3} จะเกิดขึ้นทันทีเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ 2.21 2.22 และ 2.23



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ดังสมการที่ 2.24

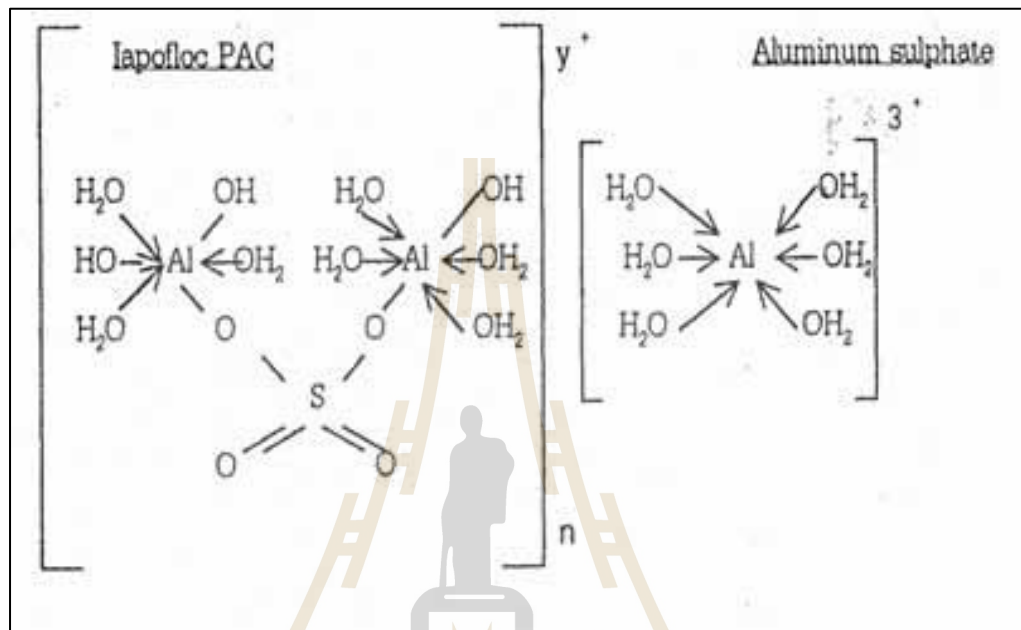


ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารคอมเพล็กซ์ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{+3} ถึง $Al(OH)_3$ สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $Al(OH)_3(s)$ จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น $Al(OH)_4^-$ $Al(OH)_5^{2-}$ ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจะสะเทินทางไฟฟ้าของ $Al(OH)_3(s)$ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวกเช่น $Al(OH)^{+2}$ $Al(OH)_2^+$ $Al_7(OH)_{17}^{+4}$ $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$

2. สารโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl)

PACl ถูกเตรียมขึ้น โดยอลูมิเนียม (aluminium) ที่เป็น Al_2O_3 ซึ่งทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น $AlCl_3$ หลังจากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมโพลีเมอร์ เมื่อเติมสารส้มลงไป สารละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือร้อยละ 10 - 11 และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม PACl เป็นเกลืออลูมิเนียมที่มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ

$Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ โดยลักษณะทั่วไปของ PACI อาจอยู่ในรูปสารละลายไฮโดรไลซิสหรือขุ่นเล็กน้อยและอาจอยู่ในรูปของผงสีขาวและสีเหลือง เมื่อ PACI ละลายน้ำสามารถไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทันทีเป็นอนุภาคนิยมเชิงซ้อนมากมาย โดยตัวที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{+7}$ หรือ Al^{+13} (Matilainen et al., 2010; Wu et al., 2007)

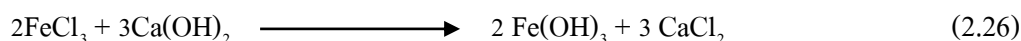
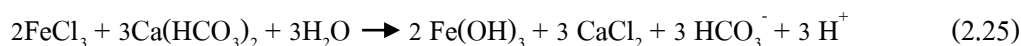


รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของ Lapofloc PACI และ Alum (Viraraghavan et al., 1988)

3. สารเฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)

เฟอริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทางเคมีว่า $FeCl_3 \cdot xH_2O$ หรือ $FeCl_3$ anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และมีรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำคิบในรูปของสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$)

เฟอริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบเหล็กเมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังนี้



การเติมเฟอริกคลอไรด์สร้างในน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม จะมีผลึกเฟอริกไฮดรอกไซด์ (มันสีน ตันทุลเวสม์, 2537) เกิดขึ้นดังนี้



สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนโดยการใช้ Alum PACl และ FeCl_3 เพื่อกำจัด NOMs ในน้ำดิบประปา โดยมี NOMs ใกล้เคียงกันในปริมาตรน้ำดิบประปา 100 มิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา

แหล่งน้ำดิบประปา (100 มล.)	สารสร้าง ตะกอน (มก.)	pH	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)		ที่มา
			ความขุ่น	DOC	
อ่างแก้ว, เชียงใหม่	3.6 (Alum)	6.50	-	23.07	ภูวดล ศิริสินเลิศ (2552)
โรงผลิตน้ำประปา บางเขน	6.0 (Alum)	5.50	-	36	Panyapinyopol (2004)
Broad river, Columbia	10.0 (Alum)	7.50	-	57	Joseph et al. (2012)
Ottawa river, Canada	3.0 (Alum)	7.40	-	45	Zheng et al. (2015)
อ่างเก็บน้ำศรีตรัง, สงขลา	2.0 (PACl)	7	89	50	ทัศนาศู เกื้อเส้ง (2553)
Queshan reservoir, China	1.2 (PACl)	7.78	84.29	50.93	Zhan et al. (2010)
แม่น้ำปิง	4.0 (PACl)	7.80	-	33.90	Rakruam (2013)

ตารางที่ 2.7 การศึกษาประสิทธิภาพของสารสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา (ต่อ)

แหล่งน้ำดิบประปา (100 มล.)	สารสร้าง ตะกอน (มก.)	pH	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)		ที่มา
			ความขุ่น	DOC	
Synthetic water, China	3.0 (PACl)	7.15	-	65	Xu et al. (2016)
อ่างแก้ว, เชียงใหม่	3.6 (FeCl ₃)	6.50	-	60.60	ภูวคต ศิริสินเลิศ (2552)
Municipal (secondary effluent), China	8.0 (FeCl ₃)	6.56	48	43.40	Zhang et al. (2013)

การศึกษาระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน โดยการใช้ Alum PACl และ FeCl₃ เพื่อกำจัดความขุ่น และกำจัด NOMs ในรูปของ DOC เมื่อเปรียบเทียบชนิดและปริมาณสารสร้างตะกอน พบว่า PACl เป็นสารสร้างตะกอนที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจาก PACl เป็นสารสร้างตะกอนที่ใช้ในปริมาณน้อยที่สุดและสามารถความขุ่น และ DOC สูงสุด

2.7.4 สารช่วยสร้างตะกอน (Coagulant aid)

สารช่วยสร้างตะกอน หรือ โคแอกกูแลนต์เอ็ด หมายถึงสารที่ช่วยทำให้กระบวนการสร้างตะกอนทำการสร้างตะกอนได้ดียิ่งขึ้น ตัวอย่างของสารช่วยสร้างตะกอน ได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติหรือสังเคราะห์ แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ดินเหนียวชนิดต่างๆ ปูนขาว เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2541) ในปัจจุบันสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ โพลีเมอร์ (Polymer) หรือ โพลีอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolytes) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่ โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส (cellulose) เจลาติน (gelatin) และแป้ง (starch) และโพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมีรูปร่างเป็นลูกโซ่ของสาร โมโนเมอร์ (monomers) หลากๆ ตัวเรียงกันอย่างมีระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เช่น อาจมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ร้อยจนถึงระดับที่สูงกว่า 10 ล้าน เป็นต้น และสามารถจำแนกประเภทโพลีเมอร์ตามประจุ ได้แก่ Cationic polymer (โพลีเมอร์บวก) Anionic polymer (โพลีเมอร์ลบ) และ Non-ionic polymer (โพลีเมอร์ไม่มีประจุ)

โพลีเมอร์สามารถสร้างโคเอกกุลเลชันให้กับน้ำขุ่นได้ 2 วิธี โดยการอาศัยคุณสมบัติในการเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และสารอินทรีย์ (ประพัฒน์ เป็นตามวา, 2555; มั่นสิน ตันทุลเวศม์, 2537) ดังนี้

1. การทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์ที่มีประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์และสารอินทรีย์หมดสิ้นไป กรณีนี้อาจใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างโคเอกกุลเลชัน

2. การสร้างโคเอกกุลเลชัน โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และสารอินทรีย์หลายๆ ตัว ประจุโพลีเมอร์ในกรณีนี้ไม่ใช่เรื่องสำคัญเพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่โพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง โดยสะพานดังกล่าวต้องมีความแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการกวนน้ำ ดังนั้น โคเอกกุลเลชันที่เกิดจากวิธีการสร้างสะพานจึงต้องการโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งมักเป็นชนิดประจุลบหรือไม่มีประจุ

การใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียวสามารถช่วยกำจัดสารอินทรีย์ได้ในระดับหนึ่ง แต่ NOMs ที่หลงเหลืออยู่สามารถไปทำปฏิกิริยากับคลอรีนในขั้นตอนการฆ่าเชื้อโรคเกิดเป็นสารก่อมะเร็งในน้ำประปา การใช้สารช่วยสร้างตะกอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะเป็นตัวช่วยในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อลดสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยที่สุด และจากรายงานการศึกษาในระยะที่ผ่านมา มีผู้ทำการศึกษากระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนส่วนใหญ่ มักนำโพลีเมอร์ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ชนิดประจุบวกมาเป็นสารช่วยสร้างตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ที่มี NOMs ใกล้เคียงกันในปริมาตรน้ำดิบประปา 100 มิลลิลิตร

ตารางที่ 2.8 การศึกษาประสิทธิภาพของสารช่วยสร้างตะกอนในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดิบประปา

แหล่งน้ำดิบ ประปา (100 มล.)	สัดส่วน สารสร้างตะกอน (มก.) : สารช่วยสร้างตะกอน (มก.)	pH	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)		ที่มา
			ความขุ่น	DOC	
แม่น้ำท่าจีน	6.0 (Alum) : 0.01 (Polymer)	6	94.20	33.50	กฤษฎา ทองนาค (2553)
แม่น้ำแม่กลอง	4.0 (Alum) : 0.02 (Polymer)	7	93.13	38.03	
แม่น้ำท่าจีน	4.0 (PACl) : 0.01 (Polymer)	6	95.61	32.15	
แม่น้ำแม่กลอง	4.0 (PACl) : 0.02 (Polymer)	6.50	94.55	49.15	
อ่างเก็บน้ำศรีตรัง, สงขลา	2.0 (PACl) : 0.01 (Polymer)	7	90	59	ทัศนศึกษา เกื้อเส้ง (2553)
แม่น้ำท่าจีน	8.0 (FeCl ₃) : 0.03 (Polymer)	8	97.01	49.31	กฤษฎา ทองนาค (2553)
แม่น้ำแม่กลอง	6.0 (FeCl ₃) : 0.03 (Polymer)	8	96.91	45.10	

จากรายงานการศึกษาในระยะที่ผ่านมา มีผู้ทำการศึกษากระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนด้วยการใช้โพลีเมอร์เป็นสารสร้างตะกอนโดยตรงนั้นมีค่อนข้างน้อยอาจเป็นเพราะโพลีเมอร์สามารถกำจัด NOMs ได้ในระดับหนึ่ง และโพลีเมอร์มีราคาแพงกว่าสารสร้างตะกอนอื่นๆ ทำให้ผู้วิจัยส่วนใหญ่มักนำโพลีเมอร์มาเป็นสารช่วยสร้างตะกอน ซึ่งพบว่า ซึ่งพบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัด NOMs และลดการเกิด HAAs ได้ดีกว่าการใช้สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียว

2.7.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation-flocculation)

1. ลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOMs)

คุณภาพน้ำในแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดของต้นน้ำสภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศและปัจจัยภายนอกอื่นๆ ส่งผลให้ลักษณะของ NOMs มีความแตกต่างกัน จากการศึกษาของ Sharp et al. (2006) ที่ทำการบำบัด NOMs จากแหล่งน้ำของประเทศอังกฤษ พบว่าสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น Hydrophobic สามารถถูกบำบัดได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็น Hydrophilic นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากระบวนการสร้างตะกอน สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีกว่าสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก

2. ชนิดและปริมาณของสารสร้างตะกอน

สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการสร้างตะกอนมีด้วยกันหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการสร้างตะกอนกับสารอินทรีย์ได้แตกต่างกัน อันเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าเคมีที่ต่างกัน Rizzo et al. (2005) ทำการศึกษาการบำบัด NOMs ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนด้วย Alum PACI และ FeCl_3 พบว่า PACI สามารถบำบัดความขุ่นได้ดีที่สุดแต่บำบัด NOMs ได้น้อย และจากการศึกษาของ Viraraghavan et al. (1988) พบว่า PACI สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าการใช้ Alum ร้อยละ 20 โดย Alum และ FeCl_3 มีประสิทธิภาพในการบำบัด NOMs ได้ดีกว่า

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช: pH)

การศึกษาของ Uyak et al. (2007) พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด NOMs ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำมากกว่าปริมาณสารเคมีในกระบวนการสร้างตะกอน โดย FeCl_3 สามารถลด NOMs ได้ดีที่สุดในพีเอช 5.25 และ Alum สามารถลด NOMs ได้ดีที่สุดในพีเอช 5.50 และจากการรวบรวมการศึกษาของ Matilainen et al. (2010) พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตะกอนของสารเคมีแต่ละตัวแตกต่างกันคือ Alum ค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 5 - 6.50 FeCl_3 ค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 4.50 - 6 และ PACI ที่พีเอชน้อยกว่า 5 หรือมากกว่า 7

4. ชนิดและปริมาณของสารช่วยสร้างตะกอน

การศึกษาของ ทศนา เกื้อเส้ง (2553) พบว่าทำการทดลองใช้สารเคมีเพียงอย่างเดียวในสามารถกำจัดความขุ่น และ DOC ได้น้อยกว่าเมื่อใช้สารเคมีร่วมกับโพลีเมอร์ ชนิดของโพลีเมอร์ที่นิยมใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำคือ Cation polymer เนื่องจากมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับสารสร้างตะกอนคือ มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกแต่มีจำนวนมากกว่า เนื่องจากโพลีเมอร์มีการจัดเรียงตัวเป็นสายยาวมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เมื่อรวมตัวกับฟล็อกที่เกิดจากเกลือของเหล็กต่างๆ แล้ว ทำให้มีมวลโมเลกุลใหญ่มากขึ้นน้ำหนักมากขึ้นและตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าเป็น

Anion polymer หรือ Non-ion polymer จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ธรรมชาติได้น้อยกว่า Cation polymer

2.8 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

2.8.1 หลักการของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายมวลสารของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) จากเฟสที่เป็นของเหลวหรือก๊าซไปยังเฟสที่เป็นของแข็ง ซึ่งก็คือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับนี้จะไม่รวมถึงกระบวนการการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารลดลงไปนั้น เกิดจากกระบวนการดูดซับ กระบวนการโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน หรือจากกระบวนการอื่นๆ แล้ว อาจเรียกระบวนการนี้ว่า Sorption process (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554)

2.8.2 กลไกของการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554; เฉชา ฉัตรศิริเวช, 2552) ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
2. การแพร่ภายใน เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกริยาพื้นผิว เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.8.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ขนาด และพื้นที่ผิว

ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนถูกควบคุม โดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

ชุตินา กัลยาประสิทธิ์ (2551) ได้ศึกษาการดูดซับ HAAs โดยใช้ตัวกลางดูดซับเป็นมิโซพอร์สซิลิเกตและถ่านกัมมันต์แบบผง พบว่าการถ่านกัมมันต์แบบผงสามารถดูดซับ HAAs ได้ดีกว่ามิโซพอร์สซิลิเกตเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า

2. ลักษณะของสารดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายนอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

จากการศึกษาของ Chalatip et al. (2009) พบว่า HAAs กลุ่มคลอรินจะถูกดูดซับได้ดีกว่ากลุ่มโบรมีนเนื่องจากขนาดของโบรมีนที่ใหญ่กว่าและมีมวลโมเลกุลสูงกว่า ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลมีความกะอะมากกว่าจึงถูกดูดซับได้น้อย

3. ความดันป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความดันป่วนทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำ ระยะเวลาสัมผัสที่ใช่จะตรงเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีที่สุดทั้งนี้ขึ้น กับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

Tang et al. (2016) ได้ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ชีวภาพกำจัด HAAs ในน้ำของสระว่ายน้ำ พบว่าเวลาที่ใช้สัมผัสระหว่างน้ำกับถ่านกัมมันต์ชีวภาพที่อยู่ในคอกอถ่านมีผลต่อการลดลงของ HAAs จากเวลา 4.5 และ 6.4 นาที สามารถลด HAAs ได้ร้อยละ 30.30 และร้อยละ 72.20

5. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช: pH)

ค่าพีเอชของสารละลายนั้นเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

จากการศึกษาของ ชุติมา กัลยาประสิทธิ์ (2551) และ Soonglerdsongpha (2006) ใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงดูดซับ HAAs พบว่าที่พีเอช 5 และ 7 การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีมากกว่าที่พีเอช 9

2.8.4 วัสดุดูดซับ

ประเภทของตัวดูดซับ (Adsorbent) จำแนกตามธาตุองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับ (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) แบ่งได้ 2 ประเภท

1. ตัวดูดซับอนินทรีย์ คือ ตัวดูดซับที่มีธาตุกลุ่มโลหะชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบหลัก ตัวดูดซับอนินทรีย์นี้จำแนกย่อยตามลักษณะการเกิดของตัวดูดซับออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1.1 ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

1.2 ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ แต่เรซินมีข้อได้เปรียบมากกว่าคือ สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายและสารที่ใช้มีราคาถูก

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ 450 - 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลาง

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขี้ แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัลทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆจึงทำให้ดูดซับสารได้มากกว่า (ปริญทร์ เต็มญารศิลป์, 2551)

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานทางสิ่งแวดล้อมนั้นสามารถแบ่งตามขนาดออกได้เป็น 2 แบบ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) ดังนี้

2.1 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (GAC)

เป็นถ่านคาร์บอนแบบเกล็ดโดยปกติมีขนาดอยู่ในช่วง 0.20 - 5 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ได้ดีกับของเหลวและก๊าซ ในการกำจัดสารละลายออกจากน้ำกระทำโดยการบรรจุถ่านกัมมันต์ดังกล่าวลงในถังแล้วทำให้น้ำไหลผ่านเหมือนการกรองน้ำ ถังถ่านกัมมันต์นี้มีกวางไว้หลังถังกรองเพื่อมิให้ถ่านกัมมันต์ต้องทำหน้าที่ในการกรองความขุ่น ซึ่งอาจทำให้สมรรถนะในการดูดซับเสื่อมลงอันเนื่องมาจากการอุดตัน ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้จนเสื่อมสภาพแล้วสามารถนำมาทำให้ฟื้นสภาพ ด้วยการนำไปเผาใหม่ที่อุณหภูมิประมาณ 750 - 950 องศาเซลเซียส และนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.2 ถ่านกัมมันต์แบบผง (PAC)

เป็นถ่านคาร์บอนแบบผง มีขนาดเล็กกว่า 0.18 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ได้ดีกับของเหลว การเติม PAC อาจเติมพร้อมกับสารสร้างตะกอน ซึ่ง PAC ที่ใช้แล้วจะรวมอยู่กับตะกอนแขวนลอยในน้ำกลายเป็นฟล็อก และสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอนหรือการกรอง สำหรับน้ำที่มีความขุ่นต่ำควรเติม PAC ประมาณ 5 - 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรายงานการศึกษาวัสดุดูดซับ HAAs ซึ่งในระยะที่ผ่านมา มีผู้ทำการศึกษาวัสดุดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์เป็นส่วนใหญ่ อาจเป็นเพราะถ่านกัมมันต์มีราคาถูกและหาได้ง่าย คุณลักษณะที่ทำให้มีความสามารถดูดซับได้ดีกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น ก็คือ การมีความพรุนสูง (ชัยยศ ตั้งสติติกุลชัย, 2554) ทำให้ลด HAAs ที่เกิดขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 การศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการดูดซับมลสารแต่ละชนิด

วัสดุดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.)	ความเข้มข้นของ สารถูกดูดซับ	ประสิทธิภาพของ การดูดซับ (%)	ที่มา
ถ่านกัมมันต์ชนิด ผง (Coconut shell activated carbon)	980	HAAs 125 µg/L	70.42	ชูดิมา กัลยาประสิทธิ์ (2551)
มีโซพอร์สซิลิเกต	712		66.88	
ถ่านกัมมันต์แบบ ผง	980	DCAA 100 µg/L	64.92	Soonglerdsong- pha (2006)
ถ่านกัมมันต์แบบ เกล็ด (ถ่านหินบิทู มินัสรุ่น F 400)	1,100	HAAs 100 µg/L	94	Babi et al. (2007)
ถ่านกัมมันต์แบบ เกล็ด	1,100	HAAs 100 µg/L	90.10	Ghomshe et al. (2011)

จากรายงานการศึกษาที่ผ่านมาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับในการดูดซับมลสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้วัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากจะสามารถดูดซับมลสารได้ปริมาณมากดังตารางที่ 2.9 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารได้มากกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น และจากการวิจัยของ Hanigan et al. (2012) และ Sacher et al. (2008) พบว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดและถ่านกัมมันต์แบบผงสามารถกำจัด N-Nitrosodimethylamine ได้มากกว่าร้อยละ 60 โดย N-Nitrosodimethylamine เป็นสารในกลุ่ม halogenated ซึ่งกลุ่มเดียวกับ HAAs

2.8.5 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาของการดูดซับ

การศึกษาถึงจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อน โดยการนำค่าที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลา ซึ่งจะนำไปหาลำดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย, 2554; เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

1. ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order kinetics)

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.28)$$

เมื่อ q = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ เวลาต่างๆ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_e = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ จุดสมดุล
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

t = ระยะเวลา (นาที)

k_1 = ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับหนึ่ง ณ อุณหภูมิที่กำหนด (h^{-1})

2. ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (Second-order kinetics) หรือ ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order kinetics)

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.29)$$

เมื่อ q = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ เวลาต่างๆ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_e = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ ณ จุดสมดุล
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

t = ระยะเวลา (นาที)

k_2 = ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับสอง ณ อุณหภูมิที่กำหนด

จากการวิจัยของชุตติมา กัลยาประสิทธิ์ (2551) ได้ศึกษาการดูดซับ HAA's โดยใช้ตัวกลางดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์แบบผง พบว่าถ่านกัมมันต์แบบผงที่สามารถดูดซับ HAA's เป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับสอง เนื่องจากสมการปฏิกิริยาอันดับสองที่คำนวณแล้ว ค่าปริมาณของ HAA's ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณของ HAA's ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ เช่นเดียวกับการวิจัยของ Soonglerdsongpha (2006) ที่ศึกษาการดูดซับกรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) โดยใช้ตัวกลางดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์แบบผง

2.8.6 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

กระบวนการการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่าย แล้วนำสมการมาสร้างกราฟเพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้จากสมการที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) ในการบ่งบอกว่าสมการใดที่สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดีกว่า จากการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ จะทราบว่ากระบวนการทดลองใดที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ โดยมีผู้สร้างสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดซับไว้หลายสมการ (ชัยยศ ตั้งสติศย์กุลชัย, 2554) แต่ที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

1. ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่า

- 1.1 โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- 1.2 มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
- 1.3 พื้นที่ของบริเวณที่เกิดการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว

1.4 พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{(q_m K_L C_e)}{(1 + K_L C_e)} \quad (2.30)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย
(ไมโครกรัมต่อลิตร)

K_L = ค่าคงที่ของการดูดซับ

2. ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของฟรอนด์ลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้นี้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอรั่มแบบฟรอนด์ลิชเป็นไอโซเทอรั่มที่พัฒนาจากไอโซเทอรั่มแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช แสดงได้ดังสมการ

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.31)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย
(ไมโครกรัมต่อลิตร)

K_F และ $1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช จะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี แต่หากค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 จะแสดงถึงการดูดซับที่ดี และหากเส้นกราฟมีความชันมากแสดงว่าสารดูดซับนั้นสามารถเกิดการดูดซับได้ดี ความเข้มข้นสูงๆ

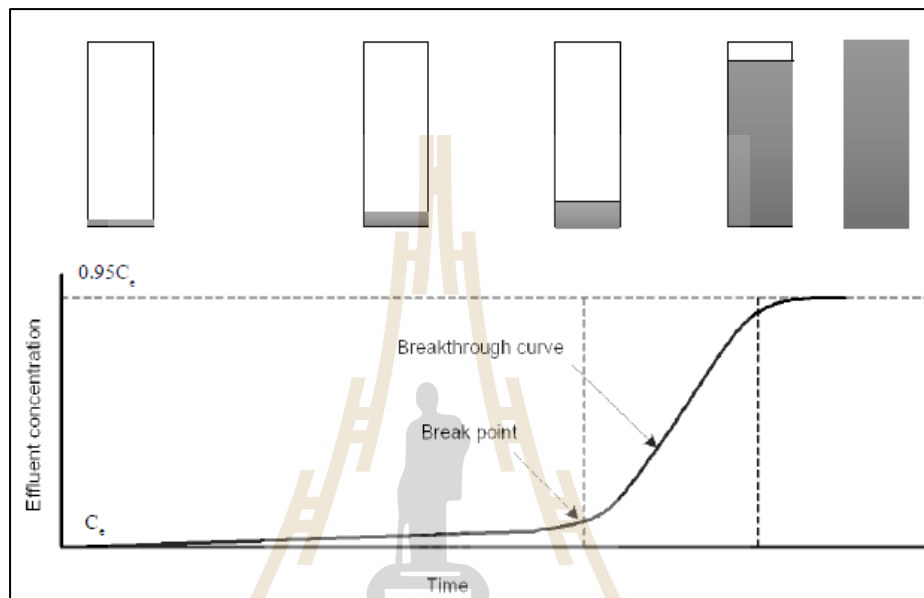
จากการวิจัยของ Ghomshe et al. (2011) ศึกษาการดูดซับ HAAs โดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัด HAA₅ พบว่า เป็นสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ให้ค่าความสามารถการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 38.75 ไมโครกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับจากการวิจัยของ Lekkas et al. (2009) ที่มีค่าความสามารถการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 42.70 ไมโครกรัมต่อกรัม

2.9 การดูดซับโดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์

2.9.1 ความสามารถในการบำบัดกรดฮาโลอะซิติกของชุดทดลองแบบคอลัมน์

ลักษณะของชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีการไหลขึ้น คือ ไหลด้านบนแนวโน้มถ่วง ทำให้ลักษณะการดูดซับจะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างของคอลัมน์ แล้วบริเวณการดูดซับจะเริ่มเคลื่อนที่สูงขึ้นไปยังส่วนบนของคอลัมน์ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนสุด ณ จุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) หลังจากจุดนี้ต่อไปจะเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นคือ การดูดซับค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำได้อีก ซึ่งเรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough curve ซึ่งจุดหมดสภาพ (Exhaustion point: C_E) มักใช้กันที่ร้อยละ 95 ของความเข้มข้นน้ำที่เข้าระบบ

โดยทั่วไปรูปกราฟเบรคทรูจะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-shape) คือ เมื่อกรองน้ำประปาที่มีความเข้มข้นของ HAAs เริ่มต้น C_0 ผ่านคอลัมน์ ซึ่งบรรจุถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นตัวกลางดูดซับ ความเข้มข้นของ HAAs ที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (ปริมาตรต่างๆ) คือ C_c ซึ่งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่ต้องการคือ เบรคทรู และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ $0.95C_0$ ซึ่งหมายถึงเป็นปริมาตรที่ตัวกลางดูดซับหมดสภาพความสามารถในการดูดซับ หรือปริมาณสารละลาย HAAs ที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity: q) จากการทดลองแบบคอลัมน์นั้นนิยมนำผลไปใช้ในการออกแบบระบบ มากกว่าการทดลองแบบทีละเท โดยเป็นการจำลองลักษณะการใช้งานจริง คือ มีการบรรจุตัวกลางดูดซับลงในคอลัมน์และปล่อยให้สารละลายของตัวถูกดูดซับไหลผ่านคอลัมน์ โดยตัวกลางดูดซับจะสัมผัสกับสารถูกดูดซับอย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.13 (ภูวคณ ศิริสินเลิศ, 2552)



รูปที่ 2.13 กราฟเบรกทู (Breakthrough curve) (นิรามย์ ไตรยวงศ์, 2558)

การหาค่าความสามารถในการดูดซับจากชุดทดลองแบบคอลัมน์ทำได้โดยการคำนวณพื้นที่ใต้เส้น $0.95C_0$ ลงมาจนถึงเส้น C_0 จะได้ค่าปริมาณ HAAs ทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์แล้วหารด้วยปริมาณตัวกลางดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สามารถดูดซับ HAAs ความสามารถในการดูดซับจะเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็กๆ หารด้วยปริมาณตัวกลางที่นำมาเป็นตัวกลางดูดซับ (ภูวดล ศิริสินเลิศ, 2552)

2.10 สรุปปรัทัศน์วรรณกรรม

จากรายงานการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าแหล่งน้ำผิวดินที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำประปามีคุณภาพน้ำเสื่อมลง มีการปนเปื้อนของ NOMs ค่อนข้างสูง โดยทั่วไประบบประปาจะลด NOMs ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation) (Pentamwa et al., 2013) และเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค แต่วิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอาจทำให้เกิดสารตกค้างที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับ NOMs โดยหนึ่งในสารที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็ง คือ กลุ่ม HAAs (มัลติกา ปัญญา โป และ ผ่องศรี เฝ้าภูรี, 2550)

การผลิตน้ำประปาในปัจจุบันไม่ได้คำนึงถึงเฉพาะสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่น้อยที่สุดเพื่อต้องการให้น้ำปราศจากความขุ่นเท่านั้น สารที่หลงเหลือจากการฆ่าเชื้อโรคที่เป็นสารก่อมะเร็งเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคตระหนักถึงความปลอดภัยต่อสุขภาพ เช่น สาร THMs และ HAAs โดยการเกิด HAAs จะเกิดมากกว่า THMs ร้อยละ 50 (Nissinen et al., 2002) ในการศึกษาที่ผ่านมาค่า TOC 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถก่อ THMs ได้ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร และ DOC 4 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถก่อ THMs ได้ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร (WHO, 2006; ชูติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) ซึ่งสามารถทำนายการเกิด HAAs ได้จากความสัมพันธ์ของการเกิด THMs ได้ นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป DOC จะมีศักยภาพทำให้เกิด HAAs มากกว่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูป TOC จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน โดยการใช้ Alum PACl และ FeCl₃ พบว่า PACl มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น และ NOMs ได้ดีที่สุด แต่ถ้าใช้โพลีเมอร์ชนิดบวกเป็นสารช่วยสร้างตะกอนจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยค่าพีเอชที่เป็นปัจจัยในกระบวนการควรอยู่ในช่วง 6.50 - 7.50 เนื่องจากเป็นช่วงที่ PACl มีประสิทธิภาพสร้างตะกอนได้ดีที่สุด โดยในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนปัจจัยที่คำนึงถึงได้แก่ การใช้ปริมาณคลอรีนที่เหมาะสมอุณหภูมิที่เป็นอุณหภูมิห้อง และช่วงค่าพีเอช อยู่ที่ 7 - 7.50 ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดของ HAAs ต่ำที่สุด ในศึกษานี้จึงได้เลือกกระบวนการดูดซับในการบำบัดสาร HAAs โดยเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน ซึ่งพิจารณาถึงปัจจัยระยะเวลาสัมผัส ขนาดและพื้นที่ผิวตัวกลางดูดซับ ค่าพีเอชที่ 7 จะเป็นค่าที่เหมาะสมกับการดูดซับได้ดีที่สุดสำหรับวัสดุดูดซับจากถ่านกัมมันต์ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ HAAs ได้ดีกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการทดลองและสถานที่ทำการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงทดลอง (Exeperimental Research) ดำเนินการทดลอง ณ อาคารปฏิบัติการพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และ เทคโนโลยีการเกษตร (F10) และอาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อศึกษาการกำจัดฮาโลอะซีติกสังเคราะห์ (HAA_5) ด้วยกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนร่วมกับตัวกลางดูดซับ โดยทำการศึกษาคูณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาจากอ่างเก็บน้ำสุระสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสำหรับใช้ในระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โลกกรวด หมู่บ้านหนองรังกา และน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คือ หน่วยผลิตน้ำประปา หอพักสุรนีเวศ 15 อาคารบริหาร โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หอพักสุรนีเวศ 13 โรงอาหารกาสะลองคำ หอพักสุรนีเวศ 16 สถานกีฬาและสุขภาพ หอพักสุขนิवास อาคารบ้านพักบุคลากร อาคารเรียนรวม 1 โรงอาหารเรียนรวม โรงอาหารกลาง และน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา คือ น้ำประปาจากหมู่บ้าน โลกกรวด และน้ำประปาจากหมู่บ้านหนองรังกา การศึกษาการดูดซับกรดฮาโลอะซีติกและควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดำเนินการของระบบ (Operating Condition) ได้แก่ ควบคุมพีเอชที่ 7 และควบคุมที่อุณหภูมิห้อง

โดยกรดฮาโลอะซีติกที่ทำการศึกษานี้มี 5 ชนิด (HAA_5) ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA) และกรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA)

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ผลิตภัณท์ Jenway รุ่น 7315
2. เครื่องกวนของเหลว (Jartester) ผลิตภัณท์ Phipps & Bird Stirrer รุ่น 7790 -402
3. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ผลิตภัณท์ Mettler Toledo รุ่น S220-Kit
4. เครื่องวัดความขุ่น (Turbidimeter) ผลิตภัณท์ HACH รุ่น 2100Q
5. เครื่องผสมสาร (Mixture) ผลิตภัณท์ FINEPCR รุ่น VX
6. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
7. เครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS) ผลิตภัณท์ Bruker รุ่น Series 3XO
8. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ผลิตภัณท์ Sartorius รุ่น Quintix 224S-1CEU
9. เครื่องเขย่า (Shaker) ผลิตภัณท์ New Brunswick รุ่น INNOVA 40
10. ตู้ดูดควัน ผลิตภัณท์ Pro Lab รุ่น DEA2014 Plus
11. กระดาษกรอง GF/C ขนาดรูเปิด 1.2 ไมโครเมตร ผลิตภัณท์ Whatman
12. กระดาษกรองขนาดรูเปิด 0.45 ไมโครเมตร ผลิตภัณท์ Whatman
13. ชุดกรองแบบสุญญากาศ (Vacuum pump)
14. เครื่องแก้วที่จำเป็น ได้แก่ บีกเกอร์ บิวเรตต์ หลอดหยดสาร กระจบอกตวง ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ หลอดทดลองชนิดมีฝาปิด ปิเปตต์ แท่งแก้วคนสาร
15. ไมโครปิเปต ผลิตภัณท์ Transferpette รุ่น S Pipette
16. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Heating Block) ผลิตภัณท์ Memmert รุ่น WNB 22
17. ปัมป์สูบน้ำ ผลิตภัณท์ Masterflex รุ่น Model 77202-50

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. 1,2,3 ไตรคลอโรโพรเพน 99+% ($C_3H_5Cl_3$) (internal standard)
2. 2,3 ไดโบรโมโพรพิโอนิกแอซิด 99+% ($C_3H_4Br_2O_2$) (surrogate standard)
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)
4. คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)
5. โซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส (Na_2SO_4)

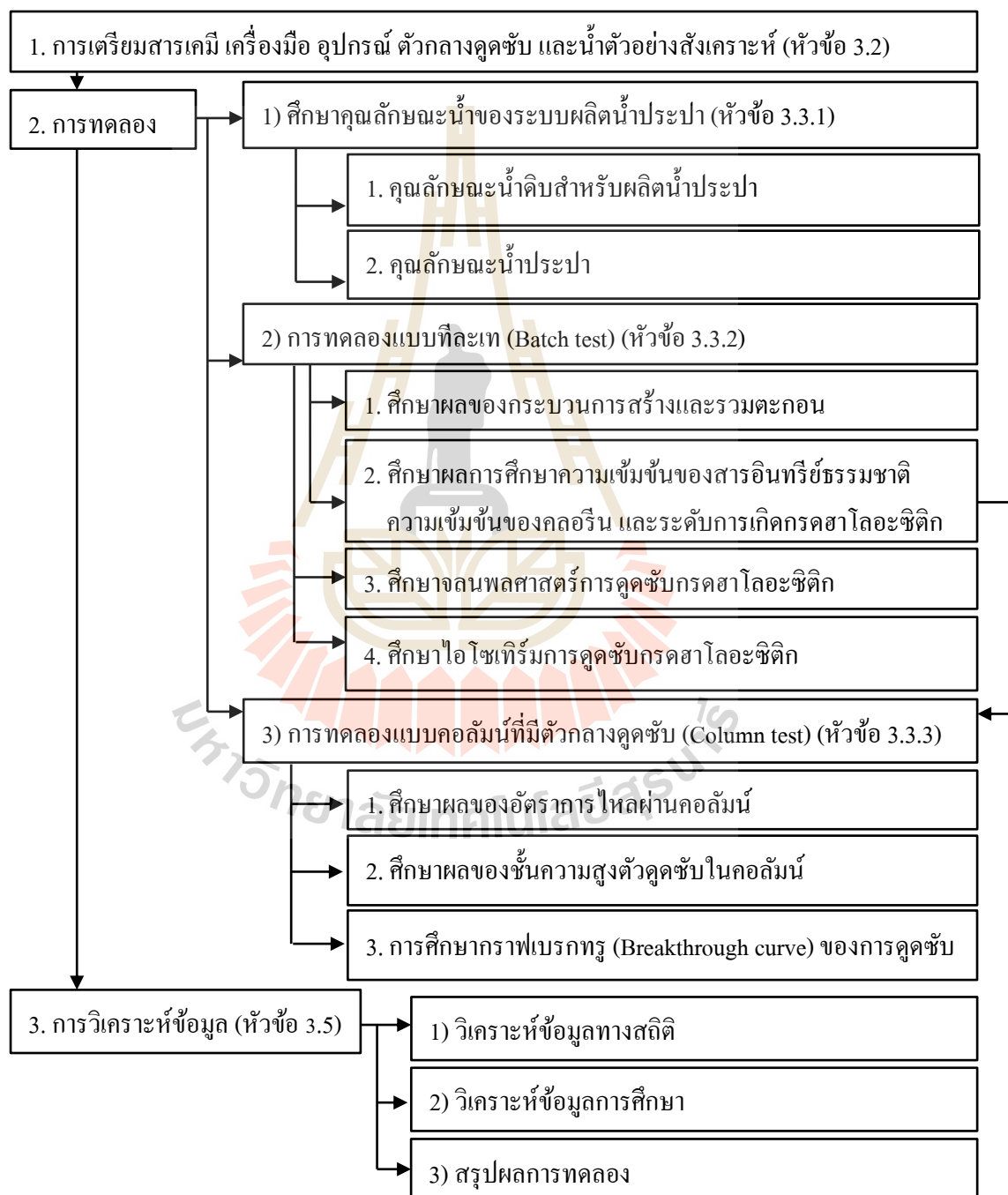
6. เมทิล เทอร์เทียรี บิวทิล อีเทอร์ ($C_5H_{12}O$)
7. เมทานอล (CH_3OH)
8. โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)
9. กรดอะซิติกเข้มข้น (Conc. CH_3COOH)
10. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI)
11. resublimed I_2 (CAS 7553-56-2)
12. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
13. แป้งมัน
14. แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ($CaOCl_2 \cdot 4H_2O$)
15. โซเดียมโซโอสัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)
16. สารละลายกรดฮาโลอะซิติกมาตรฐาน (Standard mixtures of HAAs) ผลิตภัณฑ์

Supelco

17. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
18. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพราเลท ($C_8H_5KO_4$)
19. Polyaluminum chloride (PACl)
20. Cationic polymer
21. ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon โดยได้รับการสนับสนุนจากบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด มีคุณสมบัติดังนี้
 - ความหนาแน่น 0.53 กรัมต่อมิลลิลิตร
 - ความชื้น 8 % w/w
 - พื้นที่ผิว 1,100 ตารางเมตรต่อกรัม
 - Iodine Number 1,050 มิลลิกรัมต่อกรัม
22. น้ำกลั่น (Distilled water)
23. น้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาจากอ่างเก็บน้ำสุระของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคกกรวด และอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกา
24. น้ำประปาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หมู่บ้านโคกกรวด และหมู่บ้านหนองรังกา

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา 2) การทดลองแบบทีละเท (Batch test) และ 3) การทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test) ขั้นตอนการศึกษาและรูปแบบการทดลองในภาพรวม แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษา

3.3.1 การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบการผลิตน้ำประปา

การศึกษาคคุณลักษณะน้ำของระบบการผลิตน้ำประปาในการศึกษานี้มีการศึกษาน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา และน้ำประปา มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) ในน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา และปริมาณความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติก (HAA₅) ในน้ำประปาโดยทั่วไป ซึ่งคุณลักษณะของน้ำที่ศึกษาเบื้องต้นจะใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ที่ใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับ ทั้งนี้ดัชนีที่เป็นตัวแทนของ NOMs ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา ได้แก่ DOC (มันซินต์นัลเวสต์, 2545) ซึ่งค่า DOC จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.1 นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัด HAA₅ ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาด้วย โดยกำหนดสถานที่เก็บตัวอย่างกลุ่มตัวอย่าง และจุดเก็บตัวอย่าง แสดงตารางที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. สถานที่และกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่ใช้กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนโดยใช้แหล่งน้ำดิบประเภทผิวดิน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารคลอรีน ได้แก่ ระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา คือ ระบบผลิตน้ำประปาน้ำประปาจากหมู่บ้านโคกกรวด และระบบผลิตน้ำประปาน้ำประปาจากหมู่บ้านหนองรังกา

การศึกษานี้ใช้น้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาและน้ำประปา โดยศึกษาตัวอย่างน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสระที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคกกรวดที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกาที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา สำหรับตัวอย่างน้ำประปามาจากระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยท่อการจ่ายน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแบ่งเป็น 3 เส้นท่อหลัก คือ ท่อเส้นที่ 1 จ่ายน้ำประปาจากหน่วยผลิตน้ำประปาไปเก็บยังหอถังสูง ท่อเส้นที่ 2 จ่ายน้ำประปาจากหน่วยผลิตน้ำประปาไปยังแต่ละบริเวณกลุ่มอาคารหอพัก และท่อเส้นที่ 3 เป็นท่อจ่ายน้ำประปารวมระหว่างท่อเส้นที่ 1 และท่อเส้นที่ 2 ซึ่งจ่ายน้ำไปยังแต่ละบริเวณกลุ่มอาคารเรียน และระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา คือ น้ำประปาจากหมู่บ้านโคกกรวด และน้ำประปาจากหมู่บ้านหนองรังกา ซึ่งช่วงเวลาเก็บตัวอย่างน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาและน้ำประปาอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560

2. จุดเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาเก็บจากอ่างเก็บน้ำสุระ อ่างเก็บน้ำหมู่บ้าน โศกกรวด และอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกา มีการเก็บตัวอย่างน้ำดิบบริเวณจุดสูบน้ำเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาของแต่ละแห่ง สำหรับตัวอย่างน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีการสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำประปาของอาคารภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีซึ่งพิจารณาจากอาคารที่มีการอุปโภคน้ำประปาโดยบุคคลากร นักศึกษา มีการเก็บตัวอย่างน้ำประปา 3 จุด คือต้นท่อจ่ายน้ำ กลางท่อจ่ายน้ำ และปลายท่อจ่ายน้ำ เฉพาะการจ่ายน้ำประปาท่อเส้นที่ 1 และท่อเส้นที่ 2 เนื่องจากท่อเส้นที่ 3 เป็นการจ่ายน้ำประปา 2 ทาง ซึ่งไม่สามารถลำดับจุดเก็บตัวอย่างน้ำได้ และตัวอย่างน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี โดยทั้ง 2 หมู่บ้าน มีการเก็บตัวอย่างน้ำประปา 3 จุดเหมือนกัน คือต้นท่อจ่ายน้ำ กลางท่อบ้านผู้ใช้น้ำ และปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งการที่กำหนดจุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ดัชนีของคุณภาพน้ำที่ต่างกัน โดย การหาค่าพีเอช ค่าความขุ่น ค่า DOC และค่า HAA₅ ในน้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา ก่อนที่เข้าระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ และวิเคราะห์หาค่าคลอรีนอิสระคงค้าง ค่า HAA₅ สำหรับน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้ว

ตารางที่ 3.1 สรุปสถานที่และจุดเก็บตัวอย่างน้ำ

สถานที่เก็บตัวอย่าง	ประเภทน้ำที่เก็บ	จุดเก็บตัวอย่าง	ดัชนีคุณภาพน้ำในการวิเคราะห์	หมายเหตุ
ประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	น้ำดิบ	จุดสูบน้ำเข้าสู่ระบบประปา (อ่างสุระ)	- ค่าพีเอช - ค่าความขุ่น - ค่า DOC - ค่า HAA ₅	-
	น้ำประปา	หน่วยผลิตน้ำประปา	- ค่าคลอรีนอิสระคงค้าง - ค่า HAA ₅	ต้นท่อจ่ายน้ำ
		หอพักสุรนิวศ 15 ¹		ท่อเส้นที่ 1
		อาคารบริหาร ¹		ท่อเส้นที่ 1
		โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ²		ท่อเส้นที่ 1
		หอพักสุรนิวศ 13 ¹		ท่อเส้นที่ 2
		โรงอาหารกาสะลองคำ ¹		ท่อเส้นที่ 2
		หอพักสุรนิวศ 16 ¹		ท่อเส้นที่ 2

ตารางที่ 3.1 สรุปสถานที่และจุดเก็บตัวอย่างน้ำ (ต่อ)

สถานที่เก็บ ตัวอย่าง	ประเภทน้ำที่ เก็บ	จุดเก็บตัวอย่าง	ดัชนีคุณภาพน้ำ ในการวิเคราะห์	หมายเหตุ	
ประปา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี	น้ำประปา	สถานกีฬาและสุขภาพ ²	- ค่าคลอรีน	ท่อเส้นที่ 2	
		อาคารบ้านพักบุคลากร	อิสระคงค้าง	ท่อเส้นที่ 3	
		หอพักสุชนิवास	- ค่า HAA ₅	ท่อเส้นที่ 3	
		อาคารเรียนรวม 1		ท่อเส้นที่ 3	
		โรงอาหารเรียนรวม		ท่อเส้นที่ 3	
		โรงอาหารกลาง		ท่อเส้นที่ 3	
ประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา					
- หมู่บ้าน โคกกรวด	น้ำดิบ	จุดสูบน้ำเข้าสู่ระบบประปา (อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคก กรวด)	- ค่าพีเอช	-	
			- ค่าความขุ่น		
	- ค่า DOC				
	- ค่า HAA ₅				
น้ำประปา	ต้นท่อจ่ายน้ำ	- ค่าคลอรีน	-		
	กลางท่อจ่ายน้ำ	อิสระคงค้าง	-		
	ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ	- ค่า HAA ₅	-		
- หมู่บ้าน หนองรังกา	น้ำดิบ	จุดสูบน้ำเข้าสู่ระบบประปา (อ่างเก็บน้ำหมู่บ้าน หนองรังกา)	- ค่าพีเอช	-	
			- ค่าความขุ่น		
			- ค่า DOC		
	น้ำประปา	ต้นท่อจ่ายน้ำ	- ค่าคลอรีน		-
		กลางท่อจ่ายน้ำ	อิสระคงค้าง		-
		ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ	- ค่า HAA ₅		-

หมายเหตุ ¹ กลางท่อจ่ายน้ำประปา

² ปลายท่อจ่ายน้ำประปา

การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบการผลิตน้ำประปาผลที่ได้จากค่าดัชนีที่เป็นตัวแทนของ NOMs ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระสำหรับใช้ใน ระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคกกรวด สำหรับใช้ใน ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกา สำหรับใช้ใน ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา ที่ตรวจวัดได้จะใช้เป็นข้อมูลในการศึกษา ประสิทธิภาพการกำจัด NOMs ด้วยการศึกษผลของกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนของ การทดลองแบบทีละเท (Batch test)

ค่าปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านจากหมู่บ้านโคกกรวด และระบบผลิตน้ำประปาจาก หมู่บ้านหนองรังกา ที่ตรวจวัดได้จะใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ในน้ำ ด้วยการศึกษผลความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และ ระดับการเกิด HAA₅ ของการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

3.3.2 การทดลองแบบทีละเท (Batch test)

การทดลองแบบทีละเท (Batch test) การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลอง กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกำจัดกรดฮาโลอะ ซิดิก ไปใช้ในการดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test) ขั้นตอนการศึกษา มีดังนี้

1. การศึกษาผลของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ในการกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ

ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสร้างตะกอนและรวม ตะกอนในการกำจัดความขุ่น และ DOC ด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test) โดยใช้ความเข้มข้นของสาร สร้างตะกอน PACI เท่ากับ 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารช่วยสร้าง ตะกอน Cationic polymer เท่ากับ 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (ทัศนา เกื้อแสง, 2553) ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1.1 เติมน้ำดิบซึ่งเป็นน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระ 1,000 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ (ที่วิเคราะห์ความขุ่น DOC และ HAA₅แล้ว)

1.2 ใช้ปิเปตต์ดูดสารสร้างตะกอน PACI ที่เตรียมไว้ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์จะให้ความเข้มข้นในแต่ละบีกเกอร์เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

1.3 กวนเร็วด้วยอัตราเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที และควบคุมระดับฟิเอชของน้ำเท่ากับ 7 ด้วยสารละลาย H_2SO_4 หรือ NaOH

1.4 กวนช้าด้วยอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับการเติมสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer โดยใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่เตรียมไว้ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 กรัมต่อลิตร ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในแต่ละบีกเกอร์ จะให้ความเข้มข้นสารละลายของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ในบีกเกอร์เป็น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และควบคุมระดับฟิเอชของน้ำเท่ากับ 7 (Uyak et al., 2007) ด้วยสารละลาย H_2SO_4 หรือ NaOH

1.5 ทิ้งให้ตกตะกอน 60 นาที

1.6 นำน้ำใสส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์ความขุ่น และอีกส่วนหนึ่งนำไปกรองผ่านกระดาษกรองขนาดรูเปิด 0.45 ไมโครเมตร เพื่อวิเคราะห์หาค่า DOC จากค่า UV_{254} ดังสมการ 2.1

1.7 นำน้ำใสส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์ HAA_5 ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer ตามวิธีของ US EPA Method 552.2 (US.EPA., 1995) ดังแสดงในภาคผนวก ก.

1.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1 - 1.7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน PACI เท่ากับ 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer เท่ากับ 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน PACI และความเข้มข้นของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer

ความเข้มข้นของ PACI (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ Cationic polymer (มก./ล.)
10	0.1
	0.2
	0.3
	0.4
	0.5
20	0.1
	0.2
	0.3
	0.4
	0.5
30	0.1
	0.2
	0.3
	0.4
	0.5
40	0.1
	0.2
	0.3
	0.4
	0.5
50	0.1
	0.2
	0.3
	0.4
	0.5

2. การศึกษาผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิติก

ทำการทดลองโดยใช้สภาวะและผลของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ โดยการเติมสารคลอรีนด้วยความเข้มข้นของ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552) เพื่อให้มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 - 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับในระบบผลิตน้ำประปาสุบจ่ายไปยังผู้บริโภค (การประปานครหลวง, 2553) และด้วยความเข้มข้นของสารคลอรีน 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อให้มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 - 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นค่าเฉลี่ยคลอรีนอิสระคงค้างที่พบในการศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบการผลิตน้ำประปา ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังนี้

2.1 เตรียมสารละลายคลอรีนมาตรฐานความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยนำคลอรีนชนิดเกล็ดความเข้มข้นร้อยละ 60 มา 0.17 กรัม เติมน้ำจำนวน 1 ลิตร และปรับสารคลอรีนให้มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2.2 เติมคลอรีนที่ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในน้ำที่ผ่านกระบวนการสร้างตอนและรวมตะกอน (โดยพิจารณาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำมากที่สุดจากผลการทดลองที่ 1.) ทิ้งไว้ 30 นาที (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2537) ซึ่งเป็นระยะเวลาการสัมผัสสำหรับการเติมคลอรีนในระบบประปา สามารถคำนวณจากสมการที่ 3.1

$$\text{จากสมการ } C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนมาตรฐานที่เตรียมไว้ ในที่นี้
0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

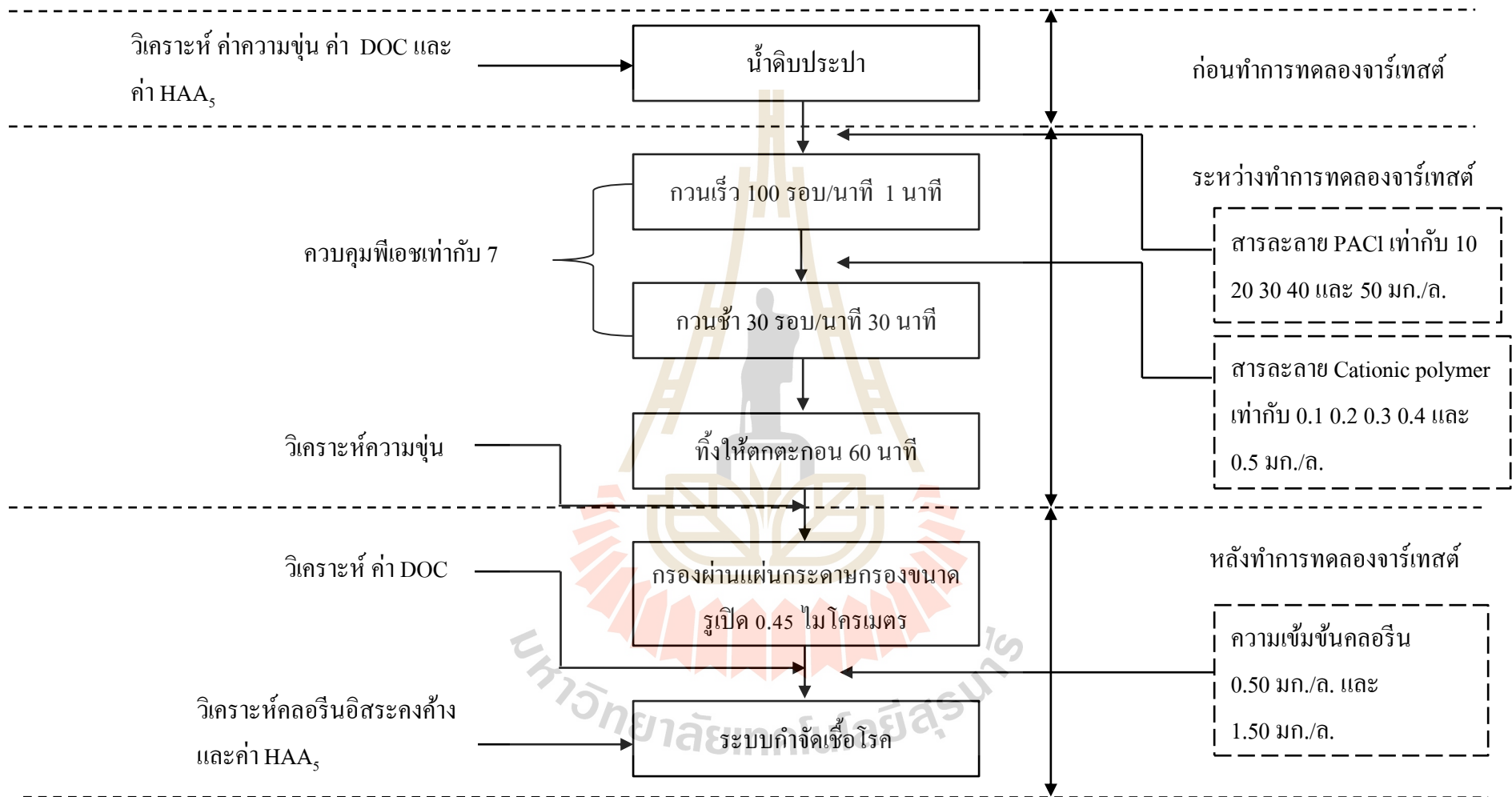
V_1 = ปริมาตรของสารละลายคลอรีนมาตรฐานที่ปีเปิดต้วมา

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างที่มีคลอรีนอิสระคงค้าง 0.50 มิลลิกรัม
ต่อลิตร

V_2 = ปริมาตรของสารละลายคลอรีนมาตรฐานที่ปีเปิดต้วมารวมกับน้ำ
ตัวอย่าง จนได้ 100 มิลลิลิตร

2.3 นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนมาวิเคราะห์คลอรีนอิสระคงค้าง และวิเคราะห์กรดฮาโลอะซิติกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer ตามวิธีของ US EPA method 552.2 (US.EPA., 1995) ดังแสดงในภาคผนวก ก.

2.4 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1 - 2.3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากับ 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนกระบวนการสร้างและรวมตะกอนด้วยวิธีจาร์เทสต์ และการใช้สารคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค

3. การศึกษาจลนพลศาสตร์บนพื้นผิวตัวกลางดูดซับในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การศึกษาจลนพลศาสตร์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการกำจัดสารปนเปื้อน ได้จากการนำค่าที่ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับระยะเวลา โดยการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาตั้งแต่ 0 10 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง (ชุดิมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) หลังการดูดซับของตัวกลางประเภทถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

3.1 เตรียมน้ำตัวอย่าง HAA₅ สังกะระห์ โดยใช้ น้ำกลั่นที่มีสารละลายผสมของ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เข้มข้น 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (Ratasuk et al., 2008) โดยเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่ US.EPA. (2012) กำหนดคุณภาพในน้ำประปา

3.2 ชั่งถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon 0.05 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ ที่มีน้ำตัวอย่าง HAA₅ สังกะระห์จำนวน 45 มิลลิลิตร

3.3 ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

3.4 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าที่มีความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาทีโดยควบคุมให้อุณหภูมิ เท่ากับ 25 ± 2 องศาเซลเซียส

3.5 เก็บตัวอย่างที่เวลาตั้งแต่ 0 10 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง โดยกรองเอาถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ออกด้วยกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูเปิด 1.2 ไมโครเมตร ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer ตามวิธีของ US EPA method 552.2 (US.EPA., 1995) ดังแสดงในภาคผนวก ก. ซึ่งนำผลการทดลองไปหาลำดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น (ชัยยศ ตั้งสฤติย์กุลชัย, 2554; เตชะ นัตรศิริเวช, 2552) ดังสมการต่อไปนี้

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3.2)$$

ปฏิกิริยาอันดับสอง

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.3)$$

อัตราการดูดซับเริ่มต้น

$$h = k_2 q_e^2 \quad (3.4)$$

- เมื่อ q_t = ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon ณ เวลาต่างๆ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
- q_e = ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon ณ จุดสมดุล (ไมโครกรัมต่อกรัม)
- t = ระยะเวลา (นาที)
- k_1 = ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับหนึ่ง ณ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส (h⁻¹)
- k_2 = ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับสอง ณ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส
- h = อัตราการดูดซับเริ่มต้น (ไมโครกรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง)

4. การศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาลออะซิติก

การศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาลออะซิติกเพื่อทราบความสามารถการดูดซับ และกลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon โดยกำหนด HAA₅ ตั้งคราะห์เข้มข้น 25 50 75 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 และมีวิธีการทดลองดังนี้

4.1 ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 3.1 - 3.6 โดยเปลี่ยน HAA₅ ตั้งคราะห์เป็นเข้มข้น 25 50 75 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเวลาเก็บตัวอย่างได้จากการทดลองข้อ 3. (ที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่เข้าสู่สมดุล) ซึ่งการคำนวณไอโซเทอรั่มการดูดซับ HAA₅ ดังสมการต่อไปนี้ (ชัชยศ ตั้งสติติกุลชัย, 2554)

สมการเส้นตรง ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m \times K_L} \quad (3.5)$$

สมการเส้นตรงไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (3.6)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

ชนิด Coconut shell activated carbon

(ไมโครกรัมต่อกรัม)

q_m = ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

ชนิด Coconut shell activated carbon ที่สภาวะสมดุล

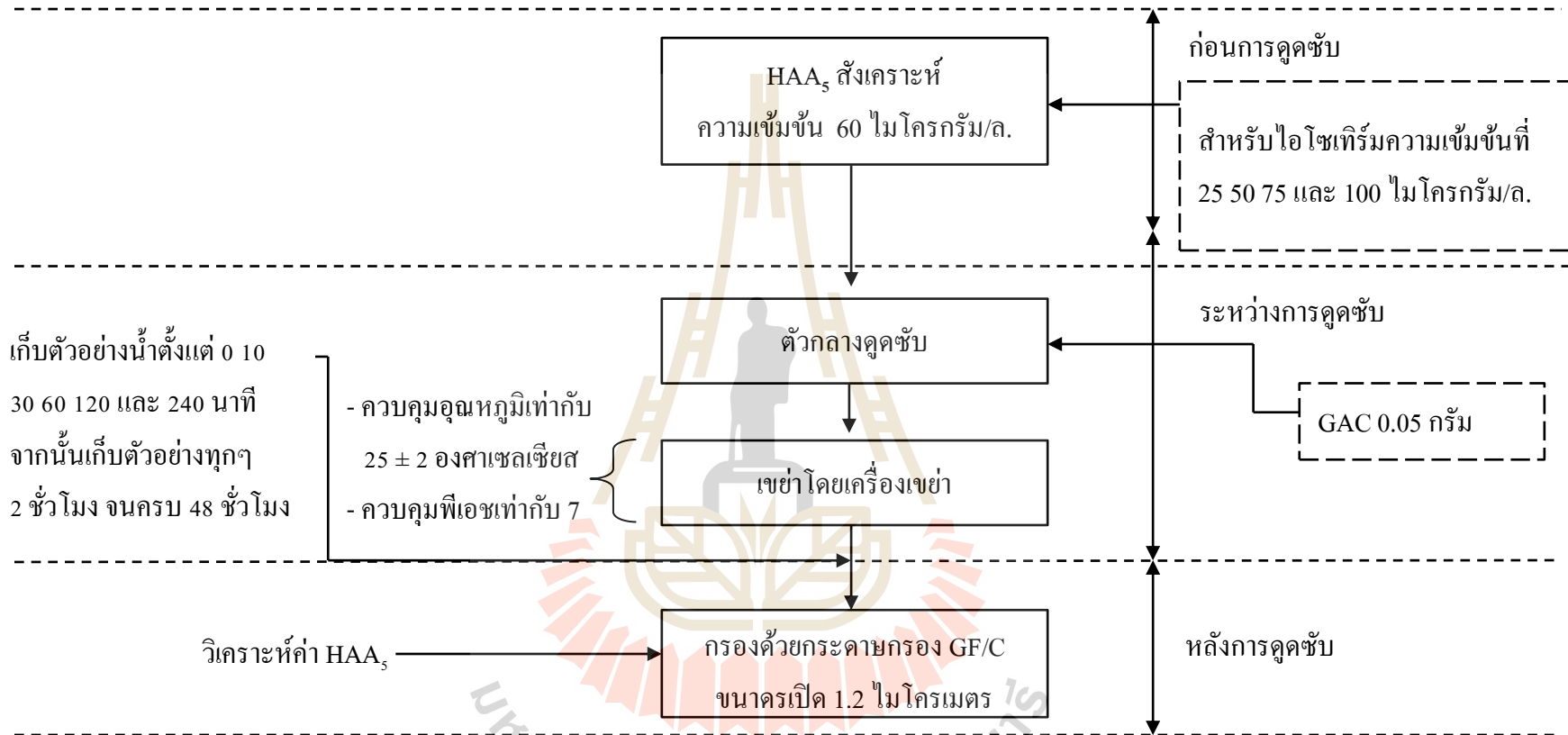
(ไมโครกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของ HAA₅ ที่ถูกดูดซับในสารละลาย

(ไมโครกรัมต่อลิตร)

K_L = ค่าคงที่การดูดติดผิวของการดูดซับแบบแลงเมียร์

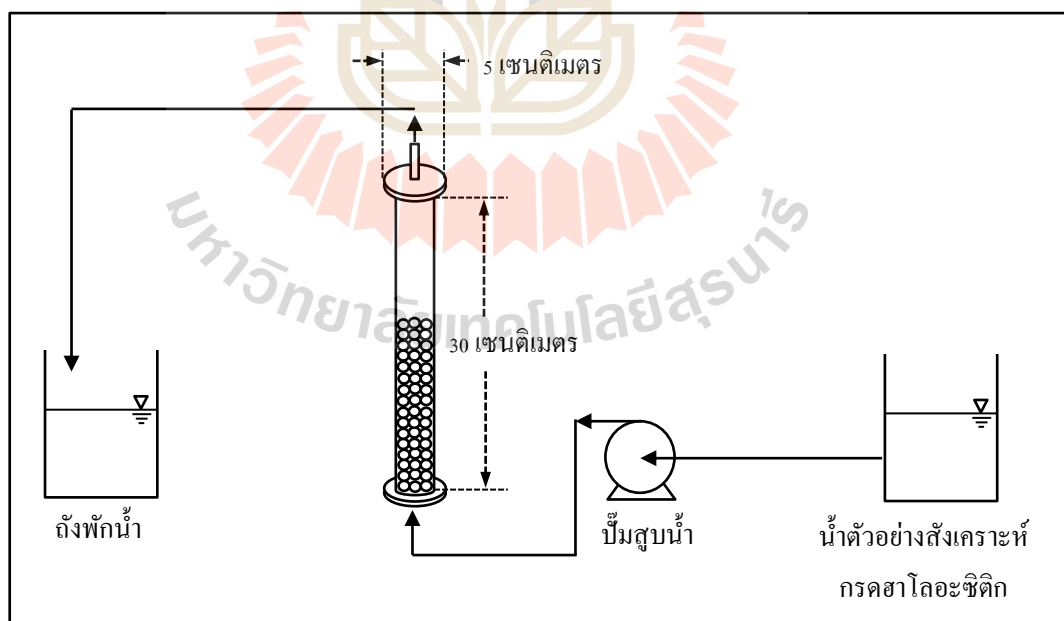
K_F และ $1/n$ = ค่าคงที่การดูดติดผิวของการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการศึกษาจลนพลศาสตร์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับและการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาลออะซีติก

3.3.3 การดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test)

ในการทดลองแบบทีละเท (Batch test) ผลที่ได้ทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมในการกำจัด HAA₅ โดยได้แก่ พีเอช ปริมาณของสารสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอน รวมทั้งความเข้มข้นของสารคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค ตัวกลางดูดซับ และค่าความเข้มข้นต่ำสุดและสูงสุดของ HAA₅ ซึ่งในทดลองแบบนี้จะอาศัยปัจจัยสถานะจากการทดลองแบบทีละเท โดยนำถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่เป็นตัวกลางดูดซับมาใช้เพิ่มในหน่วยการดูดซับแบบคอลัมน์เข้ามาหลังจากผ่านกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนแล้วทำการทดสอบหาความสามารถของตัวกลางดูดซับในการกำจัด HAA₅ ที่ปนเปื้อนในน้ำประปา ซึ่งนำน้ำที่ได้จากการศึกษาผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOMs) สารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ มาใช้ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลในคอลัมน์ และชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับ ดำเนินการทดลองโดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่ได้ออกแบบไว้ คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร (ภูวคล ศิริสินเลิศ, 2552) ความสูง 30 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (Hensuk et al., 2012; Nwabanne et al., 2012) โดยอาศัยค่าแนะนำเบื้องต้นของ U.S.EPA (1998) ที่กำหนดความสูงมีค่าระหว่าง 10 -100 เซนติเมตร โดยใช้ชุดทดลองแบบคอลัมน์แนวตั้งให้ตัวอย่างน้ำประปาไหลเข้าคอลัมน์จากด้านล่าง และไหลออกทางด้านบน โดยใช้เครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 3.4 ชุดทดลองแบบคอลัมน์

การทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ และชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ศึกษากราฟเบรกทู (Breakthrough curve) หากความสามารถการบำบัด HAA₅ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์ ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.5 และมีวิธีการทดลองดังนี้

1. การศึกษาผลของอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก

การกำจัด HAA₅ ด้วยการทดลองโดยใช้อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่แตกต่างกัน คือ 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง เป็นช่วงอัตราการไหลที่ไม่ทำให้เกิดการอุดตันในวัสดุตัวกลาง (ภูวตล ศิริสินเลิศ, 2552) มีวิธีการทดลองดังนี้

1.1 นำน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของ HAA₅ ที่ได้จากผลการศึกษาความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ ของทดลองแบบทีละเท (Batch test) (ความเข้มข้นที่เกิดขึ้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร) ควบคุมพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 7 ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์

1.2 นำตัวกลางดูดซับ คือ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มาใส่ในคอลัมน์สูง 10 เซนติเมตร และปล่อยน้ำกลั่นเข้าสู่คอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง แล้วรอจนให้ความเร็วการไหลของน้ำที่เข้าไปในตัวกลางเท่ากับความเร็วการไหลของน้ำออก เพื่อไล่อากาศในตัวกลางและเพื่อให้ น้ำไหลเข้าไปในตัวกลางด้วยอัตราคงที่ จากนั้นจึงเปลี่ยนสารที่ไหลผ่านเข้าตัวกลางจากน้ำกลั่นเป็นน้ำตัวอย่าง

1.3 เก็บตัวอย่างทุก ๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer ตามวิธีของ US EPA method 552.2 (US.EPA., 1995) ดังแสดงในภาคผนวก ก.

1.4 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1 -1.3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง

2. การศึกษาผลของชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก

ปริมาณที่แตกต่างกันของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้เป็นตัวกลางดูดซับมีผลต่อการกำจัด HAA₅ จึงทำการทดลองผลของถ่านกัมมันต์ที่มีชั้นความสูง 10 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ (Hensuk et al.,) เพื่อนำผลการทดลองของชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับที่สามารถกำจัด

HAA₅ ได้มากที่สุดไปใช้ในการศึกษากราฟเบรกทรู (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

2.1 ทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1.1-1.4 โดยเปลี่ยนชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับเป็น 15 และ 20 เซนติเมตร ตามลำดับ และอัตราการไหลที่ใช้พิจารณาจากผลการวิเคราะห์การกำจัด HAA₅ ได้มากที่สุดจากผลของอัตราการไหลผ่านคอลัมน์

3. การศึกษากราฟเบรกทรู (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

การหาความสามารถการบำบัด HAA₅ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์สามารถศึกษาจากกราฟเบรกทรูโดยทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1.1 - 1.4 ซึ่งอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ของ HAA₅ และชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับที่ใช้พิจารณาจากประสิทธิภาพกำจัด HAA₅ ได้ดีที่สุด โดยเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง จนกระทั่งความเข้มข้นของ HAA₅ ที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าคงที่ ผลจากการสร้างกราฟเบรกทรูสามารถทราบความสามารถการบำบัด HAA₅ ความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) และระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์ (ภูวคณ ศิริสินเลิศ, 2552) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ} = \frac{\sum_{i=1}^T (C_e - C_{ei}) dV_i}{\text{Weight(media)}} \quad (3.7)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของ HAA₅ ที่จุดหมดสภาพ
(ร้อยละ 95 ของความเข้มข้นเริ่มต้น)

C_{ei} = ความเข้มข้นของ HAA₅ (Solute) ที่ผ่านระบบ ณ ปริมาตรที่ i

V_i = ปริมาตร ณ เวลา i

ความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone หรือ Sorption) คือชั้นการดูดซับที่สารละลายกำลังดูดซับอนุภาคของสารถูกดูดซับหาโดยสมการที่ 3.8

$$L_m = L \left[1 - \frac{t_b}{t_s} \right] \quad (3.8)$$

- เมื่อ L_m = ความยาวของ Mass transfer zone
 L = ความสูงทั้งหมดของชั้นถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon
 t_b = เวลาที่ใช้จากเริ่มจนถึง HAA_5 เริ่มออกมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้ (Breakthrough time)
 t_s = เวลาที่ใช้จากเริ่มจนกระทั่งถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon ถูกใช้จนหมด (Time to saturation)

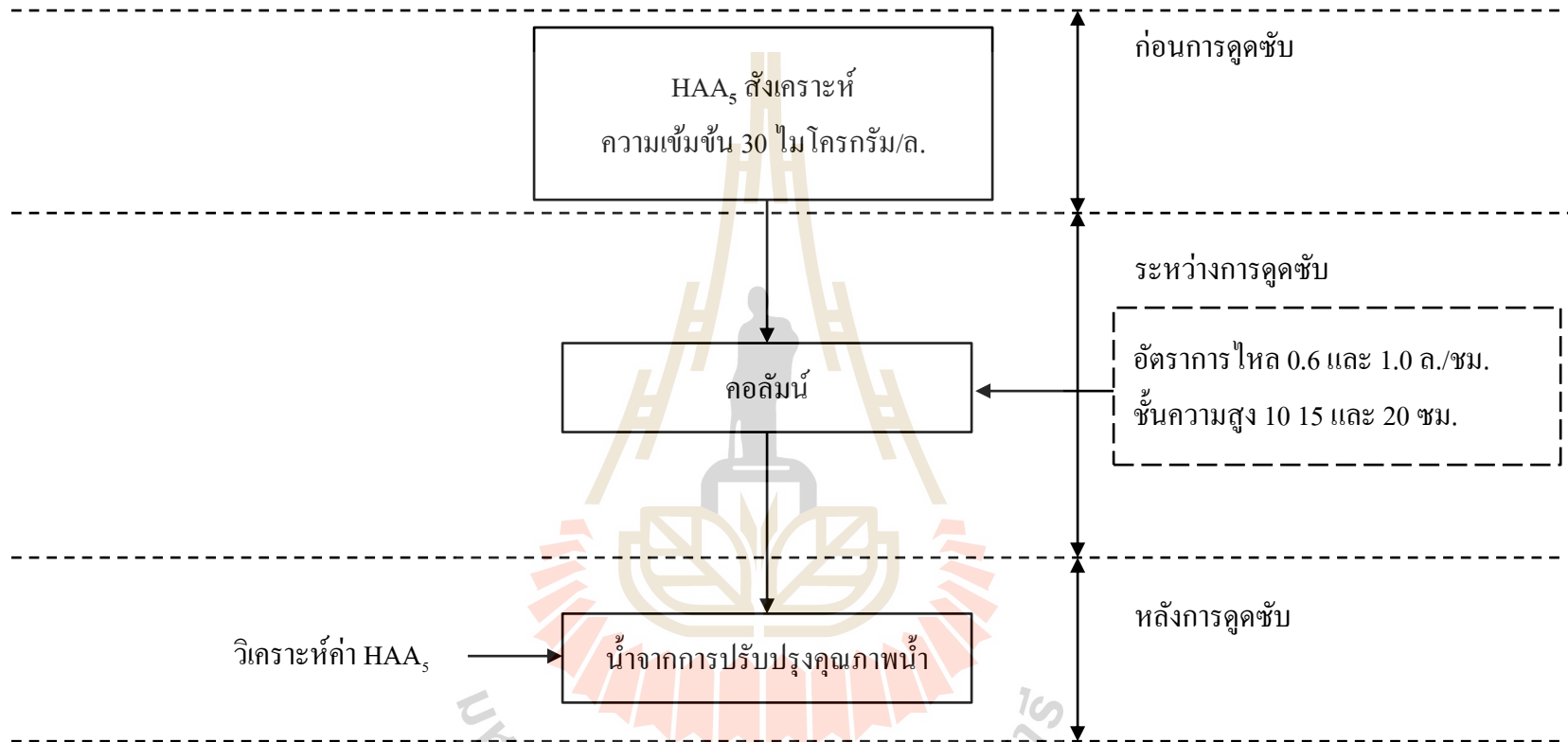
ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบเป็นพารามิเตอร์ใช้ในการออกแบบ โดยที่นำผลการทดลองจากชุดคอลัมน์เพื่อนำไปใช้ในงานจริง โดยใช้วิธี Empty bed contact time (EBCT) ซึ่งหาได้จากสมการ 3.9 และอัตราการใช้สารดูดซับ (Usage rate) ได้จากสมการ 3.10

$$EBCT = \frac{\text{Bed volume}}{\text{Flow rate}} \quad (3.9)$$

- เมื่อ EBCT = เวลาสัมผัสในคอลัมน์
 Bed volume = ปริมาตรของคอลัมน์
 Flow rate = อัตราการไหลของ HAA_5

$$\text{Usage rate} = \frac{\text{Weight of absorbent in column}}{\text{Volume at breakthrough}} \quad (3.10)$$

- เมื่อ Usage rate = อัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon
 Weight of absorbent in column = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์แบบเปลือกชนิด Coconut shell activated carbon ในคอลัมน์
 Volume at breakthrough = ปริมาตรของ HAA_5



รูปที่ 3.5 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test)

3.4 ดัชนีคุณภาพน้ำ และวิธีการวิเคราะห์

การศึกษานี้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำผิวดินหรือน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาและวิธีการเก็บรักษาตัวอย่างด้วยวิธีตาม Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2005) และการวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซีติกในน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ตามวิธีของ US EPA Method 552.2 (US.EPA., 1995) ในภาคผนวก ก. และดังแสดงในตารางที่ 3.3 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำในแต่ละดัชนีคุณภาพน้ำ

ดัชนีคุณภาพน้ำ	วิธีวิเคราะห์	มาตรฐานการอ้างอิง	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	วัดโดยตรง	Standard Method 4500-HB. (APHA et al., 2005)	pH meter
อุณหภูมิ	วัดโดยตรง	-	Thermometer
ความขุ่น	วัดโดยตรง	Standard Method 2130 B (APHA et al., 2005)	Turbidimeter
DOC ¹	Ultraviolet absorption method	Standard method 5910 B. (APHA et al., 2005)	Ultra violet-Visible Spectrophotometer
HAA ₅ ²	HAAs formation potential	Standard method 552.2 (US.EPA., 1995)	Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS)
คลอรีนอิสระคงค้าง	Iodometric method	Standard method 4500-Cl C. (APHA et al., 2005)	Titration

หมายเหตุ ¹กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกระดาษกรองขนาดรูเปิด 0.45 ไมโครเมตร

²กรองน้ำตัวอย่างผ่านแผ่นกระดาษกรอง GF/C ขนาดรูเปิด 1.2 ไมโครเมตร

ตารางที่ 3.4 สภาวะการวิเคราะห์กรดฮาโลอะซิติกโดยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer

รายการ	สภาวะการทำงาน
คอลัมน์ที่ใช้วิเคราะห์ HAA ₅ ของเครื่อง GC-MS	DB-1701[fused silica capillary with chemically bonded (14% cyanopropylphenyl)-methylpolysiloxane], 30 m x 0.25 mm ID, 0.25 µm film thickness.
ระบบการฉีดสารตัวอย่าง	Splitless mode
อุณหภูมิของดีเทกเตอร์	280 °C
อุณหภูมิของอินเจกเตอร์	250 °C
โปรแกรมอุณหภูมิ	เริ่มที่ 35 °C ให้อุณหภูมิกงที่ 10 นาที เพิ่มขึ้นเป็น 75 °C ด้วยอัตรา 5 °C/นาที คงที่ไว้ 15 นาที เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 15 °C/ นาที จนอุณหภูมิเท่ากับ 200 °C อุณหภูมิต่างกับดีเทกเตอร์ 280 °C
เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง	54.46 นาทีต่อตัวอย่าง

ที่มา: US.EPA. (1995); Xie. (2001)

ตารางที่ 3.5 วิธีการเก็บรักษาตัวอย่าง

ดัชนีคุณภาพน้ำ	การเก็บรักษาตัวอย่าง
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	วัดทันที
อุณหภูมิ	วัดทันที
ความขุ่น	แช่เย็นที่ 4°C เก็บได้ 24 ชั่วโมง
DOC	แช่เย็นที่ 4°C เก็บได้ 48 ชั่วโมง
HAA ₅	ปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2.00 ด้วย Conc. H ₂ SO ₄ (สำหรับน้ำที่ใช้คลอรีนเติม 0.1 N Na ₂ S ₂ O ₃ 3 มล./100 มล.) แช่เย็นที่ 4°C เก็บได้ 14 วัน
คลอรีนอิสระคงค้าง	วัดทันที

ที่มา: APHA et al. (2005)

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติตามสมมติฐาน โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ข้อมูลดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานของการวิจัยที่ทดสอบ คือ การใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนสามารถลดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติ (NOMs) คือ DOC ในน้ำดิบ (น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสุระ) สำหรับการผลิตน้ำประปาได้ โดยวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาระบบการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดความขุ่น และ NOMs โดยใช้สถิติ ANOVA Test วิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณความขุ่น และ NOMs ในน้ำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

ตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

H_A : มี μ อย่างน้อย 1 คู่ที่ต่างกัน

กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

เมื่อ μ_1 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ NOMs จากการใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

μ_2 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ NOMs จากการใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

μ_3 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ NOMs จากการใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

μ_4 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ NOMs จากการใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

μ_5 คือ ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ NOMs จากการใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. สมมติฐานของการวิจัยที่ทดสอบ คือ การใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACI ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ในกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนสามารถลดการเกิด HAA₅ ในน้ำประปาได้ โดยวิเคราะห์ค่าทางสถิติของผลการศึกษาคูณลักษณะน้ำของระบบการผลิตน้ำประปานั้นไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาความเข้มข้นของ NOMs ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ ด้วยการหาค่าร้อยละการกำจัด HAA₅ ในน้ำ

3.5.2 การวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการดูดซับและค่าคงที่ต่างๆ โดยใช้สมการไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ดังสมการที่ 3.5 ไอโซเทิร์มแบบฟรุนดลิชดังสมการที่ 3.6 ประเมินหาค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับในการนำมาใช้วิเคราะห์ผลการศึกษา และหาความสามารถในการบำบัด HAA₅ ในคอลัมน์ดังสมการที่ 3.7 การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) ดังสมการที่ 3.8 และการหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบของผลการศึกษากาฟเบรกทธรู (Breakthrough curve) การดูดซับ HAA₅ ดังสมการที่ 3.9

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล และการอภิปรายผล

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและความสามารถในการกำจัดกรดฮาลออะซีติก ทั้ง 5 ชนิด (HAA₅) ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซีติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซีติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซีติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซีติก (MBAA) และกรดไดโบรโมอะซีติก (DBAA) ในน้ำประปา โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะของน้ำเบื้องต้นของระบบผลิตน้ำประปา 2) การทดลองแบบทีละเท (Batch test) และ 3) การทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test) ซึ่งมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา

4.1.1 คุณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา

ในการศึกษาจะใช้น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำสระของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี น้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำของหมู่บ้านโคกกรวด และน้ำผิวดินจากอ่างเก็บน้ำของหมู่บ้านหนองรังกา เพื่อศึกษาคุณลักษณะน้ำเบื้องต้นในน้ำผิวดิน ได้แก่ ความขุ่น และ DOC รวมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าพีเอช) และศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ในน้ำผิวดิน ในช่วงเดือนกรกฎาคม - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560

ผลการศึกษาคุณลักษณะของน้ำเบื้องต้นทางกายภาพ ได้แก่ ความขุ่น พบว่าอ่างเก็บน้ำสระ อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคกกรวด และอ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.30 6.24 และ 4.48 NTU ตามลำดับ โดยมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งค่าความขุ่นสูงสุดของแหล่งน้ำทั่วไปเท่ากับ 100 NTU (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2541) จากการศึกษาความขุ่นสอดคล้องกับการศึกษาของ สุกฤษยา ทับอุไร (2554) ซึ่งได้ศึกษาคุณลักษณะน้ำดิบของอ่างเก็บน้ำสระตลอดทั้งปี พบว่าน้ำดิบมีค่าความขุ่นค่อนข้างน้อยเช่นเดียวกัน เฉลี่ยเท่ากับ 11.67 NTU ซึ่งค่าความขุ่นของน้ำส่วนหนึ่งมาจากตะกอนขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำ สารอินทรีย์ต่างๆ แพลงตอนพืช และแพลงตอนสัตว์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2545)

ผลการศึกษาคูณลักษณะของน้ำเบื้องต้นทางเคมี ได้แก่ DOC ฟิเอช และ HAA₅ สำหรับการตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบ (NOMs) โดยการวิเคราะห์ดัชนีตัวแทนในรูป DOC พบว่าอ่างเก็บน้ำสุระ อ่างเก็บน้ำห่มบ้าน โลกกรวด และอ่างเก็บน้ำห่มบ้านหนองรังกามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.80 5.99 และ 5.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาค่า DOC สอดคล้องกับการศึกษาของทัศน ก่อเส็ง (2553) ซึ่งได้ศึกษาคูณลักษณะน้ำดิบของอ่างเก็บน้ำศรีตรังช่วงฤดูฝน พบว่าน้ำดิบมีค่า DOC เฉลี่ยเท่ากับ 4.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการศึกษาค่า DOC ของสกุลยา ทับอุไร (2554) ซึ่งได้ศึกษาคูณลักษณะน้ำดิบของอ่างเก็บน้ำสุระตลอดทั้งปี พบว่าน้ำดิบมีค่า DOC สูงกว่าผลการศึกษา เฉลี่ยเท่ากับ 13.24 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเป็นเพราะช่วงเวลาและฤดูกาลที่ศึกษาน้ำดิบแตกต่างกัน จึงกล่าวได้ว่าปริมาณของ DOC ในน้ำแปรผันไปตามช่วงเวลาและฤดูกาล โดยทั่วไปในฤดูแล้งมีปริมาณ DOC ปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบสูงกว่าในฤดูฝน ซึ่งสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในน้ำดิบอยู่ในช่วง 1.20 - 10.60 มิลลิกรัมต่อลิตร (Hong et al., 2013) สำหรับการตรวจวัดค่าฟิเอชทั้งอ่างเก็บน้ำสุระ อ่างเก็บน้ำห่มบ้าน โลกกรวด และอ่างเก็บน้ำห่มบ้านหนองรังกา มีค่าฟิเอชค่อนข้างเป็นกลาง โดยมีค่าฟิเอชเฉลี่ยเท่ากับ 8.28 8.05 และ 7.83 ตามลำดับ ส่วนใหญ่ในธรรมชาติจะมีค่าฟิเอชอยู่ในช่วง 5 - 9 (มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน, 2535) และสำหรับ HAA₅ ตรวจไม่พบทั้ง 3 จุดเก็บน้ำดิบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คูณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา

พารามิเตอร์	อ่างเก็บน้ำสุระ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)	อ่างเก็บน้ำห่มบ้าน โลกกรวด	อ่างเก็บน้ำห่มบ้าน หนองรังกา
	ค่าเฉลี่ย ± SD	ค่าเฉลี่ย ± SD	ค่าเฉลี่ย ± SD
ความขุ่น (NTU)	9.30 ± 1.59	6.24 ± 1.83	4.48 ± 0.71
DOC (มก./ล.)	4.80 ± 0.10	5.99 ± 0.31	5.47 ± 0.66
ฟิเอช	8.28 ± 0.54	8.05 ± 0.29	7.83 ± 0.09
HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)	ND	ND	ND

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

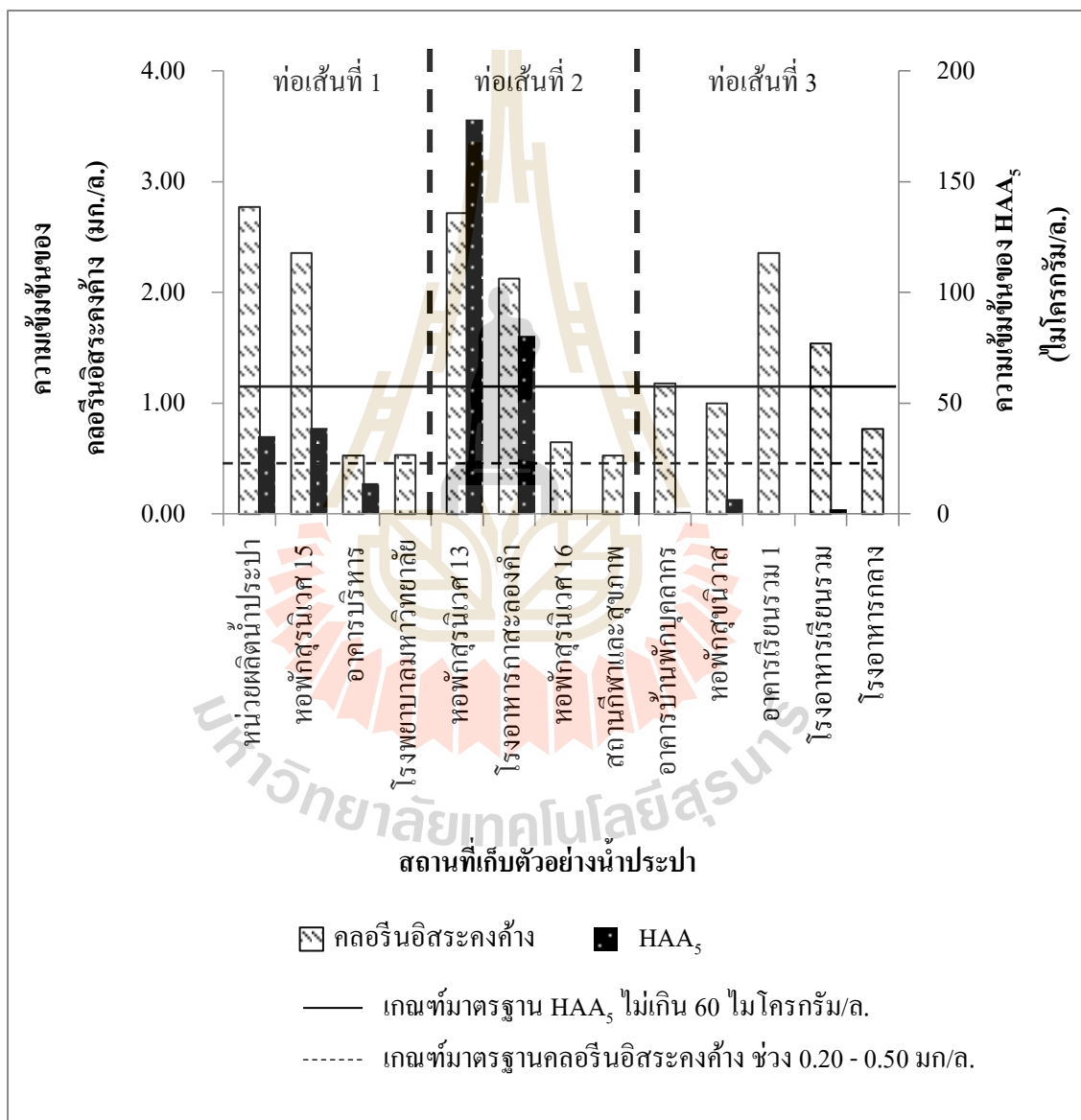
4.1.2 คุณลักษณะของน้ำประปา

ในการศึกษาจะใช้น้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการจ่ายน้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีแบ่งเป็น 3 เส้นท่อหลัก คือ ท่อเส้นที่ 1 จ่ายน้ำประปาผ่านแต่ละอาคารจากหน่วยผลิตน้ำประปาไปเก็บยังหอถังสูง ได้แก่ หน่วยผลิตน้ำประปา หอพักสุรนิวศ 15 อาคารบริหาร โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ท่อเส้นที่ 2 จ่ายน้ำประปาจากหน่วยผลิตน้ำประปา ได้แก่ หอพักสุรนิวศ 13 โรงอาหารกาสะลองคำ หอพักสุรนิวศ 16 สถานกีฬาและสุขภาพ และท่อเส้นที่ 3 เป็นท่อจ่ายน้ำประปารวมระหว่างท่อเส้นที่ 1 และท่อเส้นที่ 2 ได้แก่ อาคารบ้านพักบุคลากร หอพักสุขนิवास อาคารเรียนรวม 1 โรงอาหารเรียนรวม โรงอาหารกลาง โดยการจ่ายน้ำประปาเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 ลำดับจากต้นท่อจ่ายน้ำไปยังปลายท่อจ่ายน้ำ เนื่องการจ่ายน้ำประปาเส้นที่ 3 มีการจ่ายน้ำประปา 2 ทางจากเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 จึงไม่สามารถลำดับการจ่ายน้ำได้ และระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี ได้แก่ ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด และระบบผลิตน้ำประปาหนองรังกา เพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้าง และปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ในช่วงเดือนกรกฎาคม - เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560

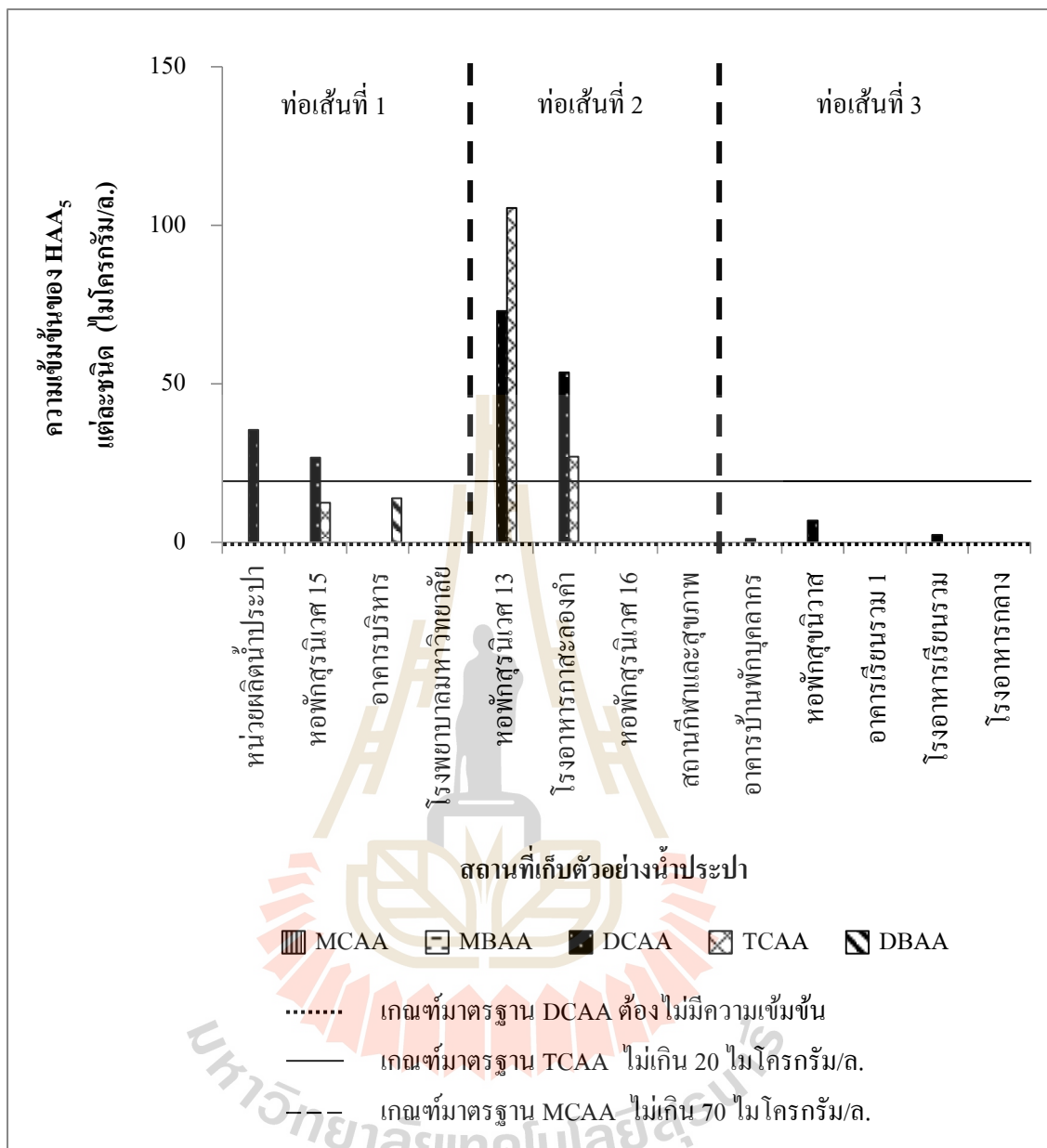
จากผลการศึกษาคูณลักษณะของน้ำประปาเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างของน้ำประปาโดยระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจากท่อการจ่ายน้ำประปาเส้นที่ 1 ได้แก่ หน่วยผลิตน้ำประปา หอพักสุรนิวศ 15 อาคารบริหาร โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าค่าคลอรีนอิสระคงค้างเท่ากับ 2.78 2.36 0.53 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ท่อการจ่ายน้ำประปาเส้นที่ 2 ได้แก่ หอพักสุรนิวศ 13 โรงอาหารกาสะลองคำ หอพักสุรนิวศ 16 สถานกีฬาและสุขภาพ พบว่าค่าคลอรีนอิสระคงค้างเท่ากับ 2.72 2.13 0.65 และ 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และท่อการจ่ายน้ำประปาเส้นที่ 3 ได้แก่ อาคารบ้านพักบุคลากร หอพักสุขนิवास อาคารเรียนรวม 1 โรงอาหารเรียนรวม โรงอาหารกลาง พบว่าค่าคลอรีนอิสระคงค้างเท่ากับ 1.18 1 2.36 1.54 และ 0.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการศึกษาคูณลักษณะของน้ำประปาเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ของน้ำประปาโดยระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 13 จุดของพื้นที่ที่ทำการศึกษา พบปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ทั้งหมด 8 จุดของพื้นที่ที่ทำการศึกษา ได้แก่ หน่วยผลิตน้ำประปา หอพักสุรนิวศ 15 อาคารบริหาร หอพักสุรนิวศ 13 โรงอาหารกาสะลองคำ อาคารบ้านพักบุคลากร หอพักสุขนิवास และโรงอาหารเรียนรวม พบค่าปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 35.32 39.06 13.89 178.23 80.47 1 6.77 และ 2.32 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยหน่วยผลิตน้ำประปา หอพักสุรนิวศ 15 หอพักสุรนิวศ 13 โรงอาหารกาสะลองคำ

อาคารบ้านพักบุคลากร หอพักสุชนิเวศ และ โรงอาหารเรียนรวม พบ DCAA มากที่สุดความเข้มข้นเท่ากับ 35.32 26.65 72.82 53.47 1.00 6.77 และ 2.32 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ TCAA พบที่จุดตรวจหอพักสุชนิเวศ 15 หอพักสุชนิเวศ 13 และ โรงอาหารกาสะลองคำมีความเข้มข้นเท่ากับ 12.41 105.40 และ 27.01 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และ DBAA พบที่จุดตรวจอาคารบริหารมีความเข้มข้นเท่ากับ 13.89 ไมโครกรัมต่อลิตร ส่วน MCAA และ MBAA ตรวจไม่พบทั้ง 13 จุดของพื้นที่ที่ทำการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.2



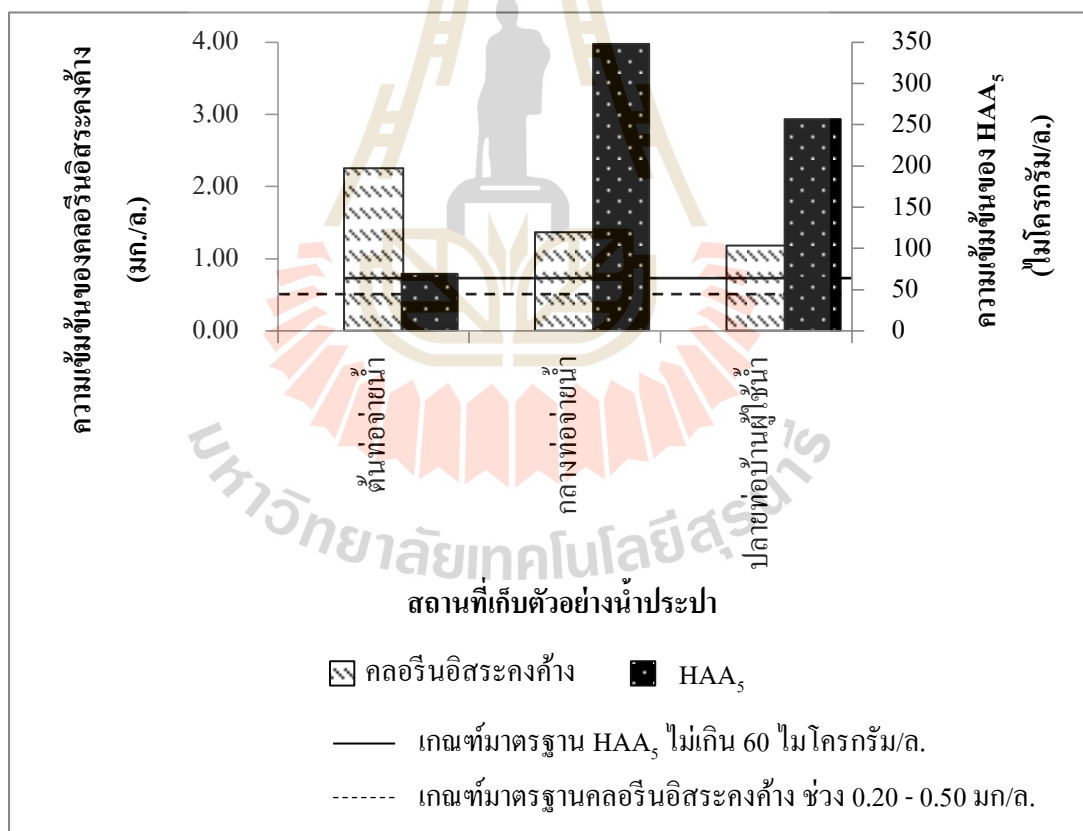
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกในน้ำประปาแต่ละสถานที่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



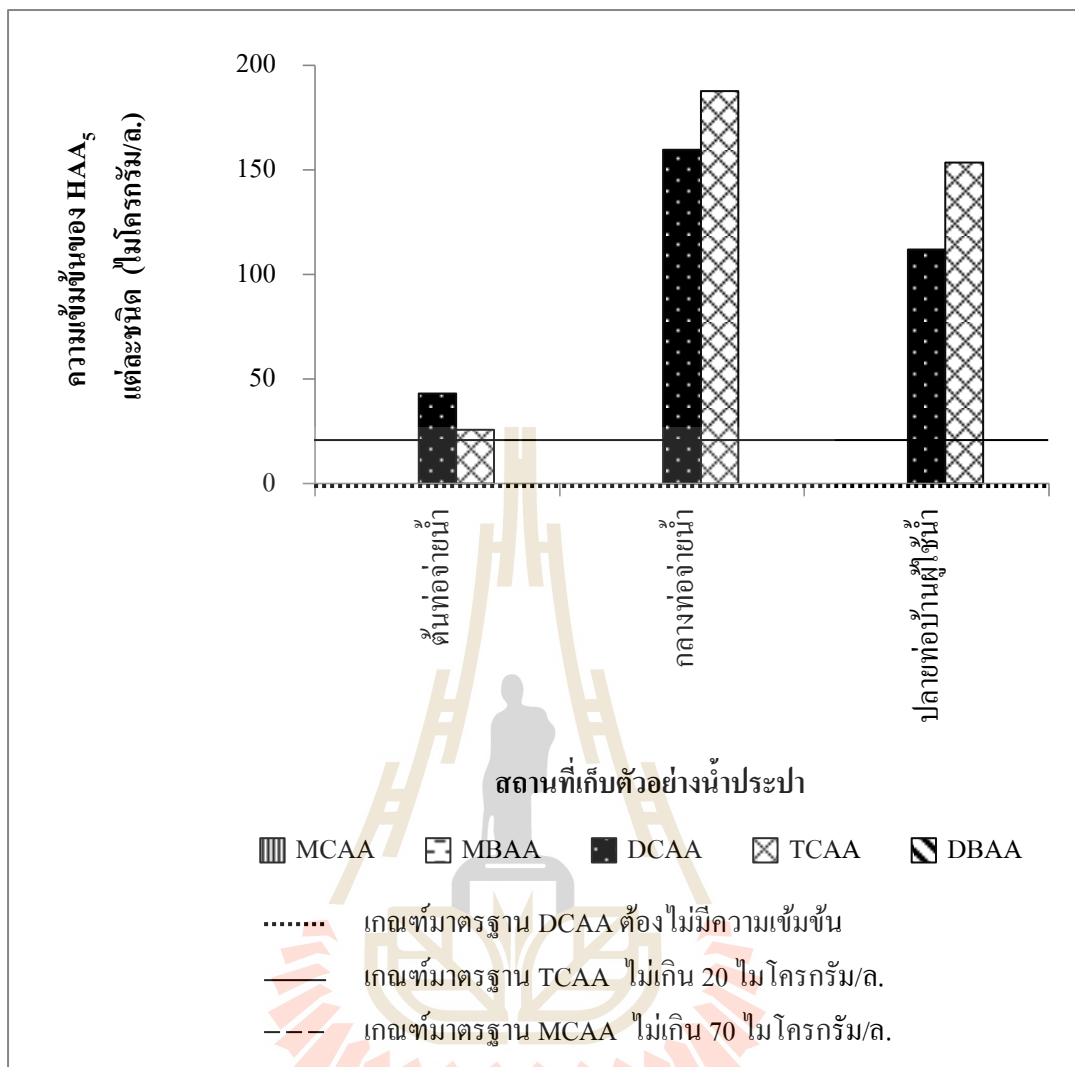
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดในน้ำประปาแต่ละสถานที่ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการศึกษาคุณลักษณะของน้ำเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างของน้ำประปา ที่มีจุดเก็บตัวอย่างน้ำประปา 3 จุด คือ ต้นท่อจ่ายน้ำ กลางท่อจ่ายน้ำ และปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ โดยระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี ได้แก่ ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวด พบว่าค่าคลอรีนอิสระคงค้างที่จุดต้นท่อจ่ายน้ำเท่ากับ 2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จุดกลางท่อจ่ายน้ำเท่ากับ 1.36 มิลลิกรัมต่อลิตร และจุดปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ

เท่ากับ 1.18 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลการศึกษาคคุณลักษณะของน้ำเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ HAA_5 พบว่าปริมาณความเข้มข้นของ HAA_5 ที่จุดต้นท่อจ่ายน้ำเท่ากับ 68.63 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 25.64 และ 42.99 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จุดกลางท่อจ่ายน้ำพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA_5 เท่ากับ 347.34 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 187.69 และ 159.65 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจุดปลายท่อจ่ายน้ำพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA_5 เท่ากับ 265.49 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 153.53 และ 111.96 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วน MCAA MBAA และ DBAA ตรวจไม่พบทั้ง 3 จุดของการเก็บตัวอย่างน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวด ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของ HAA_5 ในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวดดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความเข้มข้น HAA_5 แต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวดดังแสดงในรูปที่ 4.4



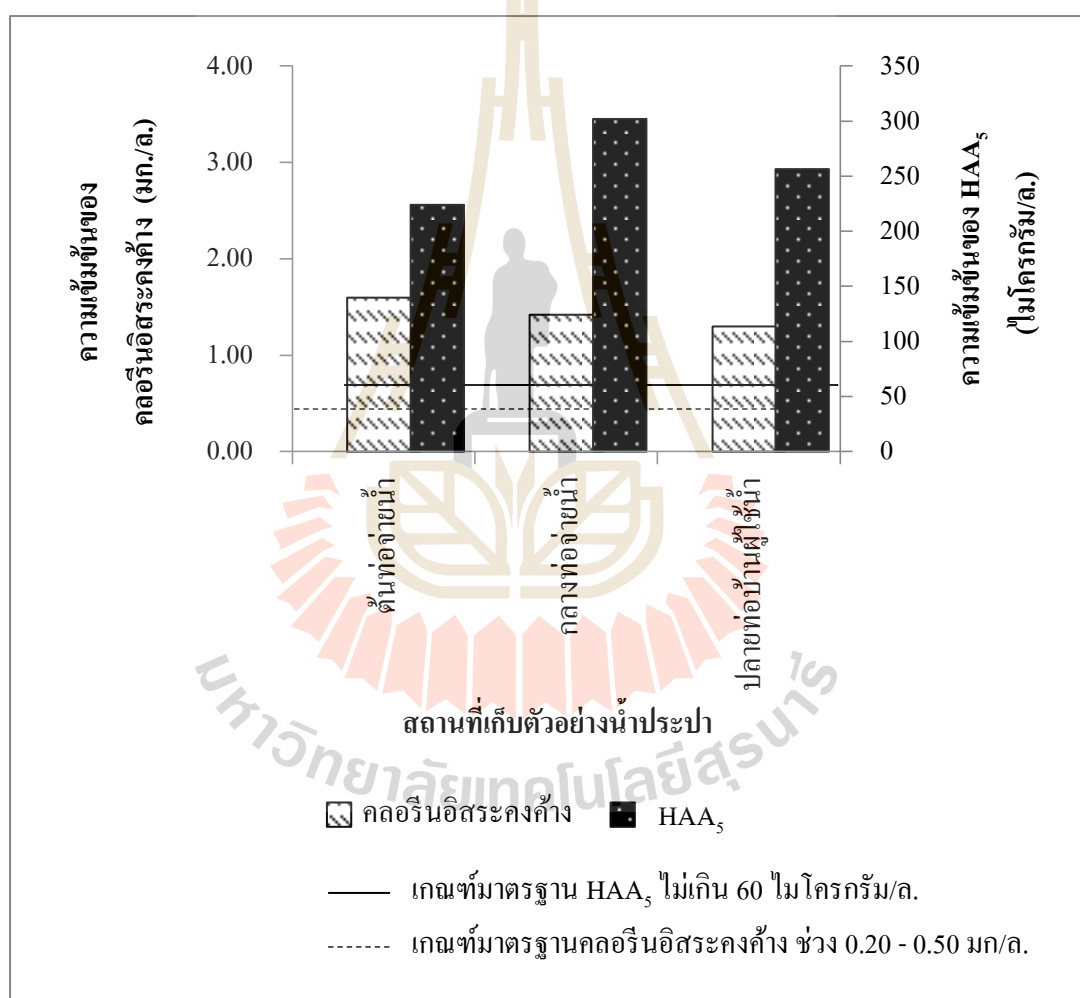
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวด



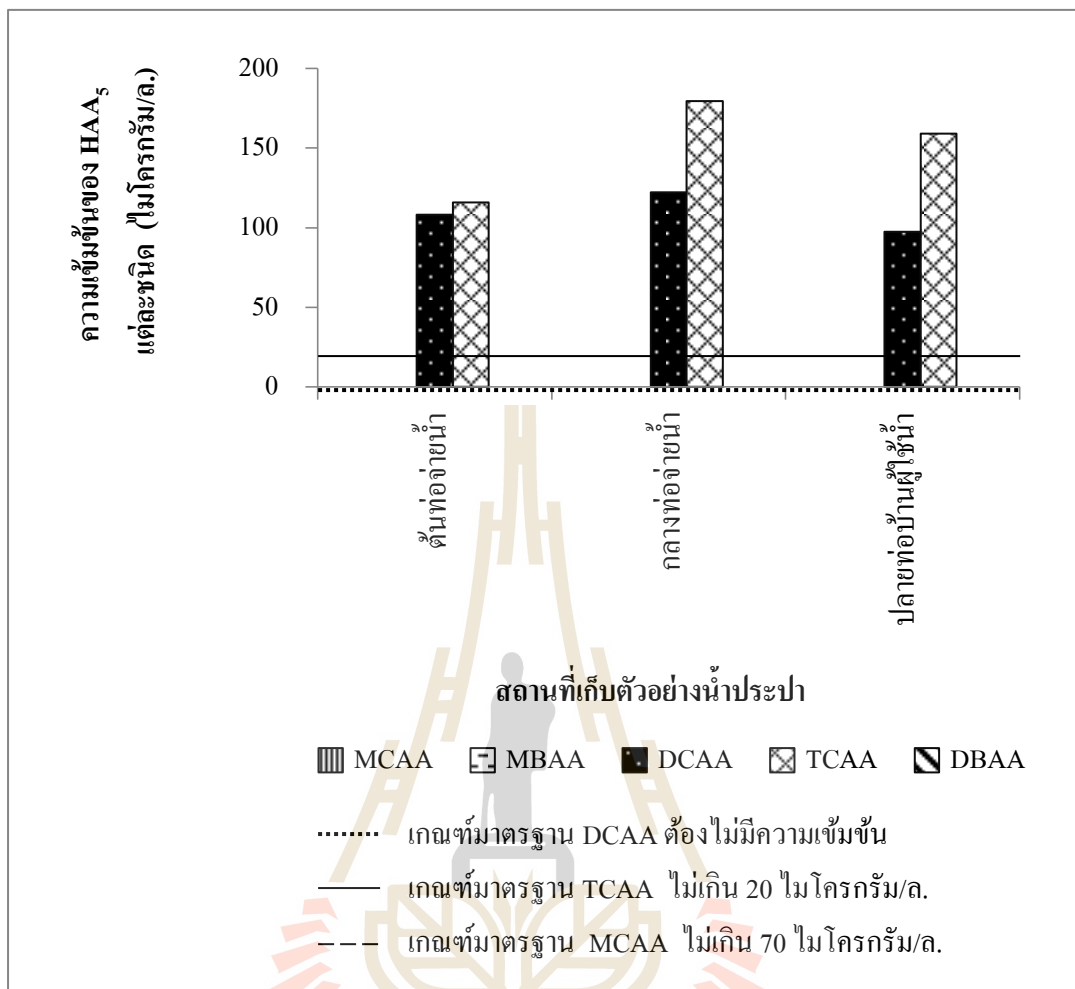
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โคกกรวด

ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังงามีจุดเก็บตัวอย่างน้ำประปา 3 จุด คือ ต้นท่อกำน้ำ กลางท่อกำน้ำ และปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ พบว่าค่าคลอรีนอิสระคงค้างที่จุดต้นท่อกำน้ำเท่ากับ 1.60 มิลลิกรัมต่อลิตร จุดกลางท่อกำน้ำเท่ากับ 1.42 มิลลิกรัมต่อลิตร และจุดปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำเท่ากับ 1.30 มิลลิกรัมต่อลิตร และผลการศึกษาคูณลักษณะของน้ำเพื่อศึกษาปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ที่จุดต้นท่อกำน้ำเท่ากับ 224.07 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 115.84 และ 108.23 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จุดกลางท่อกำน้ำพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 301.81 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 179.55 และ

122.25 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจุดปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 256.50 ไมโครกรัมต่อลิตร โดย TCAA และ DCAA พบความเข้มข้นเท่ากับ 159.14 และ 97.35 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วน MCAA MBAA และ DBAA ตรวจไม่พบทั้ง 3 จุดของการเก็บตัวอย่างน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของ HAA₅ ในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และความเข้มข้น HAA₅ แต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกาดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างและความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดในน้ำประปาในน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา

จากผลการศึกษาระดับค่าคลอรีนอิสระคงค้างในการศึกษานี้ พบว่า ค่าคลอรีนอิสระคงค้างในทุกพื้นที่ที่ทำการศึกษามีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยได้กำหนดให้มีคลอรีนอิสระคงค้างในน้ำประปาไว้ไม่ต่ำกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณสูงสุดไม่ควรเกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปานครหลวง, 2553; เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) และจากการศึกษาของจริยา ยัมรัตน์บวร และสุดจิต ครุจิต (2555) ศึกษาการประเมินคุณภาพน้ำในระบบประปาชุมชน พบว่าระบบประปาชุมชนของจังหวัดนครราชสีมา มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างต่ำกว่าผลการศึกษา ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับคลอรีนที่เติมในกระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่มากเกินไปจนทำให้เกิดคลอรีนอิสระคงค้างสูง มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ สูงขึ้นตาม (Lu et al., 2009) สอดคล้องกับการศึกษาของ Righi et al. (2014) พบว่าความเข้มข้นคลอรีนอิสระคงค้างเฉลี่ยเท่ากับ

1.32 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถทำให้เกิดความเข้มข้นของ HAA₅ เฉลี่ยเท่ากับ 164 ไมโครกรัมต่อลิตร และผลการศึกษาระดับค่าความเข้มข้น HAA₅ ของน้ำประปาภายในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คือ โรงอาหารกาสะลองคำ หอพักสุรนีเวศ 13 และน้ำประปาจากระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารีมีค่า HAA₅ สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ US.EPA. กำหนดไว้โดยกำหนดให้ HAA₅ ไม่สูงกว่า 60 ไมโครกรัมต่อลิตร และน้ำประปาพบ TCAA และ DCAA สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ US.EPA. กำหนดไว้โดยกำหนดให้ TCAA ไม่สูงกว่า 20 ไมโครกรัมต่อลิตร และต้องไม่มี DCAA (US.EPA., 2012) อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่ น้ำจากระบบผลิตน้ำประปาในการศึกษานี้ ผู้ใช้บริการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคเป็นหลัก และจากการศึกษาของ Uansiri (2009) ซึ่งได้ศึกษาระดับค่า HAA₅ ของน้ำประปาในจังหวัดมหาสารคาม พบว่าน้ำประปามีความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 39.37 ไมโครกรัมต่อลิตร และจากการศึกษาของ Villanueva et al. (2003) ที่เมืองอาลากันต์ ประเทศสเปนพบค่าความเข้มข้นของ HAA₅ ในน้ำดื่มเท่ากับ 50.41 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นของ HAA₅ ต่ำกว่าผลการศึกษา

การเกิดปริมาณความเข้มข้น HAA₅ ต่างกันของแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษาอาจเป็นผลมาจากปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอช ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้าง และความเข้มข้นของ NOMs ที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่นกรณีการเกิด HAA₅ ที่หอพักสุรนีเวศ 13 เท่ากับ 178.23 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่ไม่พบการเกิด HAA₅ ที่โรงอาหารกลาง อาจเกิดจากปัจจัยทางสภาพแวดล้อม คือ ระดับค่าพีเอชที่ต่างกันมีผลทำให้เกิด HAA₅ ที่ต่างกัน โดยคลอรีนที่อยู่ในรูป HOCl จะมี Oxidizing power สูงกว่าในรูป OCl⁻ ซึ่งมีประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคได้ดีกว่าและสามารถทำให้เกิดสารตกค้างได้สูงกว่า ซึ่ง HOCl จะสามารถแตกตัวได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ ดังนั้นหอพักสุรนีเวศ 13 มีค่าพีเอช 7.78 ทำให้มีการแตกตัวของ HOCl ได้ประมาณร้อยละ 49.10 ซึ่งสูงกว่าโรงอาหารกลางที่มีค่าพีเอช 7.98 ทำให้มีการแตกตัวของ HOCl ได้ประมาณร้อยละ 23.10 (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) การมีคลอรีนอิสระคงค้างที่ต่างกันมีผลทำให้ความเข้มข้นของ HAA₅ ต่างกัน ตัวอย่างเช่นข้อมูลจากหอพักสุรนีเวศ 13 มีค่าเท่ากับ 2.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าโรงอาหารกลางมีค่าเท่ากับ 0.77 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาของ Lu et al. (2009) พบว่า ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างสูงสามารถทำให้เกิดการตกค้างของ HAA₅ ได้มาก และ NOMs ในน้ำที่ศึกษานี้มีค่าต่างกันของทั้ง 2 ตัวอย่างโดยพบว่าหอพักสุรนีเวศ 13 มีค่าเท่ากับ 2.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าโรงอาหารกลางมีค่าเท่ากับ 2.35 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากการศึกษาของมัลลิกา ปัญญาะ โป และ ผ่องศรี เฝ้าภูรี (2550) พบว่า NOMs ในรูป DOC มีขนาดโมเลกุลใหญ่และประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดสารตกค้างได้มาก รายละเอียดคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปาแสดงดังภาคผนวก ก.

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา HAA₅ สามารถเข้าสู่ร่างกายโดยเส้นทางต่างๆ ได้แก่ ผ่านการดื่มและกิน ทางเดินหายใจ และการซึมเข้าสู่ผิวหนัง จากงานการศึกษาของ Richardson (2005) พบว่า คนที่อาบน้ำเป็นเวลา 10 นาที สามารถรับเอา HAA₅ เข้าสู่ร่างกายได้มากเท่ากับการดื่มน้ำที่มี HAA₅ 5 แก้ว และคำแนะนำของ NIOSH การได้รับสัมผัสทางผิวหนังจาก HAA₅ ที่มีความเข้มข้นสูงสุด 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร ไม่เกินวันละ 10 ชั่วโมง

4.2 ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

4.2.1 ผลการศึกษาของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

ผลการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอน โดยการใช้ PACI เป็นสารสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 10 20 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ Cationic polymer เป็นสารช่วยสร้างตะกอนที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar test) และควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7 เพื่อกำจัดความขุ่น และ NOMs ในน้ำดิบโดยพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ DOC โดยใช้น้ำดิบจากอ่างสุระในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าการใช้สารสร้างตะกอน PACI ต่อสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 10: 0.5 20: 0.3 30: 0.5 40: 0.4 และ 50: 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความขุ่นคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 88.62 98.06 96.84 92.72 และ 19.06 ตามลำดับ และสามารถกำจัด DOC คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 43.28 59.17 64.42 61.65 และ 28.99 ตามลำดับ

การกำจัดความขุ่น พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นของ PACI ที่ 10 - 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 - 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ PACI ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้มีผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จาก PACI จำนวนมากขึ้น ซึ่งเป็นเป่าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ให้สามารถรวมกลุ่มเป็นฟล็อกขนาดใหญ่เพียงพอต่อการตกตะกอน ร่วมกับการใช้ Cationic polymer ซึ่งเป็นตัวช่วยให้มีการเพิ่มเป่าสัมผัสและเพิ่มน้ำหนักให้กับฟล็อกให้สามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น สำหรับอัตราส่วนความเข้มข้นของ PACI ที่ 40 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 0.4 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นลดลง เนื่องจาก PACI ที่มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นทำให้มีผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปสำหรับเป็นเป่าให้กับอนุภาคคอลลอยด์ รวมทั้งสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่ความเข้มข้นมากขึ้นกลับไปทำลายเสถียรภาพของฟล็อกจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง

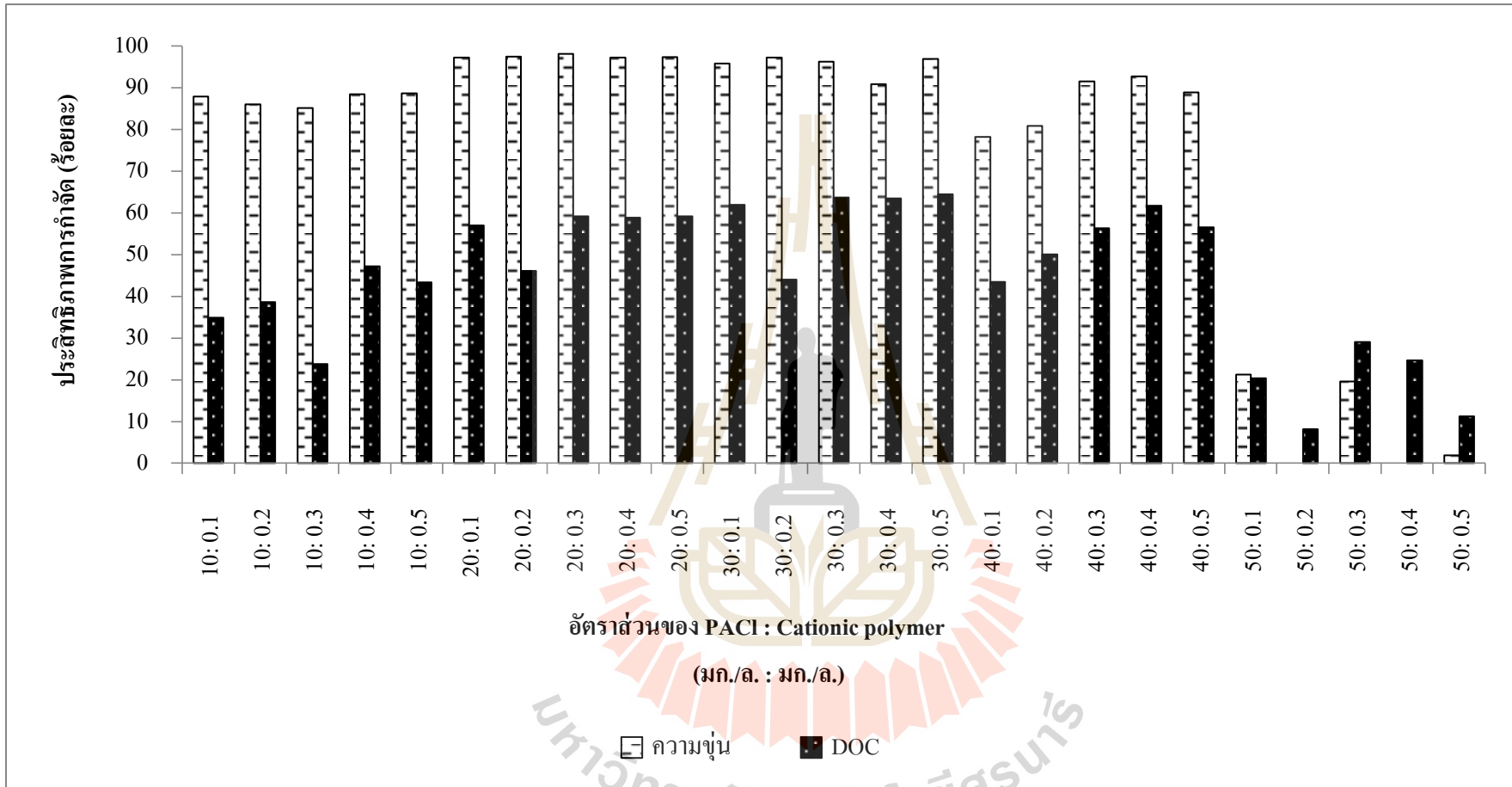
สำหรับการกำจัด DOC พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นของ PACI ที่ 10 - 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัด DOC เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนความเข้มข้นของ PACI ที่ 40 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการใช้ Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 0.1 - 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัด DOC ลดลง เนื่องจาก PACI ที่มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้นทำให้เป่าสัมผัสมีมากเกินไปสำหรับ DOC ในการรวมกลุ่มเป็นฟล็อกซึ่งความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ DOC เกิดเสถียรภาพกลับคืน รวมทั้งมีการทำลายเสถียรภาพของฟล็อกที่เกิดขึ้นด้วยสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่ความเข้มข้นมากขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ดังนั้นอัตราส่วนที่มีอนุภาคคอยลดเกิดการตกตะกอนและแยกตัวออกจากน้ำได้ดีมีผลทำให้การกำจัด DOC เกิดขึ้นได้ง่ายตามไปด้วย ทั้งนี้ DOC เป็นกลุ่มของสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงมีการสัมผัสกับสารสร้างตะกอนได้น้อย ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพการกำจัด DOC จึงต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น(มันสีน ตันจุลเวศม์, 2537; ประพัฒน์ เป็นตามวา, 2555) ดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ คือ การใช้สารสร้างตะกอน PACI ต่อสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 10: 0.5 20: 0.3 30: 0.5 40: 0.4 และ 50: 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ในกระบวนการสร้างและรวมตะกอนสามารถลดความขุ่น และ NOMs ใช้สถิติ one - way ANOVA Test ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 วิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ DOC พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของการใช้สารสร้างตะกอน PACI ต่อสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 20: 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และการใช้สารสร้างตะกอน PACI ต่อสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 30: 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 (sig. = 0.064) และประสิทธิภาพการกำจัด DOC ของการใช้สารสร้างตะกอน PACI ต่อสารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ที่ความเข้มข้น 10: 0.5 20: 0.3 30: 0.5 40: 0.4 และ 50: 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ 0.05 (sig. = 0.000) ซึ่งรายละเอียดผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังภาคผนวก ข.

จากผลการศึกษาและการทดสอบทางสถิติ พบว่า การใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความขุ่น และ DOC ได้ดีที่สุด โดยทำให้ความขุ่นของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาตกลงจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 14.47 NTU ลดลงเหลือเท่ากับ 0.46 NTU และทำให้ DOC ของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาตกลงจากค่าเริ่มต้นเท่ากับ 5.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือเท่ากับ 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจาก PACI มีกลไกในการทำลายเสถียรภาพทางไฟฟ้า

การดูดซับและการทำลายอำนาจประจุของคอลลอยด์ และการห่อหุ้มอนุภาคด้วยพอลิไฮดรอกไซด์ ส่วน polymer เป็นตัวเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์เกิดการรวมตัวกันหลายๆ อนุภาคจน กลายเป็นฟล็อกขนาดใหญ่สามารถตกตะกอนได้ง่าย (Matilainen et al., 2010; Wu et al., 2007)

จากการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอน สอดคล้องกับการศึกษาของ Xu et al. (2016) ใช้น้ำสังเคราะห์ที่มีค่า DOC 6.11 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่มีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัด DOC ได้ดีที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพการ กำจัดเท่ากับร้อยละ 65 และการศึกษาของ ทศณา เกื้อเส้ง (2553) ซึ่งใช้แหล่งน้ำดิบจากอ่างเก็บน้ำ ศรีตรังที่มีค่าความขุ่น 2.4 NTU และค่า DOC 3.1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดค่าความขุ่น และค่า DOC ใน น้ำได้ร้อยละ 89 และ 50 ตามลำดับ เมื่อใช้สารช่วยสร้างตะกอน Cationic polymer ร่วมด้วยสามารถ กำจัดค่าความขุ่น และค่า DOC เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 90 และ 59 ตามลำดับ ทั้งนี้การใช้สารสร้าง ตะกอนร่วมสารช่วยสร้างตะกอนจะสามารถกำจัดความขุ่น และ DOC ในน้ำดิบได้ดีกว่าการใช้ สารสร้างตะกอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอน ขึ้นกับความเข้มข้นของความขุ่น และ DOC ในน้ำดิบที่นำมาใช้ (กฤษดา ทองนาค, 2553; เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2541)



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และ DOC ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

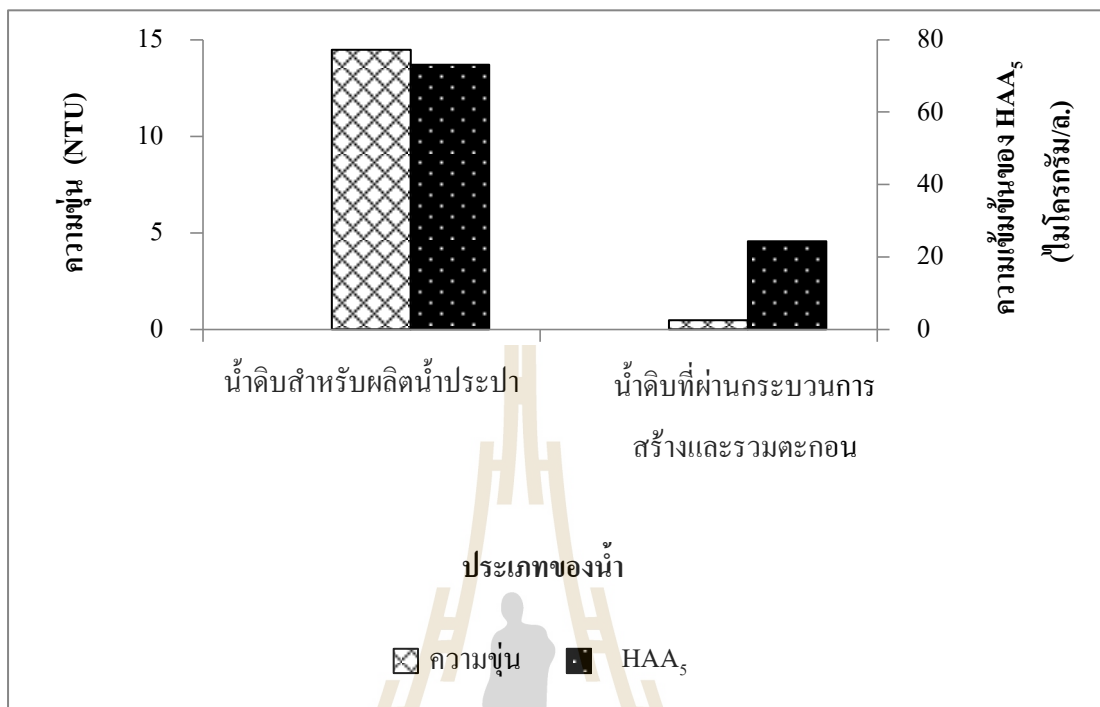
4.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิติก

ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (NOMs) ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ โดยใช้สภาวะและผลการศึกษาของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (หัวข้อ 4.2.1) คือ น้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา และน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนที่มีการใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากมีความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำต่ำที่สุด ซึ่งความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำ และความเข้มข้นของสารคลอรีนที่ต่างกันมีผลต่อระดับการเกิด HAA₅ มีดังนี้

1. ผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำต่อความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซิติก

ผลของการเกิด HAA₅ ซึ่งมีความขุ่น และ NOMs โดยพิจารณาดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ DOC ซึ่งเป็นสารตั้งต้นและมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยการเติมสารคลอรีนชนิดเกลือความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาซึ่งมีความขุ่นเท่ากับ 14.47 NTU และ DOC เท่ากับ 5.08 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ทำให้เกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 73.03 ไมโครกรัมต่อลิตร และชนิดของ HAA₅ ได้แก่ TCAA และ DBAA ความเข้มข้นเท่ากับ 85.37 และ 4.01 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนซึ่งมีความขุ่นเท่ากับ 0.46 NTU และ DOC เท่ากับ 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า เกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร และชนิดของ HAA₅ ได้แก่ TCAA ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ความขุ่น และ DOC ในน้ำที่ลดลงจากกระบวนการสร้างและรวมตะกอนโดยใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ของการศึกษานี้สามารถกำจัด HAA₅ คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 66.66 สอดคล้องกับการศึกษาของ Chuang et al. (2011) และ Metcalfe et al. (2015) ที่ใช้กระบวนการสร้างและรวมตะกอนลด NOMs ในน้ำทำให้สามารถกำจัด HAA₅ ร้อยละ 27 - 58

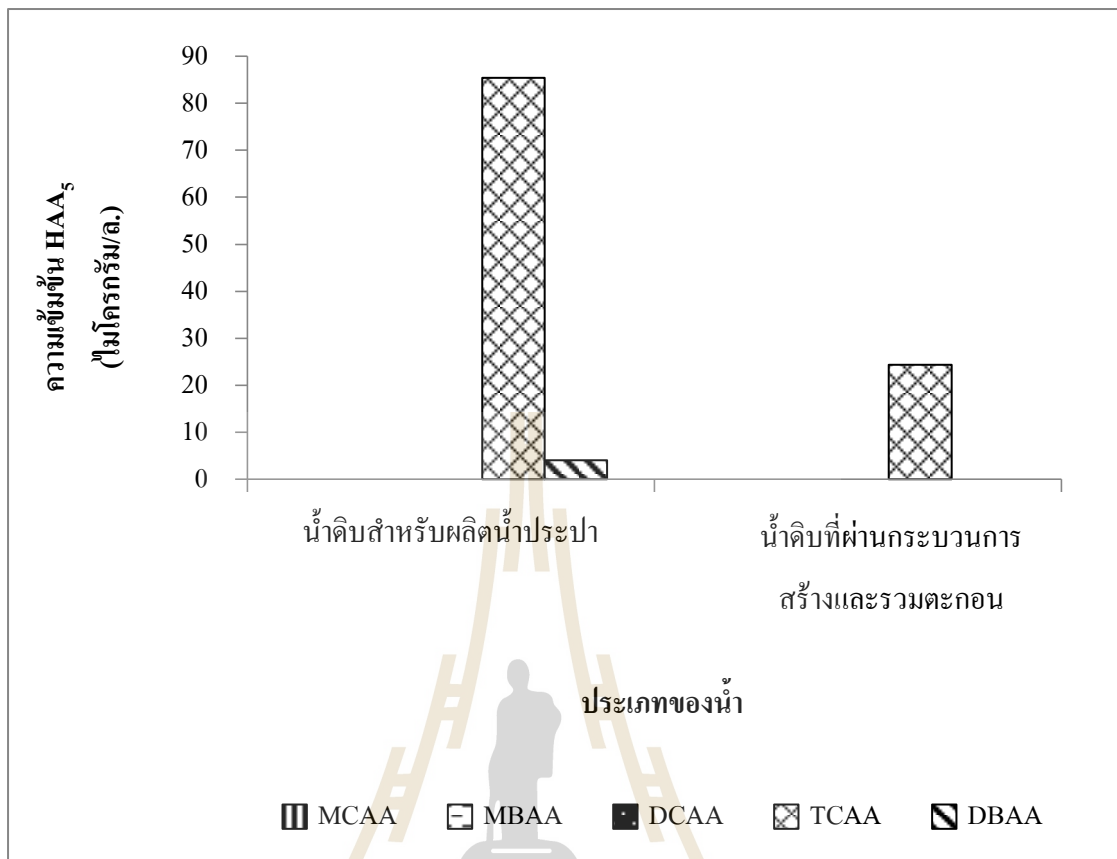
ผลความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำดิบทั้ง 2 ประเภทที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำดิบสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของ HAA₅ สูงขึ้น เนื่องจาก NOMs ในน้ำดิบมีองค์ประกอบหลัก คือกรดฮิวมิก และฟุลวิก ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ HAA₅ ในการฆ่าเชื้อโรคด้วยการเติมสารคลอรีน NOMs ในน้ำมีส่วนประกอบของกรดฮิวมิก ประมาณร้อยละ 50 โดยมีขนาดโมเลกุลใหญ่และประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนเกิดสารตกค้างได้มาก (Singer, 1999; มัลลิกา ปัญญาะ โป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี, 2550)



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบระดับความขุ่นกับการเกิดกรดฮาลออะซีติก



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบระดับสารอินทรีย์ละลายน้ำกับการเกิดกรดฮาลออะซีติก

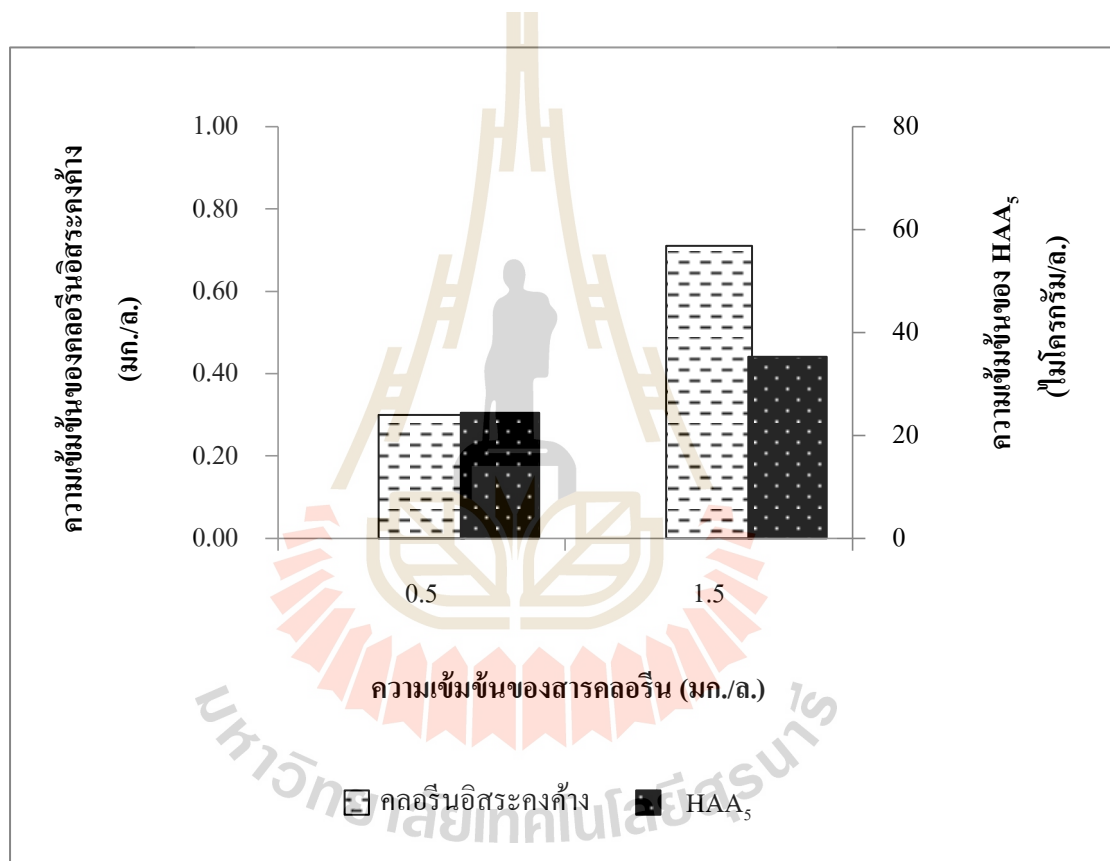


รูปที่ 4.10 การเกิดกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาและน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

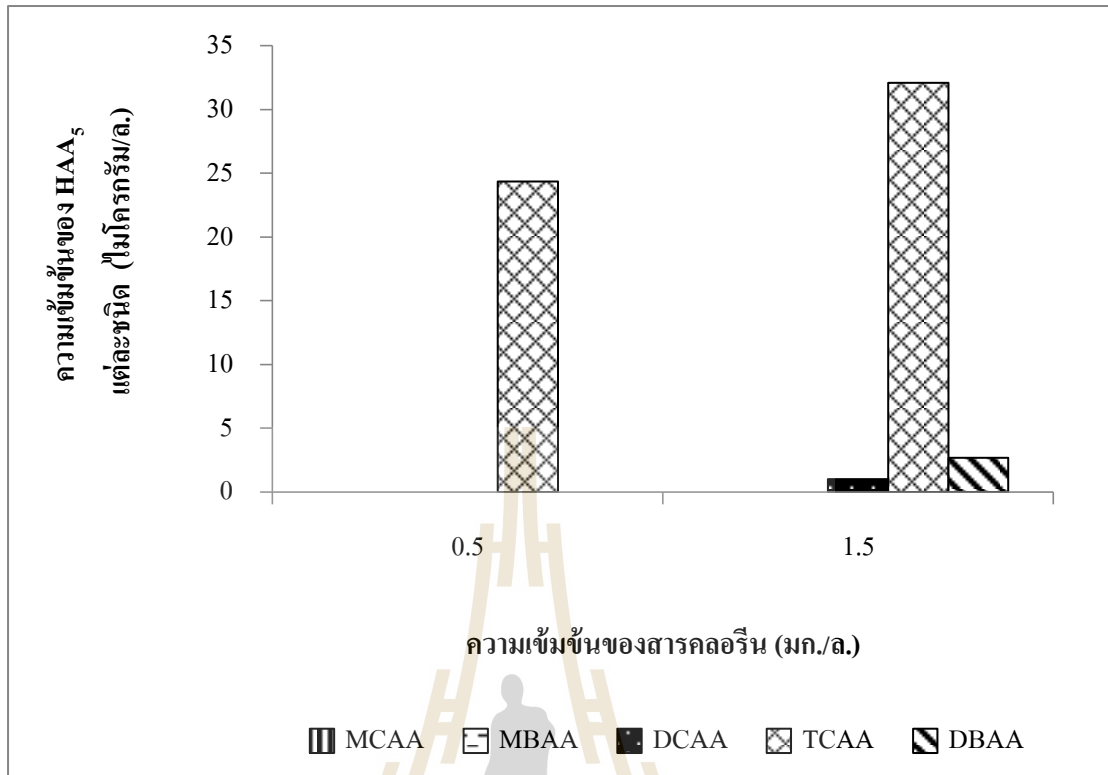
2. ผลของความเข้มข้นของสารคลอรีนต่อความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก

น้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยการเติมสารคลอรีนชนิดเกล็ดความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 - 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า ค่าคลอรีนอิสระคงค้างเท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร (ดังผลของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำต่อการเกิด HAA₅) และความเข้มข้นของสารคลอรีน 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 - 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษา พบว่า ค่าคลอรีนอิสระคงค้างเท่ากับ 0.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 35.24 ไมโครกรัมต่อลิตร และชนิดของ HAA₅ ได้แก่ MBAA DBAA TCAA และ DBAA ความเข้มข้นเท่ากับ ไม่พบ MBAA 1 32.12 และ 2.68 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

จากผลของความเข้มข้นของสารคลอรีนต่อความเข้มข้นของ HAA₅ ที่เกิดขึ้นพบว่า การเติมสารคลอรีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกันเท่ากับ 0.50 และ 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบที่มีความเข้มข้นของ NOMs เท่ากันเท่ากับ 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้เกิดความเข้มข้น HAA₅ ที่แตกต่างกัน โดย NOMs ในน้ำดิบที่ลดลงมีผลทำให้ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงค้างเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการที่มี NOMs ในน้ำน้อยทำให้ต้องใช้สารคลอรีนในการออกซิไดซ์ NOMs น้อย ส่งผลให้เกิดคลอรีนอิสระคงค้างสูงซึ่งมีผลให้ความเข้มข้นของสารตกค้างสูงขึ้นตาม (Lu et al., 2009; เศษานัตร์ศิริเวช, 2552; มั่นสิน ตันทุลเวศม์, 2545)



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการเกิดกรดฮาโลอะซิติกกับคลอรีนอิสระคงค้างในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

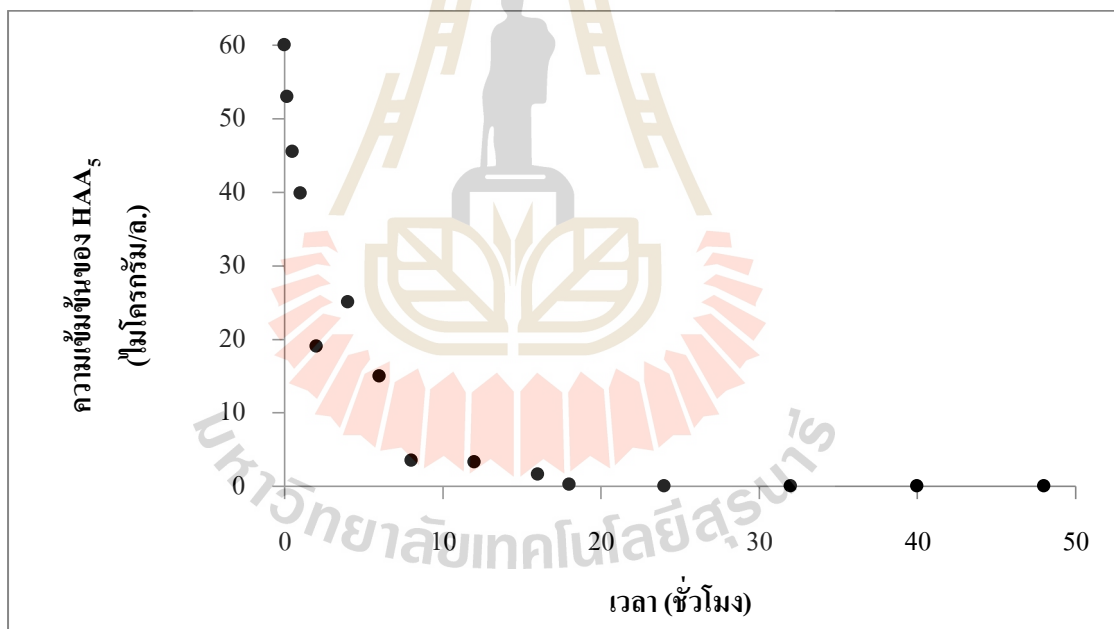


รูปที่ 4.12 การเกิดกรดฮาโลอะซีติกแต่ละชนิดในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

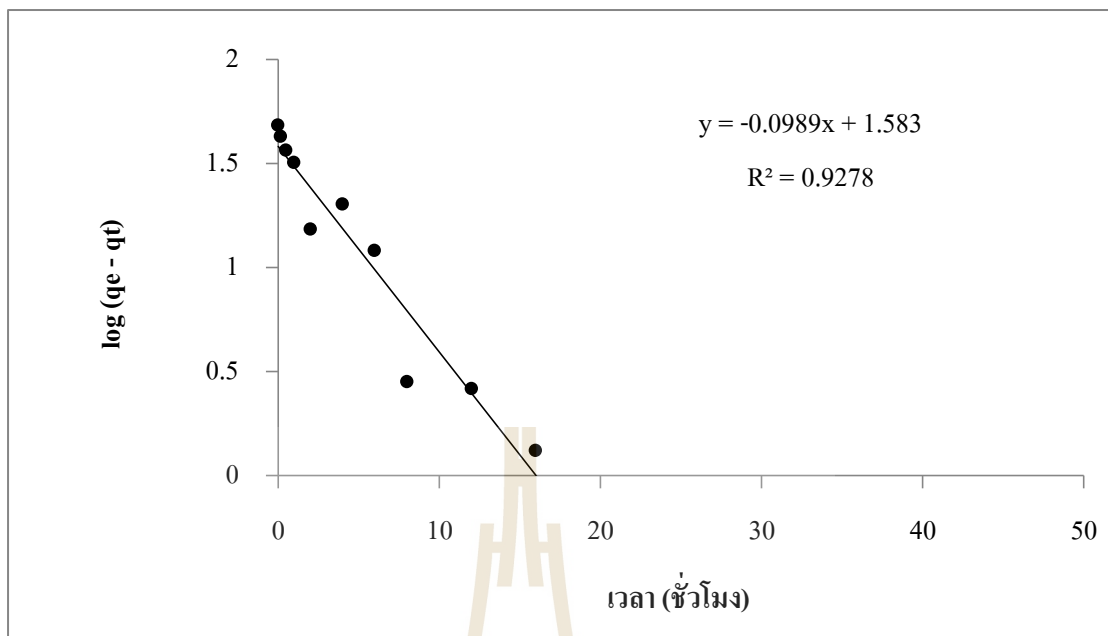
4.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ในการดูดซับน้ำ HAA₅ ตั้งคราะห์ เพื่อทราบเวลาที่ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล และนำเวลาที่ได้ใช้ในการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับต่อไป โดยการศึกษาใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0 - 48 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่เป็นสารดูดซับเท่ากับ 0.05 กรัม ควบคุมระดับพีเอชเท่ากับ 7 เขย่าที่อุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 250 รอบต่อนาที จนเข้าสู่สภาวะสมดุล จากผลการศึกษา พบว่า การดูดซับ HAA₅ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 0 - 6 ชั่วโมง และเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งการวิเคราะห์สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e - q_t)$ กับเวลา สามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_1 จากค่าความชันของสมการเส้นตรง และคำนวณหาปริมาณสาร HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากจุดตัดของสมการเส้นตรงดังแสดงในรูป 4.14 และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า t/q_t กับเวลา สามารถคำนวณหาค่าคงที่ k_2 และปริมาณ

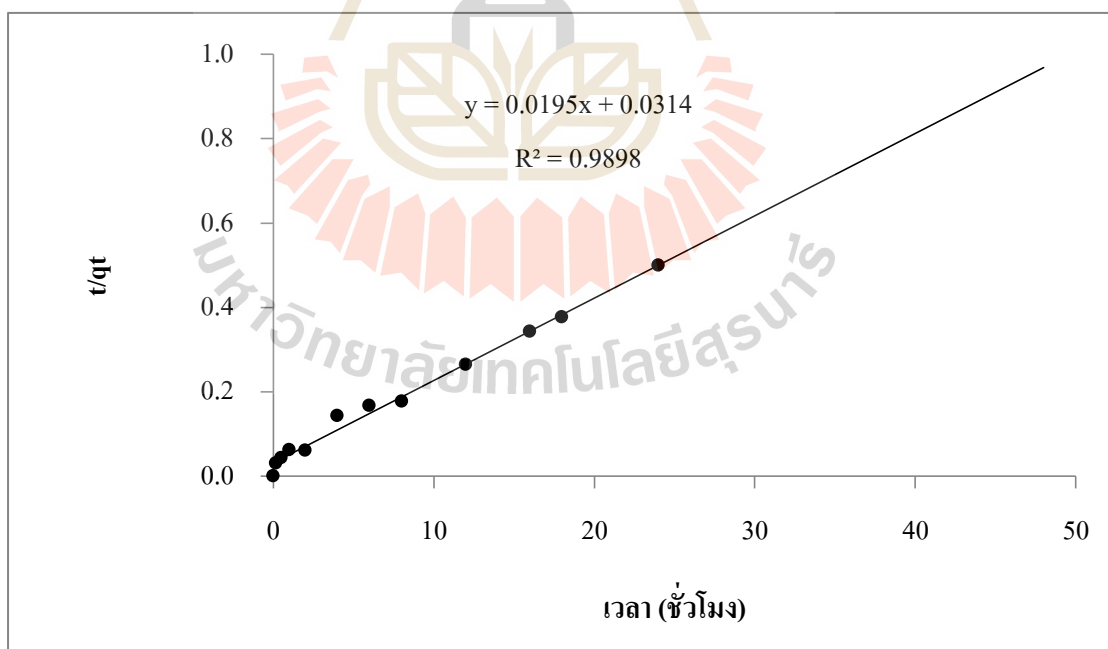
สาร HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากจุดตัดของสมการเส้นตรงดังแสดงในรูป 4.15 ค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4.2 และรายละเอียดผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ HAA₅ แสดงดังภาคผนวก ง. พบว่า จลนพลศาสตร์การดูดซับ HAA₅ โดยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนพิจารณาจากค่า R² ที่เข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด และจากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนที่คำนวณแล้วค่าปริมาณของ HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณของ HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในรูป 4.16 โดยที่อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon และความเข้มข้นของ HAA₅ ซึ่งอัตราเร็วของปริมาณ HAA₅ ที่ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ปริมาณ 1 กรัม ในเวลา 1 ชั่วโมง สอดคล้องไปตามงานวิจัยส่วนใหญ่ (Soonglerdsongpha, 2006; ชุตติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551) ดังแสดงในรูปที่ 4.16



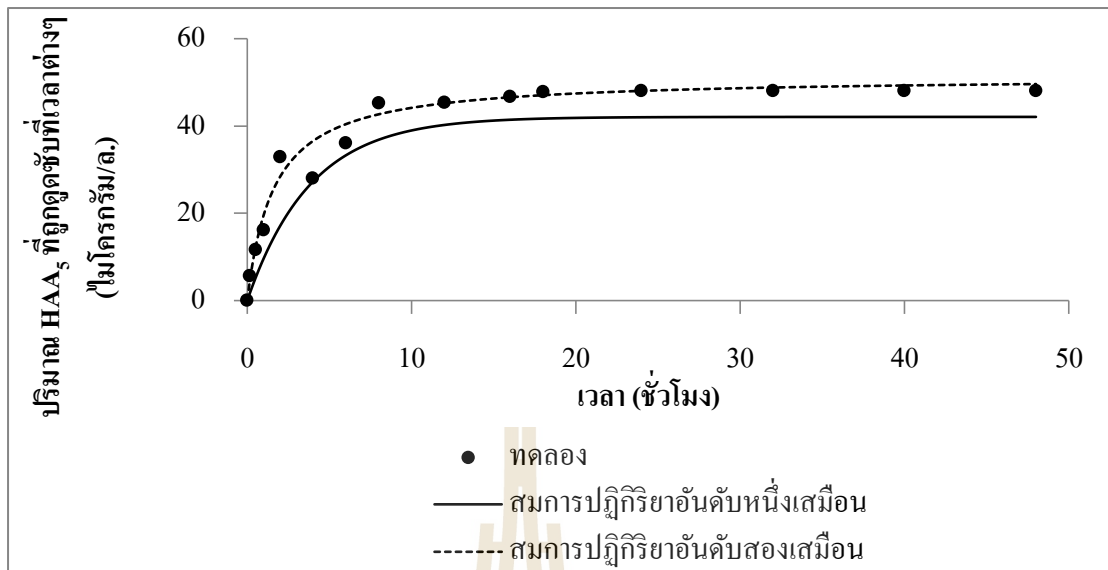
รูปที่ 4.13 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut activated shell carbon



รูปที่ 4.14 จดนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน



รูปที่ 4.15 จดนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน



รูปที่ 4.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับกรดซัลโฟซิดิกวิเคราะห์ด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนและสมการปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดซัลโฟซิดิก

ตัวกลางดูดซับ	q_c (ทดลอง) ($\mu\text{g/g}$)	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน			ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน			
		q_c (คำนวณ) ($\mu\text{g/g}$)	k_1 (h^{-1})	R^2	q_c (คำนวณ) ($\mu\text{g/g}$)	k_2 ($\text{g}/\mu\text{g} \cdot \text{h}$)	h ($\mu\text{g}/\text{g} \cdot \text{h}$)	R^2
ถ่านกัมมันต์ แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon	48	42.08	0.2607	0.9278	51.28	0.0121	31.82	0.9898

หมายเหตุ q_c คือ ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ณ จุดสมดุล

k_1 คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับหนึ่ง

k_2 คือ ค่าคงที่เฉพาะของอัตราอันดับสอง

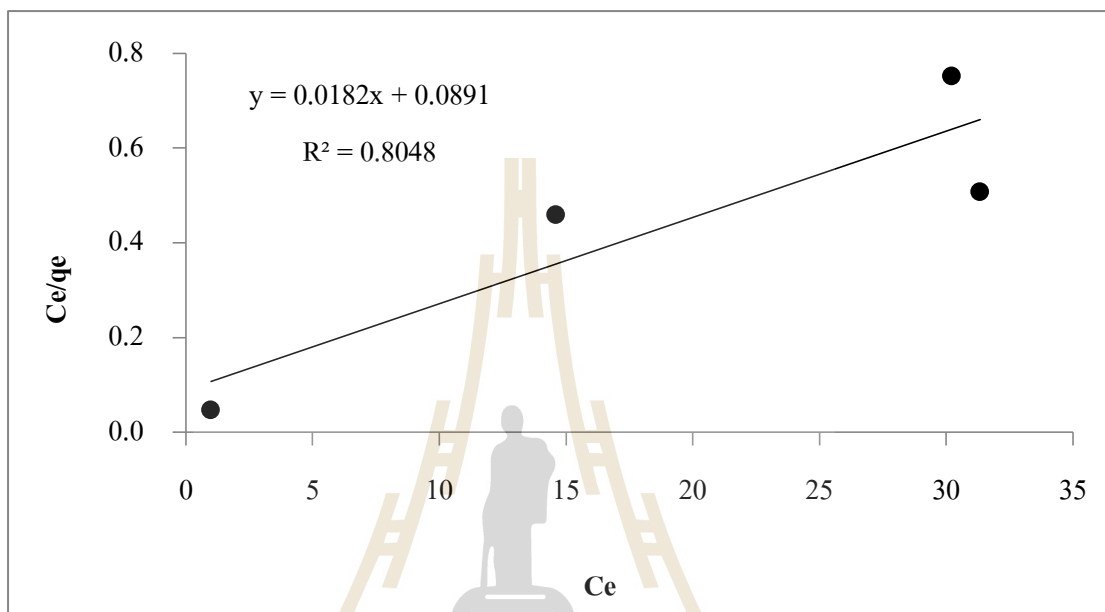
h คือ อัตราการดูดซับเริ่มต้น

R^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

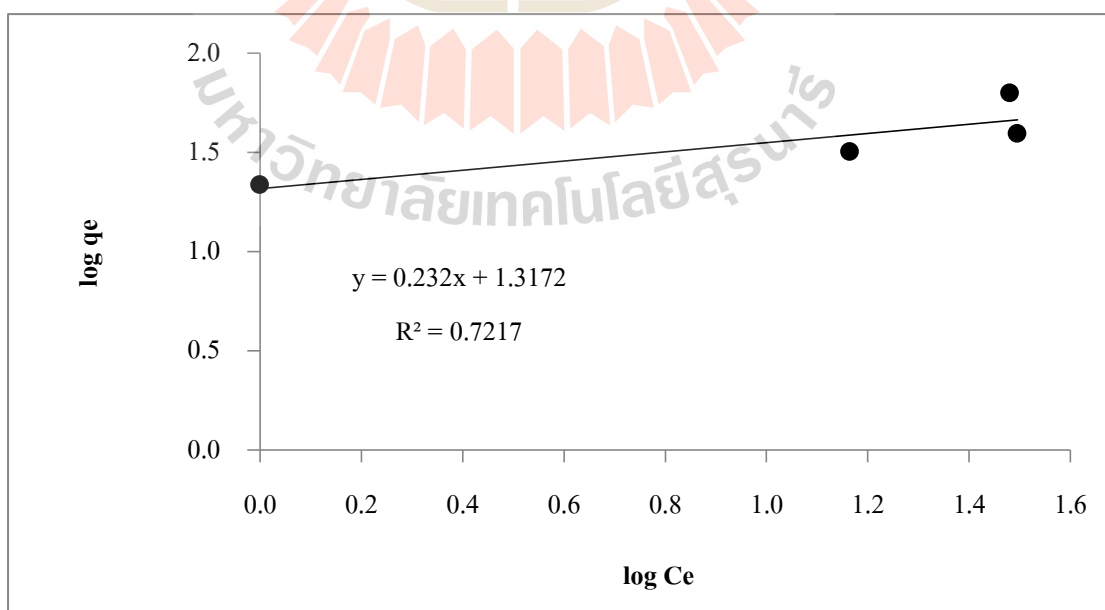
4.2.4 ผลการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

ผลการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับ HAA₅ คือ การหาความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ด้วยปริมาณ 0.05 กรัมกับความเข้มข้นของน้ำ HAA₅ สังเคราะห์ เท่ากับ 25 50 75 และ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับควบคุมระดับพีเอชเท่ากับ 7 เขย่าที่อุณหภูมิที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบเท่ากับ 250 รอบต่อนาที และเวลาที่สภาวะสมดุล 24 ชั่วโมง ซึ่งได้จากสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยนำผลการศึกษาไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_e/q_e กับค่า C_e จะได้กราฟที่มีสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถคำนวณหาความสามารถการดูดซับ HAA₅ ได้จากความชัน และหาค่าคงที่ K_L ได้จากจุดตัดบนแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช โดยนำผลการศึกษาไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log q_e$ กับค่า $\log C_e$ จะได้กราฟที่มีสมการเส้นตรงที่มีค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช ($1/n$) เท่ากับความชัน และสามารถคำนวณหาค่าคงที่ K_F ได้จากจุดตัดบนแกน y ดังแสดงในรูปที่ 4.18 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาคผนวก ง. ผลการศึกษา พบว่า การดูดซับ HAA₅ ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีค่า R^2 จากสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช ซึ่งไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นสมการที่แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ HAA₅ ถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon โดยพื้นที่ผิว มีจำนวนที่แน่นอนและพลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ (ซัยซต ตั้งสติษฐ์กุลชัย, 2554) และค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 สามารถอธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทย์ ปิยะมังกลา, 2555) นอกจากนี้ การหาความสามารถในการดูดซับ HAA₅ โดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut activated shell carbon ให้ค่าเท่ากับ 54.95 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชันของสมการเส้นตรงไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และจากสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่คำนวณแล้วค่าปริมาณของ HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณของ HAA₅ ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณดังแสดงในรูป 4.19 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ghomshe et al. (2011) ใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัด HAA₅ ที่อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่า เป็นสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 และให้ค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ เท่ากับ 38.75 ไมโครกรัมต่อกรัม เช่นเดียวกับจากการศึกษาของ Lekkas et al. (2009) ศึกษาการดูดซับ HAAs โดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการกำจัด HAA₅ พบว่า ให้ค่าความสามารถการดูดซับสูงสุด

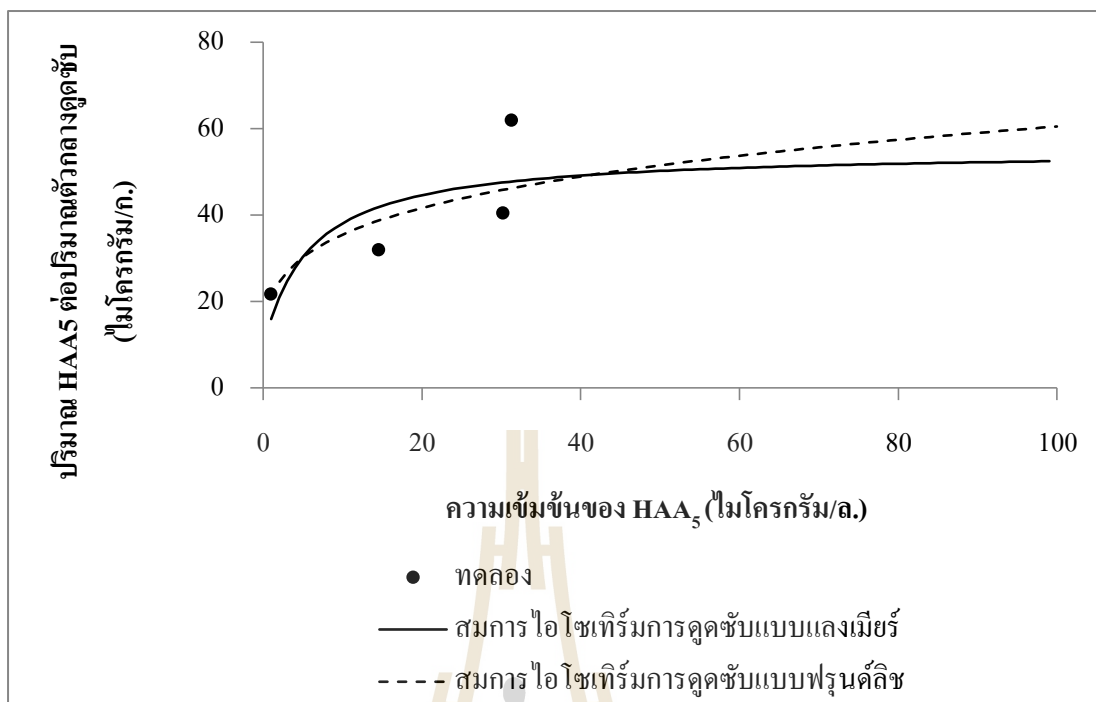
เท่ากับ 42.70 ไมโครกรัมต่อกรัม เนื่องจากถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดดูดซับเป็นตัวกลางดูดซับที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำจึงมีค่าความสามารถการดูดซับ HAA₅ ก่อนข้างน้อยกว่าตัวกลางดูดซับที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ เช่น เฮกซะมีโซพอร์สซิลิเกต เป็นต้น (Soonglerdsongpha, 2006; ชุติมา กัลยาประสิทธิ์, 2551)



รูปที่ 4.17 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก



รูปที่ 4.18 ไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก



รูปที่ 4.19 ไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกวิเคราะห์ด้วยสมการแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูนด์ลิช

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรต่างๆ ของไอโซเทิร์มการดูดซับกรดฮาโลอะซิติกแบบแลงเมียร์ และแบบฟรูนด์ลิช

ตัวกลางดูดซับ	Langmuir adsorption isotherm			Freudlich adsorption isotherm		
	R ²	q _m (µg/g)	K _L (L/µg)	R ²	1/n	K _F
ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon	0.8048	54.95	0.2041	0.7217	0.2320	20.7587

หมายเหตุ q_m คือ ปริมาณ HAA₅ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่สภาวะสมดุล

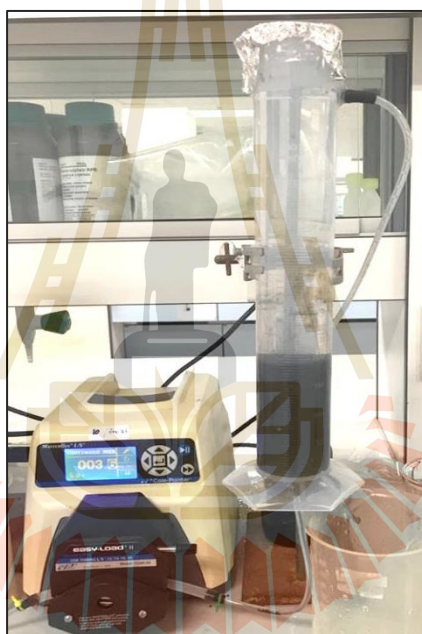
K_L คือ ค่าคงที่การดูดติดผิวของการดูดซับแบบแลงเมียร์

K_F และ 1/n คือ ค่าคงที่การดูดติดผิวของการดูดซับแบบฟรูนด์ลิช

R² คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

4.3 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test)

การทดลองแบบคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะการไหลของน้ำ HAA₅ สังกะระห์โดยไหลผ่านชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ซึ่งตัวกลางที่อยู่กับที่และมีการไหลแบบไหลขึ้นคือไหลด้านแนวโน้มถ่วง โดยมีการติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์จริงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.20 การศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ประกอบด้วย 2 ปัจจัย คือ อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ และชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับ เพื่อศึกษา Breakthrough curve และหาความสามารถการบำบัด HAA₅ ในชุดการทดลองแบบคอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon



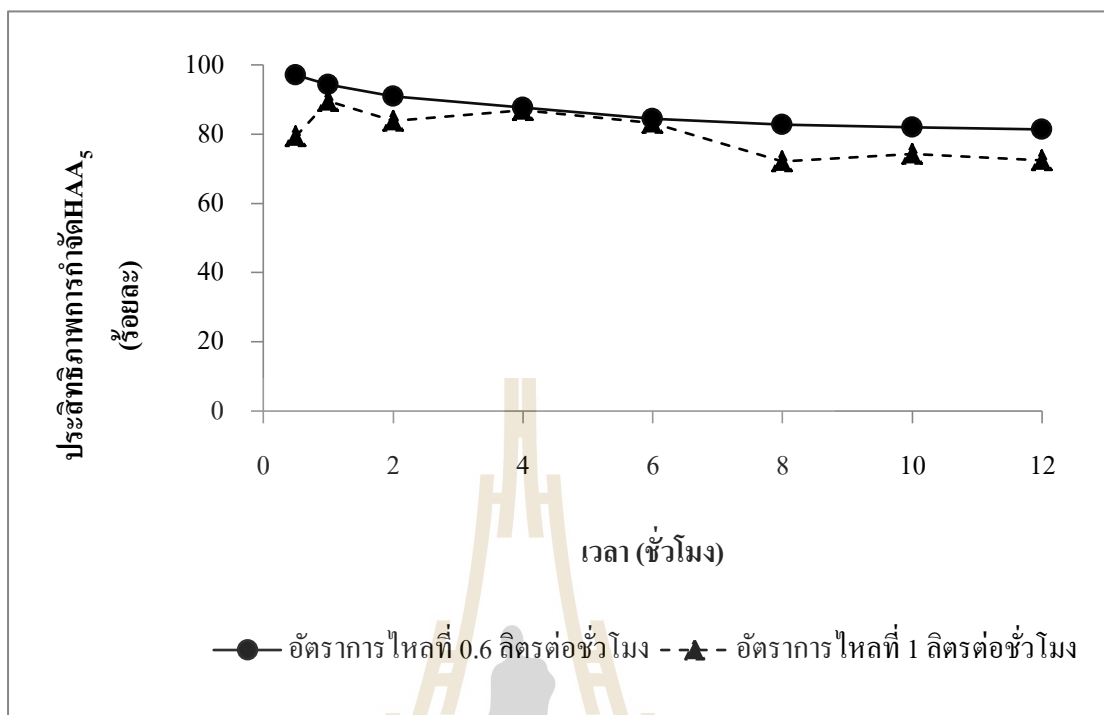
รูปที่ 4.20 การติดตั้งชุดทดลองแบบคอลัมน์

4.3.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาลอะซีติก

การกำจัด HAA₅ โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง ผ่านคอลัมน์ที่มีชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สูง 10 เซนติเมตร (น้ำหนัก 115.21 กรัม) โดยน้ำ HAA₅ สังกะระห์ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร เนื่องจากในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทำให้มีการเกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยจะสังกะระห์น้ำ HAA₅ ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 เติมน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์

ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และรายละเอียดดังภาคผนวก จ. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ตามระยะเวลาต่างๆ พบว่า อัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ที่เกิดขึ้นมากกว่าร้อยละ 96.63 ตั้งแต่เริ่มการทดลองที่ 30 นาที และตั้งแต่ระยะการทดลอง 2 ชั่วโมง จนถึงหมดระยะทำการทดลองที่ 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง สำหรับอัตราการไหลที่ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ที่เกิดขึ้นมากกว่าร้อยละ 89.52 ตั้งแต่เริ่มการทดลองที่ 30 นาที และตั้งแต่ระยะการทดลอง 2 ชั่วโมง จนถึงหมดระยะทำการทดลองที่ 12 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยอัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง (ร้อยละ 85.34) สามารถกำจัด HAA_5 ได้ดีกว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยอัตราการไหลที่ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง (ร้อยละ 79.41) ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 ที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 อัตราการไหลมีแนวโน้มลดลงในระยะเวลา 12 ชั่วโมงของการทดลองเหมือนกัน เนื่องจากอัตราการไหลที่ 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 0.31 และ 0.51 เมตรต่อชั่วโมง โดยการคำนวณจากอัตราการไหลต่อพื้นที่ผิวของคอลัมน์มีค่าอัตราการไหลสูงกว่าเกณฑ์การออกแบบถังทรายกรองช้าของการประปานครหลวง (2553) ซึ่งกำหนดไว้ 0.12 - 0.32 เมตรต่อชั่วโมง ทำให้การกักเก็บภายในคอลัมน์มีระยะเวลาสั้นส่งผลให้น้ำ HAA_5 สังเคราะห์เคลื่อนที่ได้เร็วจึงเกิดกลไกการดูดซับไม่สมบูรณ์

จากการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 สอดคล้องกับการศึกษาของ Ghomshe et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาการกำจัด HAA_5 ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด พบว่า อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA_5 สูงกว่าอัตราการไหล 6.0 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากมีระยะเวลาสัมผัสสารระหว่างสาร HAA_5 กับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด และการศึกษาของกวอดล ศิริสินเลิศ (2552) ซึ่งศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 2.0 4.0 6.0 และ 8.0 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าที่ลดลงเมื่ออัตราการไหลมีค่าที่สูง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์และสารอินทรีย์ธรรมชาติมีค่าที่ลดลง เช่นเดียวกับ การศึกษาของ นิรามย์ ไตรยวงศ์ (2558) ซึ่งศึกษาการกำจัดสารตะกั่วและแมงกานีสด้วยตัวกลางผสมเหล็กและทราย พบว่าที่ความเร็วไหลต่ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและแมงกานีสสูงกว่าความเร็วไหลสูง ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นกลไกในการดูดซับจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดจึงลดลง



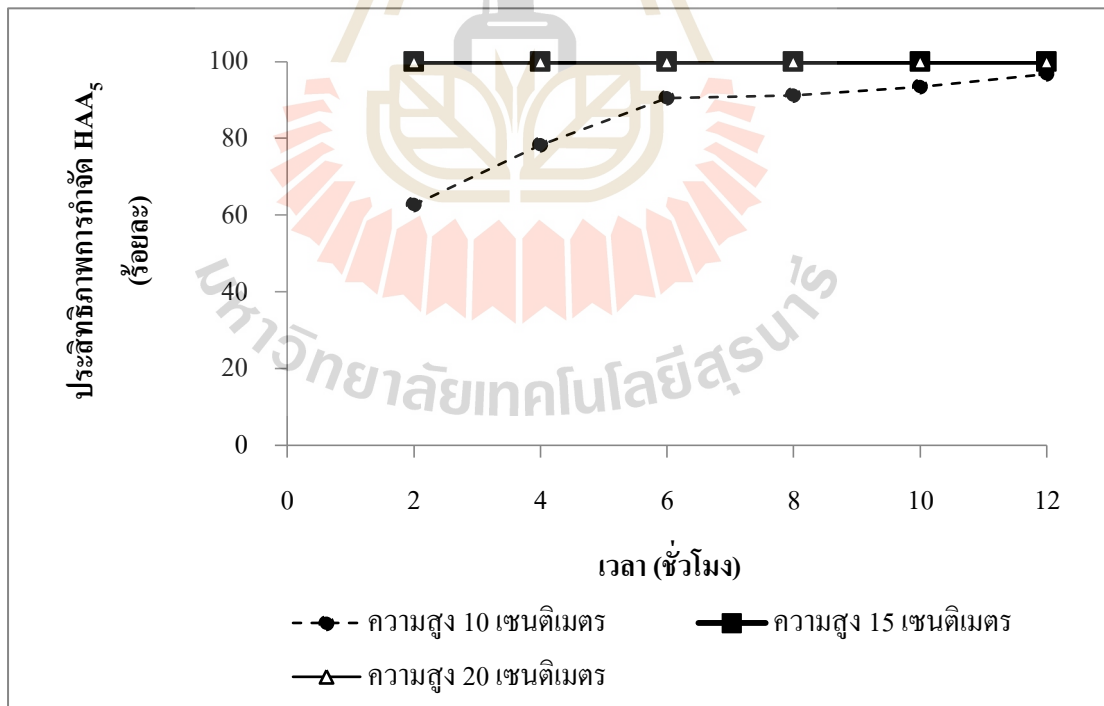
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกที่อัตราการไหล 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง

4.3.2 ผลการศึกษาชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซีติก

ชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่นำมาใช้ในการกำจัด HAA₅ ได้แก่ ความสูง 10 เซนติเมตร (น้ำหนัก 115.21 กรัม) 15 เซนติเมตร (น้ำหนัก 169.60 กรัม) และ 20 เซนติเมตร (น้ำหนัก 215.25 กรัม) และมีน้ำหนักของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่แตกต่างกัน โดยใช้ น้ำ HAA₅ สังเคราะห์ ที่มี ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร เนื่องจากในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทำให้มีการเกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยจะสังเคราะห์น้ำ HAA₅ ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 เก็บน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 12 ชั่วโมง และใช้ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่สามารถกำจัด HAA₅ ได้มากที่สุด (หัวข้อ 4.3.1) คือ อัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการศึกษาชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และรายละเอียดดังภาคผนวก จ. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ตามระยะเวลาต่างๆ พบว่าชั้นความสูง 10 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ สูงสุด ร้อยละ 96.75 และตั้งแต่ระยะเวลาการทดลอง 2 ชั่วโมงจนถึงหมดระยะทำการทดลองที่ 12 ชั่วโมง

ประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับชั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ที่เกิดขึ้นร้อยละ 100 ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงหมดระยะเวลาทำการทดลองที่ 12 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพเฉลี่ยชั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร (ร้อยละ 100 ตามลำดับ) สามารถกำจัด HAA₅ ได้ดีกว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยชั้นความสูง 10 เซนติเมตร (ร้อยละ 85.46) เนื่องจากชั้นความสูงที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มากขึ้น และมีผลให้พื้นที่ผิวของการดูดซับ HAA₅ มากขึ้นตามไปด้วย (Babi et al., 2007)

จากการศึกษาชั้นความสูงของตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ สอดคล้องกับการศึกษาของ Ghomshe et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับ HAA₅ ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด พบว่า ปริมาณของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ HAA₅ โดยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดปริมาณ 8 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับ HAA₅ ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดปริมาณ 2 กรัม เท่ากับร้อยละ 90.10 และการศึกษาของ Hensuk et al. (2012) ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับไตรคลอโรเอทิลีนด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ชั้นความสูงที่ 1.5 เซนติเมตร สามารถกำจัดไตรคลอโรเอทิลีน ได้ดีกว่าชั้นความสูงที่ 0.5 เซนติเมตร

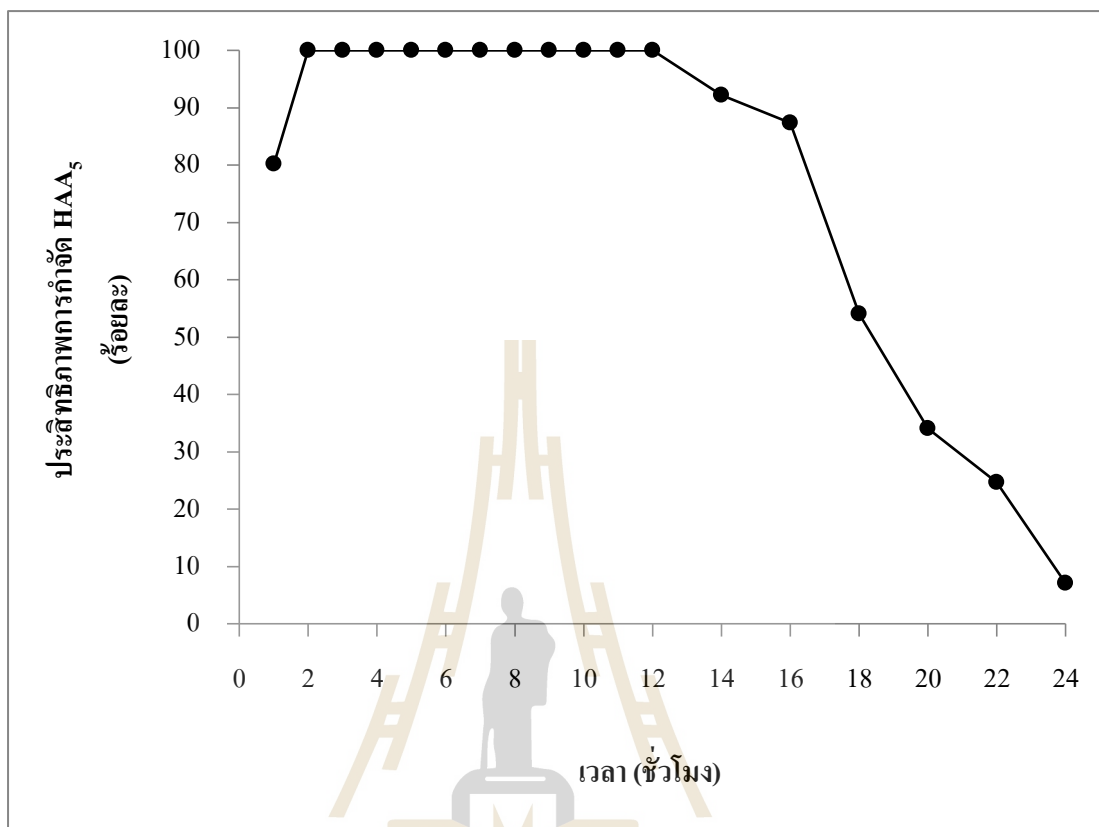


รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซีติกในแต่ละชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon

ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 2 ปัจจัย สรุปได้ว่า อัตราเร็วการไหลที่ช้ากว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ดีกว่า และชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ เกิดขึ้นสูงตามความชั้นความสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 สามารถนำไปใช้ศึกษากราฟเบรกทรู (Breakthrough curve) เพื่อศึกษาความสามารถการบำบัด HAA₅ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์ และประยุกต์ใช้ในระบบที่มีการกำจัด HAA₅ ได้

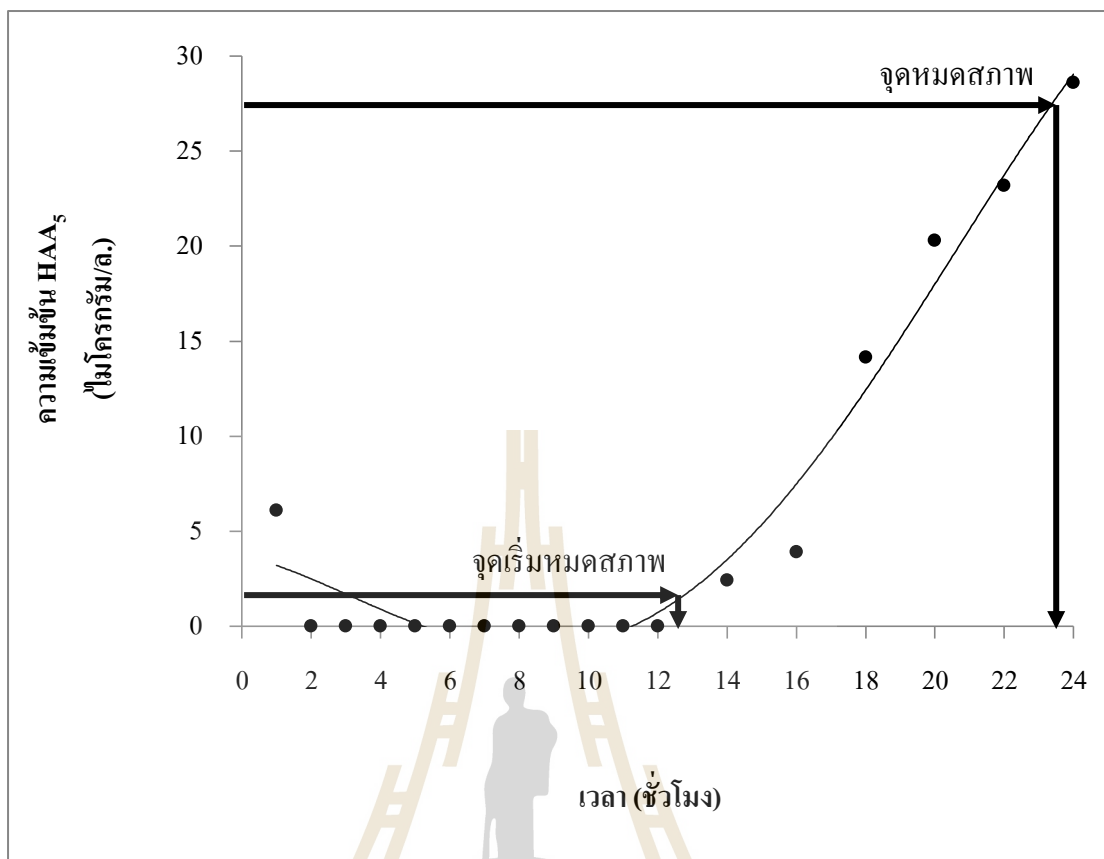
4.3.3 ผลการศึกษารูปเบรกทรู (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การศึกษารูปเบรกทรู (Breakthrough curve) เพื่อศึกษาความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์นั้นจะอาศัยผลการทดลองทั้งหมด 3 ผลการทดลอง ได้แก่ 1. ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติกที่เกิดขึ้นจากผลการเติมสารคลอรีนชนิดเกล็ดความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ทำให้มีการเกิด HAA₅ ความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยจะสังเคราะห์น้ำ HAA₅ ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร 2. ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง และ 3. ผลการศึกษาชั้นความสูง 15 เซนติเมตร ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ซึ่งเป็นตัวกลางดูดซับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 ผลการศึกษาระสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ กับระยะเวลาต่างๆ พบว่า มีประสิทธิภาพร้อยละ 100 จากชั่วโมงที่ 2 - 12.6 ชั่วโมง และจาก 12.6 - 24 ชั่วโมง ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon จะเริ่มเกิดการหมดสภาพประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ลดลง



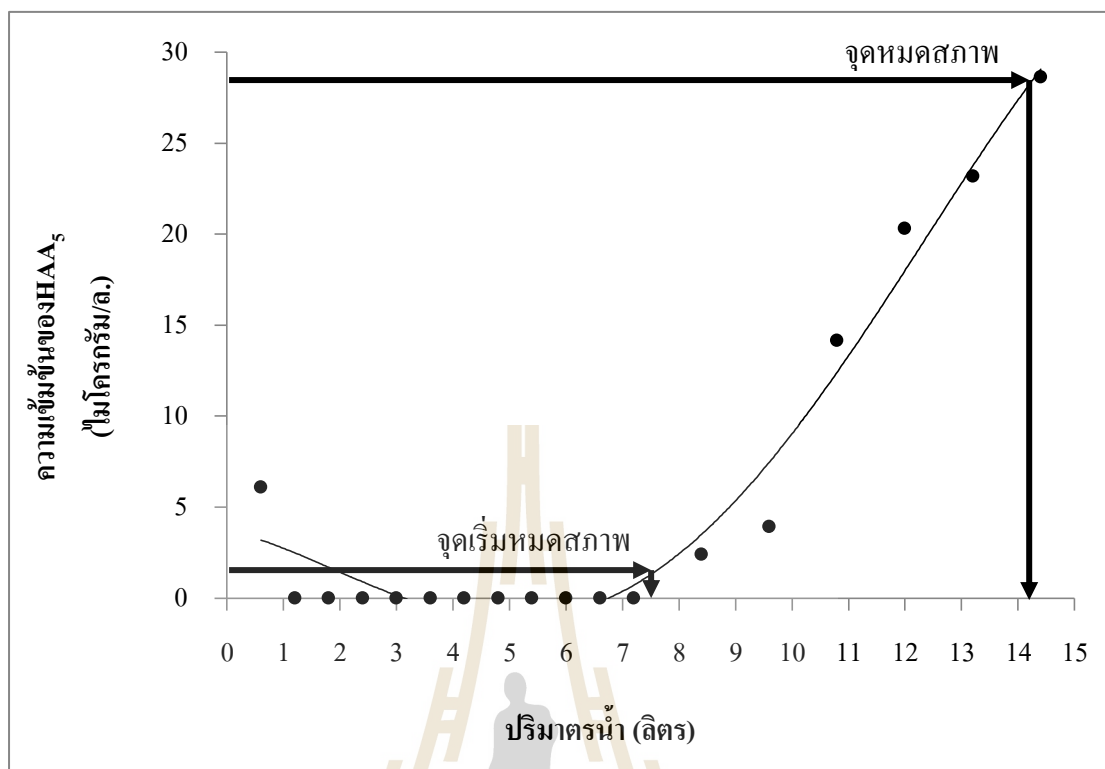
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาลออะซิติกที่อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง และความสูง 15 เซนติเมตร ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon

โดยระยะเวลาเบรกทูร์ (Breakthrough time; t_b) หรือจุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) มีความเข้มข้นเท่ากับ 1.50 ไมโครกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 5 ของความเข้มข้น HAA₅ ที่เข้าสู่คอลัมน์มีระยะเวลาเท่ากับ 12.6 ชั่วโมง ซึ่งจุดหมดสภาพ (Exhaustion point; C_E) มีความเข้มข้นเท่ากับ 28.50 ไมโครกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 95 ของความเข้มข้น HAA₅ ที่เข้าสู่คอลัมน์มีระยะเวลาเท่ากับ 23.8 ชั่วโมง โดยเป็นอายุการใช้งานของระบบ ดังแสดงในรูป 4.24



รูปที่ 4.24 รูปเบรกทรูแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก

การหาค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ด้วยชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางเป็นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon จะได้รูปผลการทดลองเบรกทรู ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยมีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก จ. มีค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ จากการทดลองแบบคอลัมน์เท่ากับ 36.68 ไมโครกรัมกรัมต่อกรัม โดยการคำนวณจากจุดเริ่มต้นถึงจุดเริ่มหมดสภาพ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ จากการทดลองแบบที่ละเทด้วยการคำนวณที่ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ เท่ากับ 47.24 ไมโครกรัมกรัมต่อกรัม ผลการศึกษา พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับจากการทดลองแบบคอลัมน์มีค่าน้อยกว่าการทดลองแบบที่ละเท เนื่องจากการทดลองแบบคอลัมน์มีระยะเวลาสัมผัสในการดูดซับเกิดขึ้นน้อยกว่าการทดลองแบบที่ละเทจากอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.25 รูปเบรกทรูแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก

การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone) คำนวณจากสมการที่ 3.8 และใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.24 โดยการหาระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (EBCT) คำนวณจากสมการที่ 3.9 และใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.25 พบว่า มีความยาวของชั้นการดูดซับ HAA₅ เท่ากับ 7.05 เซนติเมตร และระยะเวลาเดินระบบมีค่าเท่ากับ 0.98 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าเดียวกับระยะเวลากักเก็บจริง และอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon คำนวณจากสมการ 3.10 มีค่าเท่ากับ 11.86 กรัมต่อลิตร โดยมีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ฉ.

การศึกษานี้มีชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ในคอลัมน์เท่ากับ 15 เซนติเมตร ซึ่งมีความยาวของชั้นการดูดซับ HAA₅ ที่ถูกใช้งานเท่ากับ 7.05 เซนติเมตร โดยคิดเป็นร้อยละ 47 อาจเกิดเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์ HAA₅ ผ่านคอลัมน์ที่นำมาใช้ในการศึกษากราฟเบรกทรูมีค่าสูงทำให้ระยะเวลาที่กักเก็บสั้น ส่งผลทำให้อนุภาคของ HAA₅ เคลื่อนที่ผ่านชั้นของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon เร็วขึ้น จึงทำให้กลไกในการดูดซับไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และเกิดจุดเริ่มเสื่อมสภาพเร็วขึ้นส่งผลให้มีอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มากขึ้น (ชัยยศ ตั้งสติย์กุลชัย, 2554; ภูวตล ศิริสินเลิศ, 2552)

4.4 การนำผลการวิจัยเบื้องต้นประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา

จากการศึกษาการกำจัด HAA₅ โดยการทดลองแบบที่ละเทด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน พบว่า การใช้สารสร้างตะกอน PACI ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer สามารถกำจัด NOMs ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิด HAA₅ ได้ดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัด HAA₅ ได้สูงถึงร้อยละ 66.66 แต่ยังมีปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลงเหลือพอที่ทำให้เกิด HAA₅ เมื่อมีการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารคลอรีน และการศึกษาโดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีประสิทธิภาพในการกำจัด HAA₅ ได้สูงถึงร้อยละ 100 ดังนั้นหากประยุกต์ใช้ระบบผลิตน้ำประปาที่มีกระบวนการสร้างและรวมตะกอน มาใช้ร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon จะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ของระบบผลิตน้ำประปาสูงเพิ่มขึ้น

การประยุกต์ใช้ผลจากงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 กรณีศึกษาประกอบด้วย 1) กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีกำลังการผลิต 4,520 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งมีการอุปโภคน้ำประปาในที่พักรวมทั้งของบุคลากร และนักศึกษาปริมาณ 2,377.83 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน 2) กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวดกำลังการผลิต 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 3) กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาหนองรังกาำลังการผลิต 600 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน

การประยุกต์ใช้ผลจากงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากระบบผลิตน้ำประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนซึ่งใช้น้ำดิบที่มีความขุ่นเท่ากับ 14.47 NTU และ DOC เท่ากับ 5.08 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวแทนของทั้ง 3 ระบบผลิตน้ำประปาเนื่องจากมีค่าความขุ่น และค่า DOC ใกล้เคียงกัน โดยการใช้สารสร้างตะกอน PACI ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มีการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารคลอรีนความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ HAA₅ เกิดขึ้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร และดูดซับ HAA₅ ด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่คำนวณหาความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ได้เท่ากับ 47.24 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยบรรจุในถังกรองที่มีถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ขนาดกว้าง 3.2 เมตร สูง 1.5 เมตร ซึ่งเป็นค่าการออกแบบถังกรองน้ำประปาหมู่บ้าน (สำนักบริหารจัดการน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2548) การออกแบบถังกรองที่บรรจุถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีรอบการใช้งาน 1 เดือนตามระยะเวลาของถังทรายกรองช้า (ประพัฒน์ เป็นตามวา, 2555) มีรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข. และสรุปค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย

ปัจจัย	ระบบผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยฯ	ระบบผลิตน้ำประปา โคกกรวด	ระบบผลิตน้ำประปา หนองรีงกา
ความขุ่น (NUT) ¹	9.30	6.24	4.48
DOC (มก./ล.) ¹	4.80	5.99	5.47
pH ¹	8.28	8.05	7.83
ปริมาณ PACl : ปริมาณ Cationic Polymer ² (กก./รอบ : กก./รอบ)	2,140 : 35.67	1,620 : 27	540 : 9
ปริมาณสารคลอรีน ² (กก./รอบ)	35.67	27	9
ปริมาณน้ำประปา ² (ลบ.ม./รอบ)	71,334.99	54,000	18,000
ปริมาณ HAA ₅ (กก./รอบ) ²	2.14	1.62	0.54
ความสามารถการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ² (ไมโครกรัม/ก.)	47.24	47.24	47.24
ปริมาณถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ชนิด Coconut shell activated carbon ² (กก./รอบ)	67,952.47	51,439.46	17,146.49
ปริมาตรถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ชนิด Coconut shell activated carbon ² (ลบ.ม./รอบ)	128.21	97.06	32.35
ขนาดถังกรองกว้าง x สูง (ม. x ม.)	3.2 x 1.5	3.2 x 1.5	3.2 x 1.5

ตารางที่ 4.4 ค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย (ต่อ)

ปัจจัย	ระบบผลิตน้ำประปา มหาวิทยาลัยฯ	ระบบผลิตน้ำประปา โคกกรวด	ระบบผลิตน้ำประปา หนองรังกา
ปริมาณถังกรอง ² (ลบ.ม./ถัง)	12.06	12.06	12.06
จำนวนถังกรอง ² (ถัง)	11	8	3

หมายเหตุ ¹ ค่าจากการตรวจวัดจริง

² ค่าที่ได้จากการคำนวณ

การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากงานวิจัยใช้ในระบบผลิตน้ำประปาทั้ง 3 กรณีการศึกษาที่มีความเข้มข้น NOMs และพีเอชในน้ำดิบมีค่าใกล้เคียงกัน จึงเสนอแนะให้ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารสร้างตะกอน PACI ปริมาณความเข้มข้นของสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ในกระบวนการสร้างตะกอน - รวมตะกอน และปริมาณความเข้มข้นของสารคลอรีนสำหรับฆ่าเชื้อโรคที่เท่ากัน ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งการลด NOMs ในน้ำดิบด้วยกระบวนการสร้างตะกอน - รวมตะกอนจากผลการศึกษาความเข้มข้นของ NOMs ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ มีความเข้มข้นของ HAA₅ เกิดขึ้น แต่ไม่เกิน 30 ไมโครกรัมต่อลิตร และสามารถกำจัด HAA₅ ในน้ำประปาด้วยถังกรองที่บรรจุถ่านกัมมันต์แบบเคลือบชนิด Coconut shell activated carbon รอบการใช้งาน 1 เดือน โดย 1)กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีต้องใช้จำนวนถังกรอง 11 ถัง 2) กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวดต้องใช้จำนวน ถังกรอง 8 ถัง และ 3) กรณีศึกษาระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านประปาหนองรังกาต้องใช้จำนวนถังกรอง 3 ถัง ซึ่งค่าออกแบบเบื้องต้นต่างกันขึ้นกับกำลังการผลิตน้ำประปาดังแสดงในตารางที่ 4.4

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

น้ำเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการดำรงชีวิตของมนุษย์รองลงมาจากออกซิเจนที่ใช้หายใจ การอุปโภคและบริโภคน้ำที่สะอาดปราศจากสิ่งเจือปนทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และเชื้อโรคที่ก่อให้เกิดโรค ย่อมทำให้ผู้อุปโภคและบริโภคมีสุขภาพดีมีชีวิตที่ยืนยาว โดยวิธีการสร้างและรวมตะกอนเป็นวิธีการทำน้ำให้สะอาดที่ได้รับความนิยมในระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีความซับซ้อนของกระบวนการน้อย ค่าใช้จ่ายต่ำ แต่วิธีการสร้างและรวมตะกอนไม่สามารถกำจัด NOMs ได้หมดจึงทำให้เกิดสาร HAAs จากการเติมสารคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งเป็นสารที่มีศักยภาพในการก่อมะเร็ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการกำจัด HAA₅ ในน้ำประปา โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาปริมาณของสารสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดความขุ่น และ NOMs ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับ HAA₅ บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการทดลองแบบที่ละเท และเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด HAA₅ ในชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเป็นตัวกลางดูดซับ โดยอาศัยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลระบบผลิตน้ำประปา จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา

ผลการศึกษาคุณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของอ่างเก็บน้ำสุระ พบว่าคุณลักษณะของน้ำทางกายภาพ ได้แก่ ความขุ่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.30 NTU และคุณลักษณะของน้ำทางเคมี ได้แก่ DOC มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.80 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.28 และคุณลักษณะของน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทั้ง 13 จุดของพื้นที่ที่ทำการศึกษามีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วง 0.53 - 2.78 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้โดยได้กำหนดให้มีคลอรีนอิสระคงค้างในน้ำประปาไว้ไม่ต่ำกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณสูงสุดไม่ควรเกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปานครหลวง,

2553; เกียรติศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) และมี 8 จุดของพื้นที่ที่ทำการศึกษาพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ ประกอบด้วย DCAA TCAA และ DBAA ได้แก่ หน่วยผลิตน้ำประปา อาคารบริหาร โรงอาหารกาสะลองคำ โรงอาหารเรียนรวม หอพักสุชนิเวศ อาคารบ้านพักบุคลากร หอพักสุชนิเวศ 13 และหอพักสุชนิเวศ 15 โดยจุดเก็บตัวอย่างน้ำในโรงอาหารกาสะลองคำ และหอพักสุชนิเวศ 13 มีความเข้มข้น HAA₅ สูงเท่ากับ 80.47 และ 178.23 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ US.EPA. กำหนดไว้โดยกำหนดให้ HAA₅ ไม่เกิน 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (US.EPA., 2012)

ผลการศึกษาคูณลักษณะของน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของอ่างเก็บน้ำห่มบ้านโคกกรวด และอ่างเก็บน้ำห่มบ้านหนองรังกา โดยคุณลักษณะของน้ำทางกายภาพ ได้แก่ ความขุ่น มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.24 และ 4.48 NTU ตามลำดับ และคุณลักษณะของน้ำทางเคมี ได้แก่ DOC มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.99 และ 5.47 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอชมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.05 และ 7.83 ตามลำดับ ระบบผลิตน้ำประปาห่มบ้านโคกกรวด และระบบผลิตน้ำประปาหนองรังกา มีค่าคลอรีนอิสระคงค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 1.18 - 2.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสูงเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ได้กำหนดให้มีคลอรีนอิสระคงค้างในน้ำประปาไว้ไม่ต่ำกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ปริมาณสูงสุดไม่ควรเกิน 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร (การประปานครหลวง, 2553; เกียรติศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) และพบปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ อยู่ในช่วงระหว่าง 68.63 - 347.34 ไมโครกรัมต่อลิตร ประกอบด้วย TCAA และ DCAA ซึ่งมีค่า HAA₅ สูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่ US.EPA. กำหนดไว้โดยกำหนดให้ HAA₅ ไม่เกิน 60 ไมโครกรัมต่อลิตร (US.EPA., 2012)

5.1.2 ผลการศึกษาการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

การทดลองแบบทีละเทประกอบไปด้วย ผลของกระบวนการสร้างและรวมตะกอน ผลของความเข้มข้นของ HAA₅ ที่เกิดขึ้น ผลของจลนพลศาสตร์การดูดซับ HAA₅ และผลของไอโซเทอร์มการดูดซับ HAA₅ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

ผลของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนเพื่อกำจัดความขุ่น และ NOMs ได้แก่ DOC ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา โดยการใสสารสร้างตะกอน PACl ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ที่ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดความขุ่น และ DOC ได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพกำจัดความขุ่นร้อยละ 96.84 และมีประสิทธิภาพกำจัด DOC ร้อยละ 64.42

ผลการศึกษาความเข้มข้นของ NOMs ในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ พบว่า น้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาเกิดความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 73.03 ไมโครกรัมต่อลิตร ประกอบด้วย TCAA และ DBAA สูงกว่าน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนที่เกิดความเข้มข้นของ HAA₅ เท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร ประกอบด้วย TCAA เมื่อมีการเติมสารคลอรีนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเติมสารคลอรีนที่ความเข้มข้น 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทำให้เกิดความเข้มข้น HAA₅ เท่ากับ 35.24 ไมโครกรัมต่อลิตร ประกอบด้วย DBAA TCAA และ DBAA ซึ่งความเข้มข้นสูงกว่าเมื่อเติมสารคลอรีนที่ความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้มีการศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับที่คาดว่าจะเกิดขึ้น ด้วยการทดลองประกอบด้วยผลของจลนพลศาสตร์การดูดซับ HAA₅ บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง และเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน และผลของไอโซเทิร์มการดูดซับ HAA₅ ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon เป็นไปตามสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ซึ่งแสดงได้ว่าเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว โดยอาจจะมีการดูดซับทางเคมีร่วมอยู่ด้วย และจากหาความสามารถในการดูดซับ HAA₅ โดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut activated shell carbon ให้ค่าเท่ากับ 54.95 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ HAA₅ มีพลังงานของการดูดซับเท่ากับทุกบริเวณ และพื้นที่ผิวมีจำนวนที่แน่นอนสอดคล้องกับสมการไอโซเทิร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชที่มีค่า $1/n$ เท่ากับ 0.2320 ซึ่งน้อยกว่า 1 สามารถอธิบายถึงปริมาณพื้นผิวมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

5.1.3 ผลการศึกษาการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test)

การทดลองแบบคอลัมน์ประกอบไปด้วย ผลการศึกษาของอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ผลการศึกษาของชั้นความสูงตัวกลางดูดซับในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ และผลการศึกษากราฟเบรกทูธ (Breakthrough curve) ของการดูดซับ HAA₅ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

การกำจัด HAA₅ ด้วยอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่มีชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สูง 10 เซนติเมตร (น้ำหนัก 115.21 กรัม) ด้วยน้ำ HAA₅ สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร อัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลที่

1.0 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด HAA₅ ที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 อัตราการไหลมีแนวโน้มลดลง โดยประสิทธิภาพของอัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 86.22 สามารถกำจัด HAA₅ ได้ดีกว่าประสิทธิภาพของอัตราการไหลที่ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80.25

ผลของชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่นำมาใช้ในการกำจัด HAA₅ ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ใช้อัตราการไหลที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่สามารถกำจัด HAA₅ ได้มากที่สุด พบว่า ประสิทธิภาพของชั้นความสูง 15 (น้ำหนัก 169.60 กรัม) และ 20 เซนติเมตร (น้ำหนัก 215.25 กรัม) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 100 ตามลำดับ สามารถกำจัด HAA₅ ได้ดีกว่าประสิทธิภาพของชั้นความสูง 10 เซนติเมตร (น้ำหนัก 115.21 กรัม) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 77.27

จากการทดลองแบบคอลัมน์ทั้ง 2 ปัจจัย สรุปได้ว่า อัตราเร็วการไหลที่ช้ากว่าจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า และชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยที่ประสิทธิภาพการกำจัดจะเกิดขึ้นสูงตามความชั้นความสูงที่เพิ่มขึ้น

ผลการศึกษารูปเบรกทรู (Breakthrough curve) ของการดูดซับ HAA₅ ได้จากผลการทดลอง 3 ส่วน ได้แก่ 1) ผลการศึกษาความเข้มข้นของ NOMs ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิด HAA₅ ที่เกิดขึ้นความเข้มข้นเท่ากับ 24.35 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยจะสังเคราะห์น้ำ HAA₅ ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 30 ไมโครกรัมต่อลิตร 2) ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ที่ 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง และ 3) ผลการศึกษาชั้นความสูง 15 เซนติเมตร ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ผลการศึกษา พบว่า โดยการกำจัด HAA₅ มีประสิทธิภาพร้อยละ 100 เกิดขึ้นจากเริ่มต้นจนถึง 12.6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาเบรกทรู และจากนั้นจะเริ่มเกิดการหมดสภาพมีระยะเวลาเท่ากับ 23.8 ชั่วโมง โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ เท่ากับ 36.68 ไมโครกรัมกรัมต่อกรัม มีความยาวของชั้นการดูดซับ HAA₅ เท่ากับ 7.05 เซนติเมตร มีระยะเวลาเดินระบบเท่ากับ 0.98 ชั่วโมง และมีอัตราการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon เท่ากับ 11.86 กรัมต่อลิตร

5.1.4 การนำผลการวิจัยเบื้องต้นประยุกต์ใช้ในระบบผลิตน้ำประปา

จากผลการทดลองแบบทีละเท และผลการทดลองแบบคอลัมน์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลระบบผลิตน้ำประปาที่มีกระบวนการสร้างและรวมตะกอนของระบบผลิต

น้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด และระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา โดยการลดความขุ่น และ NOMs ในน้ำดิบด้วยการใช้สารสร้างตะกอน PACI ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอน Cationic Polymer ความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร มาเชื่อมโรคด้วยสารคลอรีนความเข้มข้น 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ที่บรรจุในถังกรองสูง 1.5 เมตร กว้าง 3.2 เมตร เพื่อดูดซับ HAA₅ ที่เกิดขึ้น โดยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon มีความสามารถในการดูดซับ HAA₅ 47.24 ไมโครกรัมต่อกรัม ดังนั้นจากข้อมูลระบบผลิตน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีการอุปโภคน้ำประปาปริมาณ 71,334.99 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน จากผลการคำนวณจากงานวิจัย พบว่า มีปริมาณ HAA₅ เกิดขึ้น 2.14 กิโลกรัมต่อเดือน ต้องใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ปริมาณ 67,952.47 กิโลกรัมต่อเดือน เท่ากับถังกรองจำนวน 11 ถัง ระบบผลิตน้ำประปาของหมู่บ้านโคกกรวดมีการอุปโภคน้ำประปาปริมาณ 54,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน มีปริมาณ HAA₅ เกิดขึ้น 1.62 กิโลกรัมต่อเดือน ต้องใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ปริมาณ 51,439.46 กิโลกรัมต่อเดือน เท่ากับถังกรองจำนวน 8 ถัง และระบบผลิตน้ำประปาของหมู่บ้านหนองรังกามีการอุปโภคน้ำประปาปริมาณ 18,000 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน มีปริมาณ HAA₅ เกิดขึ้น 0.54 กิโลกรัมต่อเดือน ต้องใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ปริมาณ 17,146.49 กิโลกรัมต่อเดือน เท่ากับถังกรองจำนวน 3 ถัง เพื่อใช้ในการกำจัด HAA₅ น้ำประปา

5.2 ข้อจำกัด/ ข้อควรระวังในการศึกษา

1. คลอรีนอิสระคงค้างเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดความเข้มข้น HAA₅ ซึ่งจะมีผลทำให้ความเข้มข้น HAA₅ สูงขึ้นตามระยะเวลาที่สัมผัสกับสารคลอรีน ดังนั้นในการวิเคราะห์หาความเข้มข้น HAA₅ ควรวิเคราะห์วันที่เก็บตัวอย่าง หากไม่สามารถการวิเคราะห์ภายในวันที่เก็บตัวอย่าง ควรเติมสารละลายโซเดียมโซโอสัลเฟต 0.1 นอร์มัล เพื่อกำจัดคลอรีนอิสระคงค้างออกจากน้ำประปา

2. ในการศึกษาคุณลักษณะของระบบผลิตน้ำประปา การทดลองแบบทีละเท และการทดลองแบบคอลัมน์ ควรระวังการปนเปื้อนของ HAA₅ จากน้ำประปาที่ใช้ล้างเครื่องแก้ว ดังนั้นในทุกขั้นตอนการทดลองจำเป็นต้องใช้น้ำกลั่นแทนน้ำประปา

3. การเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นของ HAA₅ ด้วยวิธี US.EPA. 522.2 ควรเตรียมภายในวันที่จะวิเคราะห์ หรือก่อนวันที่จะวิเคราะห์เพียง 1 วัน เนื่องจากสาร HAA₅ เมื่อผ่านขั้นตอนของการเตรียมสารละลายจะสามารถระเหยได้ง่าย

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

1. กระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนโดยใช้สารสร้างตะกอนประเภท PACl ร่วมกับสารช่วยสร้างตะกอนประเภท Cationic Polymer ควรใช้อัตราส่วนที่เหมาะสม โดยข้อมูลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถกำจัดความขุ่น NOMs และ HAA₅ ในน้ำดิบได้

2. การกำจัด HAA₅ ในน้ำประปาหลังจากกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนแล้วเพื่อให้สามารถกำจัด HAA₅ ได้หมดสิ้น ควรเพิ่มกระบวนการกำจัดด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เช่น ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon

5.3.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเกิด HAAs เช่น อุณหภูมิ พีเอช เพื่อสามารถนำไปใช้ในการควบคุมการเกิด HAAs ในน้ำประปา

2. ควรศึกษาการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ให้มากขึ้นด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ เช่น การใช้ความดัน หรือวิธีการกระตุ้นทางเคมี เช่น การใช้กรด - ด่าง

3. การศึกษาในชุดการศึกษาแบบคอลัมน์ควรศึกษาข้อมูลอัตราการไหลของน้ำจากเกณฑ์การออกแบบถึงทรายกรองช้าเพื่อให้ทราบอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัด HAA₅

4. ควรศึกษาการประเมินความเสี่ยงสุขภาพของประชาชนต่อการอุปโภค บริโภคน้ำต่อการได้รับสัมผัส HAA₅ และทำการศึกษาการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการใช้วัสดุดูดซับในการกำจัดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค

รายการอ้างอิง

- กฤษดา ทองนาค. (2553). การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเกิดสารไตรฮาโลมีเทนในระบบประปาด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอน กรณีตัวอย่างแม่น้ำแม่กลองและแม่น้ำท่าจีน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2541). วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 2. นนทบุรี: โรงพิมพ์มิตรนรา.
- เกษราพร สุอรุณ และ โกวิทป์ ปิยะมังคลाय. (2555). จลนศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยเรซินไคโตซาน. *KKU Science Journal*, 40(4): 1285-1300.
- จรียา ยี่มรัตน์บวร และ สุดจิต ครุจิต. (2555). การประเมินคุณภาพน้ำในระบบประปาชุมชน. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย. (2554). กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชุตินา กัลยาประสิทธิ์. (2551). ผลของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของมีโซพอร์สซิลิเกตต่อการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เดชา นัตรศิริเวช. (2552). กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ต่อตระกูล วัฒนวรกิจกุล. (2545). การกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทัศนาศู เกื้อเส้ง. (2553). การลดปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำในน้ำดิบประปาจากอ่างเก็บน้ำศรีตรังด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและกระบวนการโอโซนเนชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สงขลา.
- นิรามัย ไตรวงษ์. (2558). การกำจัดตะกั่วและแมงกานีสในน้ำใต้ดิน ด้วยเหล็กวาเลนซ์ศูนย์และฟิอาร์บี. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

- ประพัฒน์ เป็นตามวา. (2555). การประชุมชนเมืองและชนบท. นครราชสีมา: ศูนย์บรรณสารและ
 สื่อการศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปรีนทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จาก
 ไม้ตองและไม้หมาจู้. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภูวดล ศิริสินเลิศ. (2552). สมรรถนะของกระบวนการโคแอกกูเลชันและการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์
 ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในน้ำ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2537). วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่ง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่ง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2545). เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:
 กรุงเทพฯ.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป และ ผ่องศรี เผ่าภูรี. (2550). รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาไตรฮาโลมีเทนใน
 น้ำประปาที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน กรณีตัวอย่างระบบประปาของเทศบาลนคร
 นครปฐม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. (2535). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่
 8 (พ.ศ. 2537).
- ราชัน ธีระพิทยาตระกูล. (2545). การก่อกำเนิดของไตรฮาโลมีเทนในน้ำดื่มของระบบประปาชนบทใน
 จังหวัดนครราชสีมา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
 สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2532). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่าน
 กัมมันต์. กรุงเทพมหานคร.
- สำนักบริหารจัดการน้ำ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2548).
 คู่มือการก่อสร้างระบบประปาหมู่บ้าน. นนทบุรี.

- สุกุลยา ทับอุไร. (2554). การประยุกต์ใช้กระบวนการอัลตราฟิเตรชันสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในกระบวนการผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- APHA, AWWA, and WEF. (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th ed. Washington DC: USA.
- Babi, K. G., Koumenides, K. M., Nikolaou, A. D., Makri, C. A., Tzoumerkas, F. K., and Lekkas, T. D. (2007). Pilot study of the removal of THMs, HAAs and DOC from drinking water by GAC adsorption. **Desalination**. 210(1-3): 215-224.
- Bond, T., Goslan, E. H., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2012). A critical review of trihalomethane and haloacetic acid formation from natural organic matter surrogates. **Environmental Technology Reviews**. 1(1): 93-113.
- CBCL limited. (2011). **Study on Characteristics and Removal of Natural Organic Matter in Drinking Water Systems in Newfoundland and Labrador**. Department of Environment and Conservation Water Management Division: Canada.
- Chalatip, R., Chawalit, R., and Nopawan, R. (2009). Removal of haloacetic acids by nanofiltration. **Journal of Environmental Sciences**. 21(1): 96-100.
- Chow, C. W., Fitzgerald, F., and Holmes, M. (2004). The impact of natural organic matter on disinfection demand-a tool to improve disinfection control. **Enviro 04 Convention & Exhibition Proceedings** (pp. 1-6).
- Chuang, Y.-H., Wang, G.-S., and Tung, H.-h. (2011). Chlorine residuals and haloacetic acid reduction in rapid sand filtration. **Chemosphere**. 85(7):
- Ghomsheh, S. M., Soltanieh, M. O. H. A. M. M. A. D., and Mosavi, M. A. H. M. O. D. (1790). Overview of the separation and removal of haloacetic acids in drinking water. **Advances in waste management**. 1146-1153.
- Ghomshe, S. T., Mousavi, S., Soltanieh, M., and Kordi, A. S. (2011). Batch and column study of haloacetic acids adsorption onto granular activated carbon. **Scientific Research and Essays**. 6(16): 3553-3560.

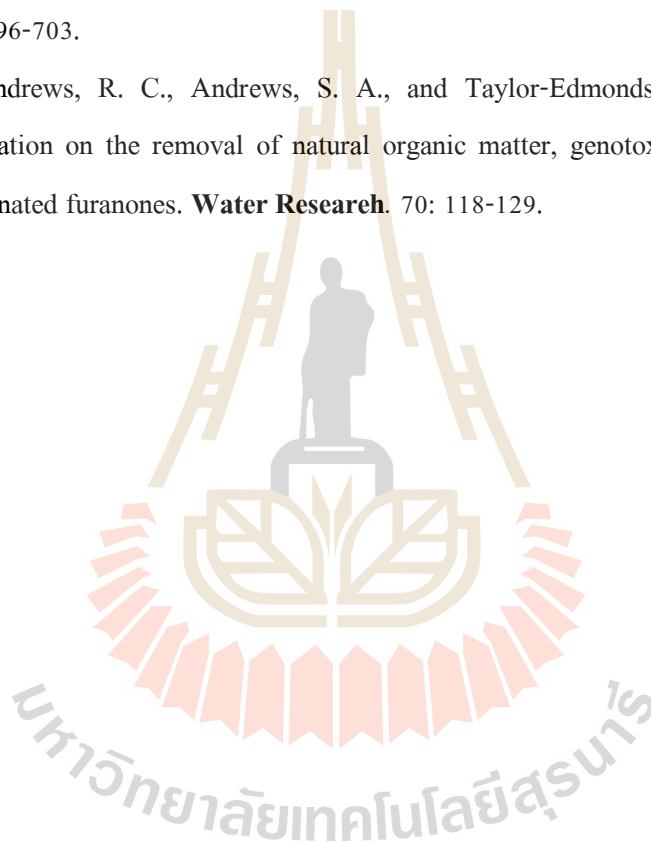
- Guay, C., Rodriguez, M., and Sérodes, J. (2005). Using ozonation and chloramination to reduce the formation of trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water. **Desalination**. 176(1-3): 229-240.
- Hanigan, D., Zhang, J., Herckes, P., Krasner, S. W., Chen, C., and Westerhoff, P. (2012). Adsorption of N-nitrosodimethylamine precursors by powdered and granular activated carbon. **Environ Sci Technol**. 46(22): 12630-12639.
- Harman, M., Rumsby, P., and Kanda, R. (2011). **Evaluation of Haloacetic Acid Concentrations in Treated Drinking Water**. UK.
- Hensuk, T., and Prasityousin, J. (2012). Removal of Trichloroethylene in Groundwater by Activated Carbon Adsorption Process. **Graduate Research Conference**: 182-186.
- Hong, H. C., Huang, F. Q., Wang, F. Y., Ding, L. X., Lin, H. J., and Liang, Y. (2013). Properties of sediment NOM collected from a drinking water reservoir in South China, and its association with THMs and HAAs formation. **Journal of Hydrology**. 476: 274-279.
- Joseph, L., Flora, J. R. V., Park, Y.-G., Badawy, M., Saleh, H., and Yoon, Y. (2012). Removal of natural organic matter from potential drinking water sources by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials. **Separation and Purification Technology**. 95: 64-72.
- Jung, C.-W., and Son, H.-J. (2008). The relationship between disinfection by-products formation and characteristics of natural organic matter in raw water. **Korean Journal of Chemical Engineering**. 25(4): 714-720.
- Lekkas, T. D., Babi, K. G., Koumenides, K. M., Makri, C. A., Lekkas, D. T., and Nikolaou, A. D. (2009). Removal of specific DBPs by GAC in Galatsi WTP, Athens. **Global NEST Journal**. 11(3): 349-356.
- Ling, J., and Husain, T. (2012). **Technologies to Remove DBPs in Drinking Water in Newfoundland and Labrador A Review**. Memorial University of Newfoundland.
- Lu, J., Zhang, T., Ma, J., and Chen, Z. (2009). Evaluation of disinfection by-products formation during chlorination and chloramination of dissolved natural organic matter fractions isolated from a filtered river water. **J Hazard Mater**. 162(1): 140-145.

- Marhaba, T., and Washington, M. (1998). Drinking water disinfection and by-products: history and current practice. **Advances in Environmental Research**. 2(1): 103-115.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., and Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. **Adv Colloid Interface Sci**. 159(2): 189-197.
- Metcalf, D., Rockey, C., Jefferson, B., Judd, S., and Jarvis, P. (2015). Removal of disinfection by-product precursors by coagulation and an innovative suspended ion exchange process. **Water Research**. 87: 20-28.
- Nikolaou, A., Lekkas, T., and Golfinopoulos, S. (2004). Kinetics of the formation and decomposition of chlorination by-products in surface waters. **Chemical Engineering Journal**. 100(1-3): 139-148.
- Nissinen, T. K., Miettinen, I. T., Martikainen, P. J., and Vartiainen, T. (2002). Disinfection by-products in Finnish drinking waters. **Chemosphere**. 48(1): 9-20.
- NIOSH. (2003). **Pocket Guide to Chemical Hazards**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services.
- Nwabanne, J. T., and Igbokwe, P. K. (2012). Adsorption Performance of Packed Bed Column for the removal of Lead (ii) using oil Palm Fibre. **International Journal of Applied Science and Technology**. Vol. 2 No. 5.
- Panyapinyopol, B. (2004). **Characterization Treatment and Removal of Trihalomethane Precursors Bangkok Source Water** Degree of Doctor of Philosophy Environmental Management (Inter-Department) Graduate School Chulalongkorn University.
- Pentamwa, P., Sukton, B., Wongklom, T., and Pentamwa, S. (2013). Cancer Risk Assessment from Trihalomethanes in Community Water Supply at Northeastern Thailand. **International Journal of Environmental Science and Development**: 538-544.
- Rakruam, P. (2013). **Trihalomethane Formation Potential of DOM Fractions in Water Production by In-line Coagulation Ceramic Membrane Microfiltration** Degree of Doctor of Philosophy Program Environmental Management (Interdisciplinary Program) Graduate School Chulalongkorn University.

- Ratasuk, C., Kositanont, C., and Ratanatamskul, C. (2008). Removal of haloacetic acids by ozone and biologically active carbon. **ScienceAsia**. 34(3): 293.
- Richardson, S. D. (2005). New disinfection by-product issues: emerging DBPs and alternative routes of exposure. **Global Nest J**. 7(1): 43-60.
- Righi, E., Fantuzzi, G., Predieri, G., and Aggazzotti, G. (2014). Bromate, chlorite, chlorate, haloacetic acids, and trihalomethanes occurrence in indoor swimming pool waters in Italy. **Microchemical Journal**. 113: 23-29.
- Rizzo, L., Belgiorno, V., Gallo, M., and Meric, S. (2005). Removal of THM precursors from a high-alkaline surface water by enhanced coagulation and behaviour of THMFP toxicity on *D. magna*. **Desalination**. 176(1): 177-188.
- Rodriguez, M. J., Serodes, J., and Roy, D. (2007). Formation and fate of haloacetic acids (HAAs) within the water treatment plant. **Water Res**. 41(18): 4222-4232.
- Sacher, F., von Gunten, U., Lee, C., and Schmidt, C. (2008). **Strategies for minimizing nitrosamine formation during disinfection**. Water Environment Research Foundation.
- Sharp, E. L., Jarvis, P., Parsons, S. A., and Jefferson, B. (2006). Impact of fractional character on the coagulation of NOM. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 286(1-3): 104-111.
- Singer, P. C. (1999). Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products. **Water Science and Technology**. 40(9): 25-30.
- Soonglerdsongpha, S. (2006). **Removal of haloacetic acid by adsorption on mesoporous silicates** Degree of Master of Science Program in Environmental Management Interdisciplinary Program Graduate School Chulalongkorn University.
- Tang, H. L., and Xie, Y. F. (2016). Biologically active carbon filtration for haloacetic acid removal from swimming pool water. **Science of the Total Environment**. 541: 58-64.
- U. Dmitruk, and J. Dojlido. (2007). Haloacetic Acids (HAAs) in the Central Waterworks in Warsaw, Poland. **Polish J. of Environ**. 16: 51-56.
- U.S.EPA. (1998). **Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation**. Washington DC.

- U.S.EPA. (2012). **2012 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories**. Washington, DC.
- Uansiri, S. (2009). **Determination of Haloacetic Acids in Water Samples Using Ion Chromatography**. Master of Science Chemistry Mahasarakham University.
- US.EPA. (1995). **Determination of haloacetic acids and dalapon in drinking water by liquid-liquid extraction, derivatization and gas chromatography with electron capture detection Method 552.2**, Rev. 1.0: Washington, DC.
- US.EPA. (2012). **EPA Drinking Water Guidance on Disinfection By-Products In nd (Ed.), Disinfection By-Products in Drinking Water (2 nd ed.)**. United Kingdom.
- Uyak, V., and Toroz, I. (2007). Disinfection by-product precursors reduction by various coagulation techniques in Istanbul water supplies. **J Hazard Mater**. 141(1): 320-328.
- Villanuevaa, C. M., Kogevinasa, M., and Grimaltb, J. O. (2003). Haloacetic acids and trihalomethanes in finished drinking waters from heterogeneous sources. **Water Research**. 37: 953-958.
- Viraraghavan, T., and Wimmer, C. (1988). Polyaluminum Chloride as an Alternative to Alum Coagulation--A Case Study. **Aqua AQUAAA**(6).
- WHO. (2006). **Guidelines for drinking-water quality**. 3rd ed. Vol. 1 Recommendations: Switzerland.
- Wu, X., Ge, X., Wang, D., and Tang, H. (2007). Distinct coagulation mechanism and model between alum and high Al₁₃-PACl. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 305(1-3): 89-96.
- Xie, Y. (2001). Analyzing haloacetic acids using gas chromatography/mass spectrometry. **Water research**. 35(6): 1599-1602.
- Xu, Y., Chen, T., Liu, Z., Zhu, S., Cui, F., and Shi, W. (2016). The impact of recycling alum-humic-floc (AHF) on the removal of natural organic materials (NOM): Behavior of coagulation and adsorption. **Chemical Engineering Journal**. 284: 1049-1057.

- Zhan, X., Gao, B., Yue, Q., Wang, Y., and Wang, Q. (2010). Coagulation efficiency of polyaluminum chloride for natural organic matter removal from low specific UV absorbance surface water and the subsequent effects on chlorine decay. **Chemical Engineering Journal**. 161(1-2): 60-67.
- Zhang, F., Wang, Y., Chu, Y., Gao, B., Yue, Q., Yang, Z., and Li, Q. (2013). Reduction of organic matter and trihalomethane formation potential in reclaimed water from treated municipal wastewater by coagulation and adsorption. **Chemical Engineering Journal**. 223: 696-703.
- Zheng, D., Andrews, R. C., Andrews, S. A., and Taylor-Edmonds, L. (2015). Effects of coagulation on the removal of natural organic matter, genotoxicity, and precursors to halogenated furanones. **Water Research**. 70: 118-129.





ภาคผนวก ก.

วิธีวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 การวิเคราะห์หาปริมาณกรดฮาโลอะซีติก

ในการวิเคราะห์หาปริมาณ HAA₅ ทำตามวิธีของ US EPA Method 552.2 ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ 2 ขั้นตอนดังนี้

ก.1.1 ขั้นตอนการสกัด

1. นำสารละลายตัวอย่างมาจำนวน 40 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดแก้วขนาด 60 มิลลิลิตร แล้วเติม 1,2,3 ไตรคลอโรโพรเพน 99+% ($C_3H_5Cl_3$) (surrogate standard) จำนวน 20 ไมโครลิตร

2. ปรับพีเอชให้น้อยกว่า 0.50 ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นอย่างน้อย 2 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้ผสมกันดี แล้วนำไปตรวจสอบพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

3. เติมคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต เพนตะไฮเดรตจำนวน 2 กรัม อย่างรวดเร็ว เขย่าจนละลายหมด จะได้สารละลายสีฟ้า แล้วจึงเติมโซเดียมซัลเฟตจำนวน 16 กรัม อย่างรวดเร็วเขย่า 3 - 5 นาทีจนละลายหมด

4. เติม MTBE จำนวน 4 มิลลิลิตร เขย่าให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที 250 รอบต่อ นาที แล้วจึงทิ้งไว้ให้แยกชั้นประมาณ 5 นาที

ก.1.2 ขั้นตอนเมทธีลเลชัน

1. ปิเปต MTBE ที่อยู่ชั้นบนมา 3 มิลลิลิตร ใส่ลงใน conical centrifuge tube แล้วเติม 10% กรดซัลฟิวริกในเมทธานอลจำนวน 1 มิลลิลิตร

2. ปิดฝาหลอดแล้วนำไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำหลอดออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3. เติมสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตต้มตัวจำนวน 4 มิลลิลิตร เขย่าเป็นเวลา 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

4. นำสารละลาย MTBE จำนวน 1 มิลลิลิตร ใส่ลงใน autosampler vial เติมสารละลาย 2,3 ไดโบโรโมโพรพิโอนิกแอซิด 99+% ($C_3H_4Br_2O_2$) (internal standard) จำนวน 10 ไมโครลิตร ลงใน vial แล้วนำตัวอย่างที่สกัดแล้วไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph-Mass Spectrometer (GC-MS) อุณหภูมิของอินเจกเตอร์เท่ากับ 250 °C ระบบการฉีดสารตัวอย่างเป็นแบบ splitless mode เท่ากับ 30 วินาที ให้ก๊าซฮีเลียม และก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพาด้วยอัตรา 45 cm/sec ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิของเครื่องเริ่มที่ 35 °C ให้อุณหภูมิคงที่ 10 นาทีและเพิ่มขึ้นเป็น 75 °C ด้วยอัตรา 5 °C/นาที คงที่ไว้ 15 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 15 °C/ นาที จนอุณหภูมิเท่ากับ 200 °C และอุณหภูมิของดีเทกเตอร์เท่ากับ 280 °C

ก.2 การวิเคราะห์หาคลอรินอิสระคงค้างด้วยวิธี Iodometric

ก.2.1 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายบัฟเฟอร์ ละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรัส (Na_2HPO_4) 24 กรัม และโพแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรัส (KH_2PO_4) 46 กรัม ในน้ำกลั่น ละลาย EDTA 800 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร นำสารละลายทั้งสองมารวมกันแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร เติม HgCl_2 20 มิลลิกรัม เพื่อกั้นราและการรบกวนจากไอโอดีน

2. สารละลายดีพีดี ละลาย N,N-diethyl-p-phenylenediamine (DPD) Oxalate 1 กรัม หรือ DPD Sulfate pentahydrate 1.5 กรัม หรือ anhydrous DPD Sulfate 1.1 กรัม ในน้ำกลั่นที่มีกรดกำมะถัน (1+3) จำนวน 8 มิลลิลิตร และ EDTA จำนวน 200 มิลลิกรัม ผสมกัน เจือจางให้เป็น 1000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่มืดโดยใช้ขวดสีชาและจุกแก้ว

3. สารละลายมาตรฐานเอฟเอเอส ละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 1.106 กรัม ลงในน้ำกลั่นที่มีกรดกำมะถันเข้มข้น (1+3) จำนวน 1 มิลลิลิตร ผสมอยู่ เติมน้ำกลั่นที่เพิ่งต้มเดือดและปล่อยให้เย็นมาใหม่ๆ จนได้ปริมาตรเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้ใช้ได้ไม่เกิน 1 เดือน

ก.2.2 การวิเคราะห์

1. เติมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ สารละลาย DPD อินดิเคเตอร์อย่างละ 5 มิลลิลิตร ลงในขวดไตเตรต เขย่าให้เข้ากัน

2. เติมน้ำตัวอย่างปริมาณ 100 มิลลิลิตร (อาจผ่านการเจือจางมาแล้วก็ได้) ผสมให้เข้ากัน

3. ไตเตรตอย่างรวดเร็วกับสารละลายมาตรฐาน FAS จนสีแดงหายไป (FAS 1 มิลลิลิตร = คลอรินอิสระคงค้าง 1 มิลลิกรัม Cl_2 /ลิตร)



ภาคผนวก ข.

กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิติก

ข.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิติก

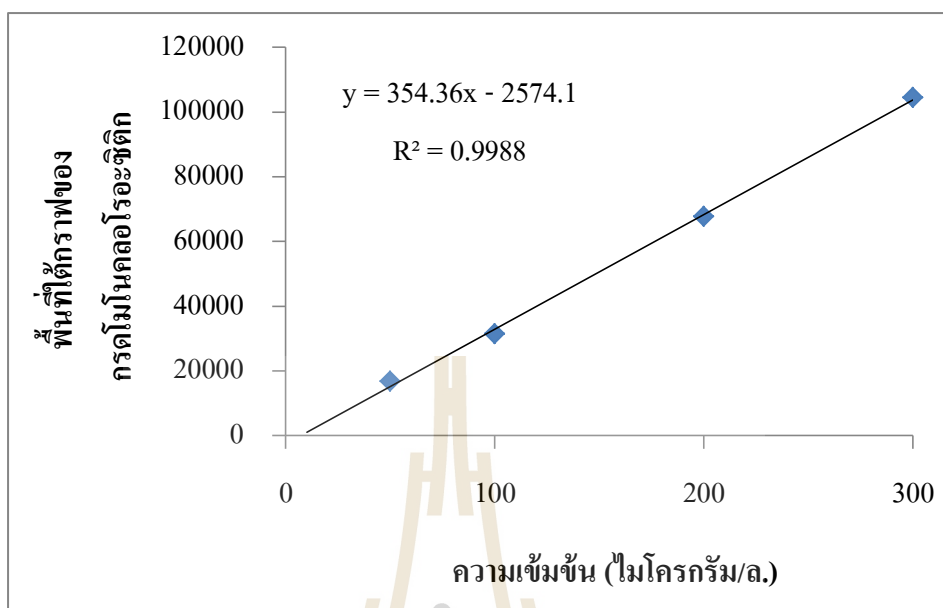
เตรียมสารละลายมาตรฐานของ HAA₅ ผลิตภัณฑ์ Supelco จากบริษัท Sigmaaldrich Co. LLC ประกอบด้วย 5 ชนิด ได้แก่ กรดโมโนคลอโรอะซิติก (MCAA) กรดไดคลอโรอะซิติก (DCAA) กรดไตรคลอโรอะซิติก (TCAA) กรดโมโนโบรโมอะซิติก (MBAA) และกรดไดโบรโมอะซิติก (DBAA) โดยผ่านขั้นตอนเมทริลเลชันของการวิเคราะห์ HAA₅ ซึ่งมี Detection time ต่างกัน คือ 8.59 12.89 13.60 17.50 และ 21 นาที ตามลำดับ โดยมีพื้นที่ใต้กราฟจากการเตรียมความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานของ HAA₅ ดังตารางที่ ข.1 จากนั้นเขียนกราฟมาตรฐานของสารละลาย HAA₅ แต่ละชนิด ระหว่างความเข้มข้นของ HAA₅ กับพื้นที่ใต้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 พื้นที่ใต้กราฟของกรดฮาโลอะซิติกแต่ละชนิดตามความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานของกรดฮาโลอะซิติก

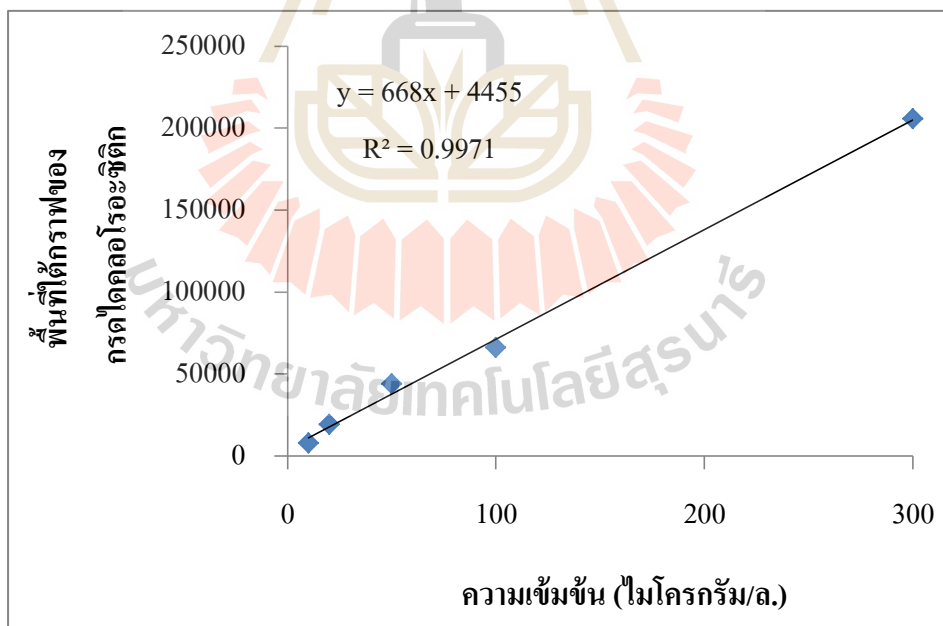
ความเข้มข้น (ไมโครกรัมต่อลิตร)	พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานของ HAA ₅ แต่ละชนิด				
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA
1	ND	ND	ND	ND	ND
10	ND	8031	5988	ND	1647
20	ND	19100	15265	4366	6967
50	16619	44034	24231	9721	9792
100	31355	66233	39904	16032	17163
200	67626	33881	159317	33881	37404
300	104440	205517	109932	48248	53390

หมายเหตุ ค่า ND คือ Non detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA

DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

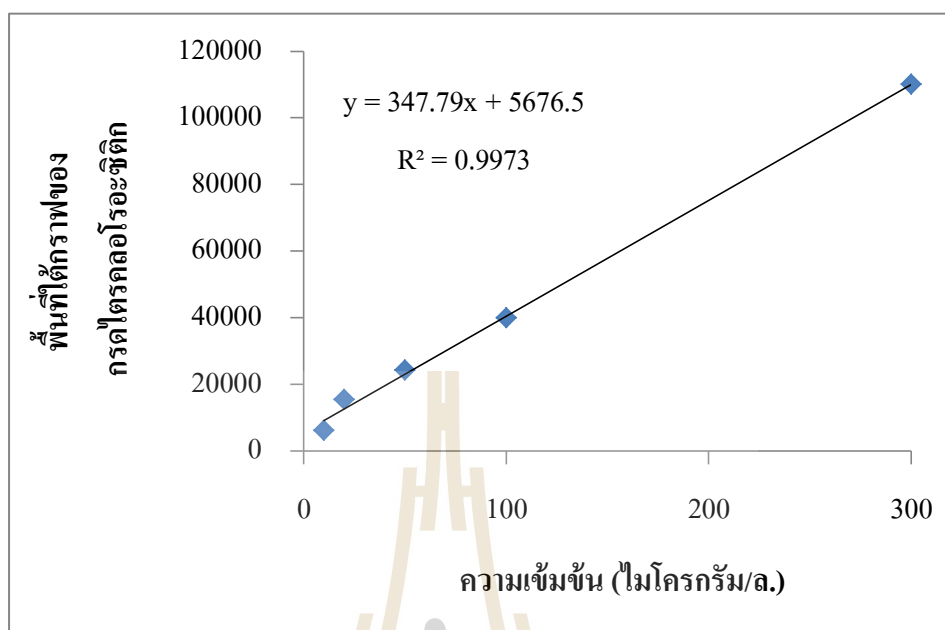


ก. กราฟมาตรฐานของกรดโมโนคลอโรอะซิติก

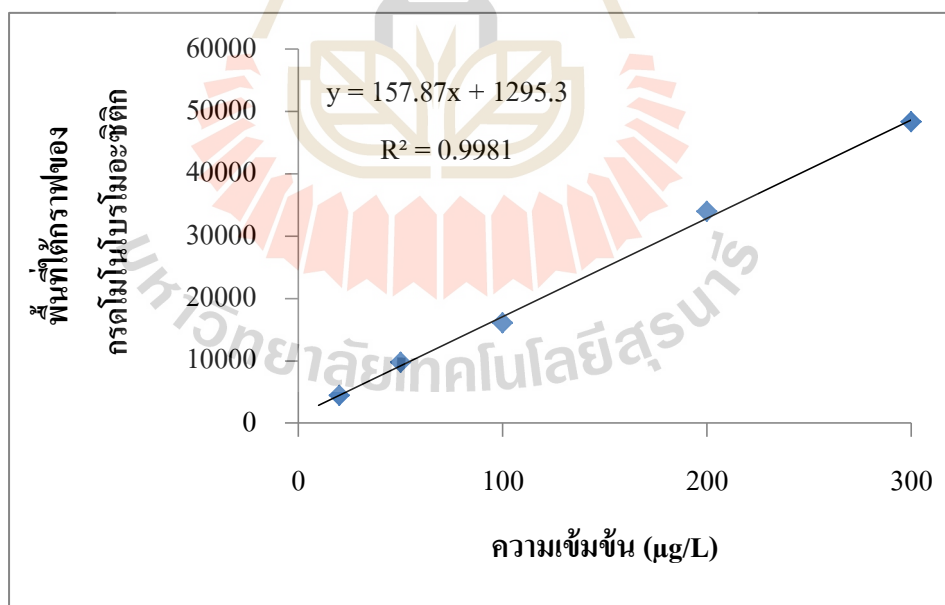


ข. กราฟมาตรฐานของกรดไดคลอโรอะซิติก

รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิติก

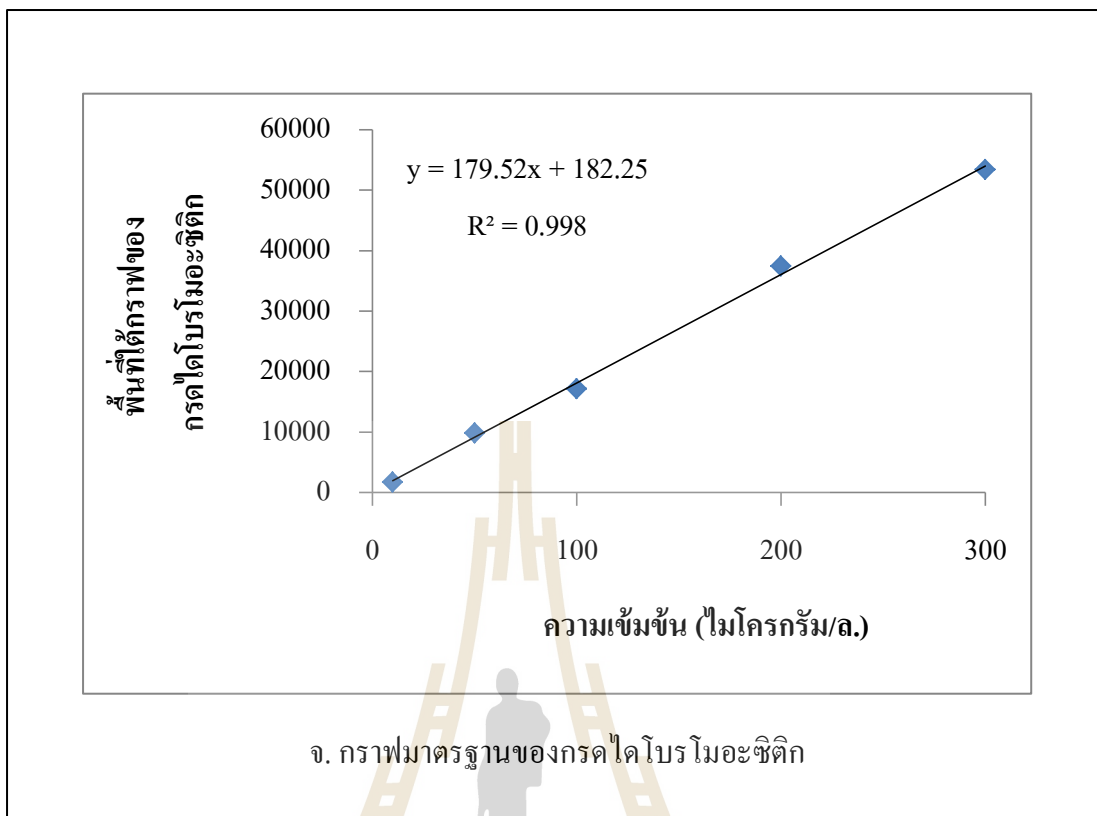


ค. กราฟมาตรฐานของกรดไตรคลอโรอะซิดิก



ง. กราฟมาตรฐานของกรดโมนอโรอะซิดิก

รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิดิก (ต่อ)



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกรดฮาโลอะซิดิก (ต่อ)



ภาคผนวก ค.

คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปาที่ศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา

คุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปamahวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และระบบผลิตน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี ที่ทำการวิเคราะห์มีดัชนีของคุณภาพน้ำที่ต่างกัน ประกอบด้วย น้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปาก่อนที่เข้าระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ และน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้ว หรือน้ำประปา

ค.1.2 น้ำดิบสำหรับการผลิตน้ำประปา

การวิเคราะห์โดยมีดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ความขุ่น DOC และ HAA₅ ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บช่วงที่มีกระบวนการผลิตน้ำประปาของเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 DOC คำนวณได้จากสมการที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ ค.1 ค.2 และ ค.3

ตารางที่ ค.1 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปamahวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พารามิเตอร์	อ่างเก็บน้ำสุระ				ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	
ความขุ่น (NTU)	7.47	10.40	10.02	9.30	1.59
DOC (มก./ล.)	4.78	4.92	4.72	4.80	0.10
พีเอช	8.87	8.16	7.80	8.28	0.54
HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)	ND	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ ค.2 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้าน โศกกรวด

พารามิเตอร์	อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโศกกรวด				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความขุ่น (NTU)	7.34	4.12	7.25	6.24	1.83
DOC (มก./ล.)	6.04	6.27	5.65	5.99	0.31
ฟิเอร์	8.38	7.93	7.83	8.05	0.29
HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)	ND	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ ค.3 คุณลักษณะน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา

พารามิเตอร์	อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านหนองรังกา				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ความขุ่น (NTU)	4.10	5.29	4.04	4.48	0.71
DOC (มก./ล.)	5.59	6.06	4.76	5.47	0.66
ฟิเอร์	7.93	7.78	7.77	7.83	0.09
HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

ค.1.2 น้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้ว หรือน้ำประปา

การวิเคราะห์โดยหาค่าดัชนีคุณภาพน้ำ ได้แก่ ค่าคลอรีนอิสระคงค้าง ค่า DOC ค่าฟิเอช และค่า HAA₅ สำหรับน้ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้ว ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บในวันที่มีกระบวนการผลิตน้ำประปาของเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ดังแสดงในตารางที่ ค.4 ค.5 ค.6 และ ค.7

ตารางที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำจากน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จุดเก็บตัวอย่าง	คลอรีนอิสระคงค้าง (มก./ล.)	DOC (มก./ล.)	ฟิเอช
หน่วยผลิตน้ำประปา	2.78	2.72	7.88
หอพักสุรนิวศ 15	2.36	2.47	7.68
อาคารบริหาร	0.53	2.12	7.9
โรงพยาบาลมหาวิทยาลัย	0.53	1.81	8.16
หอพักสุรนิวศ 13	2.72	2.56	7.78
โรงอาหารกาสะลองคำ	2.13	2.27	7.6
หอพักสุรนิวศ 16	0.65	2.19	8.11
สถานกีฬาและสุขภาพ	0.53	1.85	8.02
อาคารบ้านพักบุคลากร	1.18	2.36	7.81
หอพักสุชนิวาส	1.00	2.49	7.67
อาคารเรียนรวม 1	2.36	1.98	7.76
โรงอาหารเรียนรวม	1.54	1.67	7.67
โรงอาหารกลาง	0.77	2.35	7.98

ตารางที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำจากน้ำประปาที่บริหารงาน โดยเทศบาลตำบลสุรนารี

จุดเก็บตัวอย่าง	คลอรีนอิสระคงค้าง (มก./ล.)	DOC (มก./ล.)	พีเอช
ต้นท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน โศกกรวด	2.25	3.21	7.98
กลางท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน โศกกรวด	1.36	2.65	7.77
ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำหมู่บ้าน โศกกรวด	1.18	2.48	7.82
ต้นท่อจ่ายน้ำหมู่บ้านหนองรังกา	1.60	3.34	7.67
กลางท่อจ่ายน้ำหมู่บ้านหนองรังกา	1.42	3.22	7.68
ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำหมู่บ้านหนองรังกา	1.30	2.99	7.66

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์หารคหาโลหะซดิกจากน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จุดเก็บตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)					
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅
หน่วยผลิตน้ำประปา	ND	35.32	ND	ND	ND	35.32
หอพักสุรนารี 15	ND	26.65	12.41	ND	ND	39.06
อาคารบริหาร	ND	ND	ND	ND	13.89	13.89
โรงพยาบาลมหาวิทยาลัย	ND	ND	ND	ND	ND	ND
หอพักสุรนารี 13	ND	72.82	105.40	ND	ND	178.23
โรงอาหารกาสะลองคำ	ND	53.47	27.01	ND	ND	80.47
หอพักสุรนารี 16	ND	ND	ND	ND	ND	ND
สถานกีฬาและสุขภาพ	ND	ND	ND	ND	ND	ND
อาคารบ้านพักบุคลากร	ND	1	ND	ND	ND	1

ตารางที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์หากรดชาติอะซิติกจากน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ต่อ)

จุดเก็บตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)					
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅
หอพักสุชนิเวศ	ND	6.77	ND	ND	ND	6.77
อาคารเรียนรวม 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
โรงอาหารเรียนรวม	ND	2.32	ND	ND	ND	2.32
โรงอาหารกลาง	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ตารางที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์หากรดชาติอะซิติกจากน้ำประปาที่บริหารงานโดยเทศบาลตำบลสุรนารี

จุดเก็บตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)					
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅
ต้นท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน โคกกรวด	ND	42.99	25.64	ND	ND	68.63
กลางท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน โคกกรวด	ND	159.65	187.69	ND	ND	347.34
ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ หมู่บ้านโคกกรวด	ND	111.96	153.53	ND	ND	265.49
ต้นท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน หนองรังกา	ND	108.23	115.84	ND	ND	224.07
กลางท่อจ่ายน้ำหมู่บ้าน หนองรังกา	ND	122.25	179.55	ND	ND	301.81
ปลายท่อบ้านผู้ใช้น้ำ หมู่บ้านหนองรังกา	ND	97.35	159.14	ND	ND	256.50

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก ง.

ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

ง.1 ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

ผลการทดลองประกอบด้วย 4 ผลการทดลอง ดังนี้

ง.1.2 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอน

การทดลองเพื่อหาปริมาณสร้างตะกอน และสารช่วยสร้างตะกอนที่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา ได้แก่ ความขุ่น และ DOC ซึ่ง DOC คำนวณหาได้จากสมการที่ 2.1 ดังแสดงในตารางที่ ง.1 และ ง.2

ตารางที่ ง.1 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดความขุ่น

PACI : Cationic polymer (มก/ล. : มก/ล.)	ค่าความขุ่น (NUT)				ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
10 : 0.1	1.73	1.76	1.76	1.75	87.91
10 : 0.2	2.02	2.03	2.02	2.02	86.02
10 : 0.3	2.14	2.17	2.17	2.16	85.07
10 : 0.4	1.68	1.67	1.69	1.68	88.39
10 : 0.5	1.64	1.65	1.65	1.65	88.62
20 : 0.1	0.40	0.39	0.41	0.40	97.24
20 : 0.2	0.39	0.37	0.37	0.38	97.40
20 : 0.3	0.28	0.29	0.27	0.28	98.06
20 : 0.4	0.40	0.42	0.41	0.41	97.17
20 : 0.5	0.39	0.38	0.40	0.39	97.30
30 : 0.1	0.61	0.62	0.60	0.61	95.78
30 : 0.2	0.41	0.40	0.39	0.40	97.24
30 : 0.3	0.53	0.55	0.55	0.54	96.25
30 : 0.4	1.30	1.32	1.35	1.32	90.85
30 : 0.5	0.46	0.44	0.47	0.46	96.84

ตารางที่ ง.1 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดความขุ่น (ต่อ)

PACl : Cationic polymer (มก/ล. : มก/ล.)	ค่าความขุ่น (NUT)				ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
40 : 0.1	3.13	3.16	3.17	3.15	78.21
40 : 0.2	2.76	2.76	2.78	2.77	80.88
40 : 0.3	1.23	1.23	1.21	1.22	91.55
40 : 0.4	1.04	1.07	1.05	1.05	92.72
40 : 0.5	1.62	1.60	1.62	1.61	88.85
50 : 0.1	11.60	11.30	11.30	11.40	21.22
50 : 0.2	15.10	15	14.90	15	0
50 : 0.3	11.80	11.60	11.50	11.63	19.60
50 : 0.4	16.50	16.20	16.20	16.30	0
50 : 0.5	14.20	14.10	14.30	14.20	1.87

ตารางที่ ง.2 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ

PACl : Cationic polymer (มก/ล. : มก/ล.)	ค่า DOC (มก/ล.)				ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
10 : 0.1	3.31	3.31	3.31	3.31	34.82
10 : 0.2	3.11	3.11	3.13	3.12	38.61
10 : 0.3	3.87	3.87	3.89	3.87	23.74
10 : 0.4	2.67	2.69	2.69	2.68	47.21
10 : 0.5	2.89	2.87	2.89	2.88	43.28

ตารางที่ ๓.2 ผลของการศึกษากระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำ (ต่อ)

PACl : Cationic polymer (มก./ล. : มก./ล.)	ค่า DOC (มก./ล.)				ประสิทธิภาพการ กำจัด (ร้อยละ)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
20 : 0.1	2.18	2.18	2.20	2.19	56.98
20 : 0.2	2.73	2.73	2.76	2.74	46.05
20 : 0.3	2.07	2.07	2.09	2.07	59.17
20 : 0.4	2.09	2.09	2.09	2.09	58.88
20 : 0.5	2.07	2.07	2.09	2.07	59.17
30 : 0.1	1.93	1.93	1.93	1.93	61.94
30 : 0.2	2.84	2.84	2.84	2.84	44.01
30 : 0.3	1.84	1.84	1.84	1.84	63.69
30 : 0.4	1.84	1.87	1.87	1.86	63.40
30 : 0.5	1.80	1.80	1.82	1.81	64.42
40 : 0.1	2.87	2.87	2.89	2.87	43.42
40 : 0.2	2.53	2.53	2.56	2.54	49.99
40 : 0.3	2.22	2.22	2.22	2.22	56.26
40 : 0.4	1.93	1.96	1.96	1.95	61.65
40 : 0.5	2.20	2.20	2.22	2.21	56.55
50 : 0.1	4.04	4.04	4.04	4.04	20.38
50 : 0.2	4.67	4.67	4.67	4.67	8.14
50 : 0.3	3.60	3.60	3.62	3.61	28.99
50 : 0.4	3.82	3.82	3.84	3.83	24.61
50 : 0.5	4.49	4.51	4.53	4.51	11.20

ง.1.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิติก

การทดลองเพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของ HAA₅ โดยมีสารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้นเท่ากับ 5.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา และสารอินทรีย์ธรรมชาติความเข้มข้นเท่ากับ 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำดิบที่ผ่านกระบวนการสร้าง - รวมตะกอน และปริมาณความเข้มข้นของสารคลอรีน ดังแสดงในตารางที่ ง.3

ตารางที่ ง.3 ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ ความเข้มข้นของสารคลอรีน และระดับการเกิดกรดฮาโลอะซิติก

ปัจจัย	คลอรีนอิสระคงค้าง (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ (ไมโครกรัม/ล.)					
		MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅
น้ำดิบ + คลอรีน 0.50 มก./ล.	0.24	ND	ND	85.37	ND	4.01	73.03
น้ำดิบ + คลอรีน 1.50 มก./ล.	0.59	ND	6.97	56.55	1	3.60	74.71
น้ำดิบที่ผ่านกระบวนการ + คลอรีน 0.50 มก./ล.	0.3	ND	ND	24.35	ND	ND	24.35
น้ำดิบที่ผ่านกระบวนการ + คลอรีน 1.50 มก./ล.	0.71	ND	1	32.12	ND	2.68	35.24

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

ง.1.3 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การทดลองโดยสังเคราะห์ความเข้มข้นของ HAA₅ ที่ 60 ไมโครกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาของการทดลอง 48 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ ง.4

ตารางที่ ง.4 ผลของการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่สถานะสมดุล (ไมโครกรัม/ล.)						ปริมาณ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ก.)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	17.40	16.10	11.91	6.35	8.24	60	0
0.17	17.30	15.06	7.02	6.14	7.44	52.96	5.63
0.5	17.10	14.65	5.47	5.01	3.25	45.48	11.62
1	15.50	14.40	3.61	3.53	2.82	39.86	16.11
2	14.93	7.69	2.46	ND	ND	25.08	32.81
4	13.27	4.19	1.53	ND	ND	18.99	27.94
6	11.37	3.60	ND	ND	ND	14.97	36.02
8	1.03	2.49	ND	ND	ND	3.52	45.19
12	1	2.25	ND	ND	ND	3.25	45.40
16	ND	1.64	ND	ND	ND	1.64	46.68
18	ND	1	ND	ND	ND	1	47.81
24	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48
32	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48
40	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48
48	ND	ND	ND	ND	ND	ND	48

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

ง.1.3 ผลของการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การทดลองโดยสังเคราะห์ความเข้มข้นของ HAA₅ ที่แตกต่างกัน และใช้ระยะเวลาของการทดลอง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ ง.5

ตารางที่ ง.5 ผลของการศึกษาไอโซเทอรั่มการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

ความเข้มข้นของ HAA ₅ เริ่มต้น (ไมโครกรัม/ล.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ปริมาณ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
25	ND	ND	ND	ND	ND	1	21.60
50	13	1.10	ND	ND	1	14.61	31.85
75	17.34	10.76	ND	3.24	ND	31.34	39.29
100	17.59	11.03	ND	1.62	ND	30.24	62.79

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก จ.

ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test)

จ.1 ผลการทดลองแบบคอลัมน์ (Column test)

ผลการทดลองประกอบด้วย 3 ผลการทดลอง ดังนี้

จ.1.1 ผลการศึกษาอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก

กำจัด HAA₅ โดยใช้อัตราการไหลที่ 0.6 และ 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง ผ่านคอลัมน์ที่มีชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สูง 10 เซนติเมตร โดยน้ำ HAA₅ ตั้งคราะห์ ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ จ.1 และ จ.2

ตารางที่ จ.1 ผลของการศึกษาอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	3.67	6.69	3.45	3.16	12.72	29.68	0
0.5	ND	ND	1	ND	ND	1	96.63
1	ND	ND	ND	1	1.29	2.29	92.28
2	ND	ND	1.57	ND	1.13	2.70	90.90
4	1	ND	2.87	ND	1	4.87	83.59
6	1.07	ND	2.08	ND	1.47	4.62	84.43
8	1.40	ND	2.72	ND	1.01	5.13	82.72
10	1.79	ND	ND	ND	3.54	5.33	82.04
12	ND	ND	2.48	ND	3.03	5.51	81.44

ตารางที่ จ.2 ผลของการศึกษาอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	3.67	6.69	3.45	3.16	12.72	29.68	0
0.5	ND	ND	2.38	ND	3.74	6.12	79.38
1	ND	ND	2.01	ND	1.10	3.11	89.52
2	1	ND	3.22	ND	1.11	5.33	82.04
4	1	ND	2.32	ND	1.08	4.40	85.18

ตารางที่ จ.2 ผลของการศึกษาอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
6	1.22	ND	1.79	1	1.37	5.38	81.87
8	3.44	1	1.57	1.09	1.40	8.50	71.36
10	3.55	ND	1.12	1.18	1.76	7.61	74.36
12	3.58	ND	1.10	1	2.75	8.43	71.60

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

จ.1.2 ผลของการศึกษาชั้นความสูงที่มีตัวกลางดูดซับในคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดกรดฮาโลอะซิติก

กำจัด HAA₅ โดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สูง 10 15 และ 20 เซนติเมตร โดยน้ำ HAA₅ ตั้งเคราะห์ ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ จ.3 และ จ.4

ตารางที่ จ.3 ผลของการศึกษาชั้นความสูง 10 เซนติเมตร ของตัวกลางดูดซับในคอลัมน์

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	3.65	10.83	4.67	4.46	7.03	30.79	0
2	3.01	5.16	ND	ND	3.32	11.49	62.67
4	2.36	2.87	ND	ND	1.47	6.70	78.25
6	1	1.94	ND	ND	ND	2.94	90.44
8	ND	1.51	ND	ND	1.19	2.70	91.23
10	ND	1	ND	ND	1.02	2.02	93.44
12	ND	ND	ND	ND	1	1	96.75

ตารางที่ จ.4 ผลของการศึกษาชั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร ของตัวกลางดูดซับในคอลัมน์

เวลา (ชม.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
	MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	3.65	10.83	4.67	4.46	7.03	30.79	0
2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
10	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
12	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100

หมายเหตุ - ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

- ชั้นความสูง 15 และ 20 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดตามระยะเวลาเหมือนกัน

จ.1.3 ผลของการศึกษากราฟเบรคทูร์ของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การศึกษากราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) โดยอาศัยอัตราการไหล 1.0 ลิตรต่อชั่วโมง และชั้นความสูง 15 เซนติเมตร ของตัวกลางดูดซับ โดยน้ำ HAA₅ ตั้งเคราะห์ ที่มีความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ จ.5

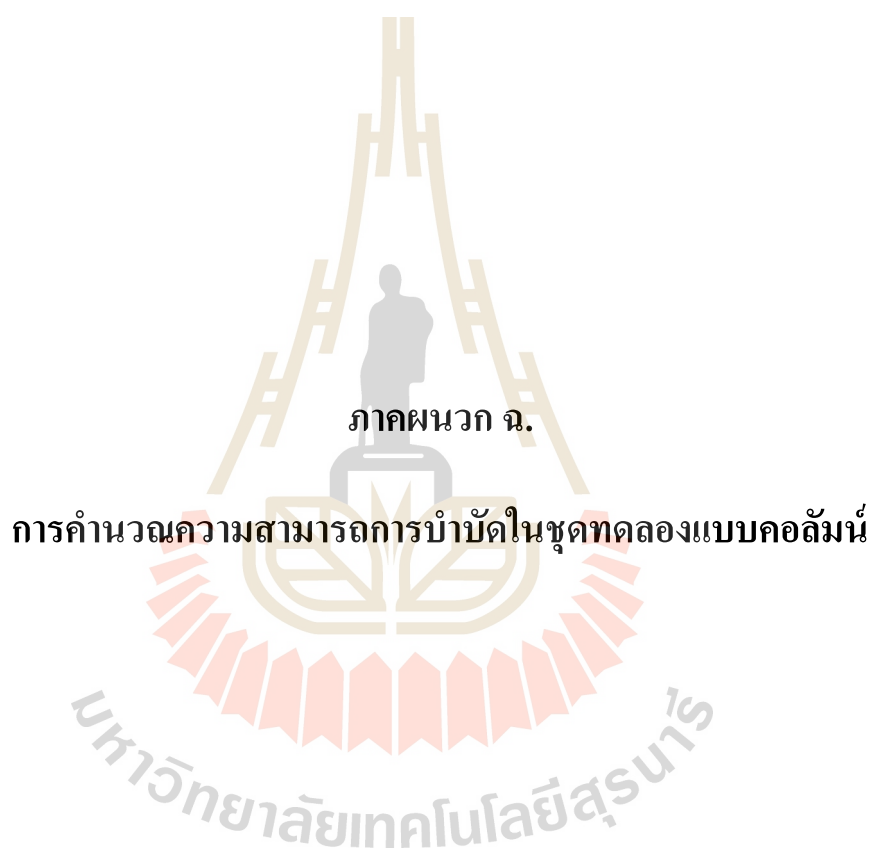
ตารางที่ จ.5 ผลของการศึกษากราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

เวลา (ชม.)	ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
		MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
0	0.6	3.65	10.83	4.67	4.46	7.03	30.79	0
1	1.2	2.81	3.28	ND	ND	ND	6.09	80.21
2	1.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
3	2.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
4	0.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100

ตารางที่ จ.5 ผลของการศึกษากราฟเบรคทูรู (Breakthrough curve) ของการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก (ต่อ)

เวลา (ชม.)	ปริมาณน้ำ (ล.)	ความเข้มข้นของ HAA ₅ ที่ถูกดูดซับ (ไมโครกรัม/ล.)						ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
		MCAA	DCAA	TCAA	MBAA	DBAA	HAA ₅	
5	3.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
6	3.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
7	4.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
8	4.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
9	5.4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
10	6.0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
11	6.6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
12	7.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	100
14	8.4	1	1.65	ND	ND	ND	2.65	92.20
16	9.6	ND	ND	ND	1.52	2.38	3.91	87.31
18	10.8	1.90	1	ND	4.60	6.96	14.46	54.10
20	12.0	3.10	5.61	ND	4.60	6.98	20.29	34.11
22	13.2	3.37	7.18	1	4.60	7.03	23.19	24.71
24	14.4	3.65	9.63	3.69	4.60	7.03	28.62	7.06

หมายเหตุ ค่า ND คือ Detection limit การวิเคราะห์สารกลุ่ม HAA₅ แต่ละชนิด คือ MCAA DCAA TCAA MBAA และ DBAA เท่ากับ 1 ไมโครกรัมต่อลิตร



ภาคผนวก จ.

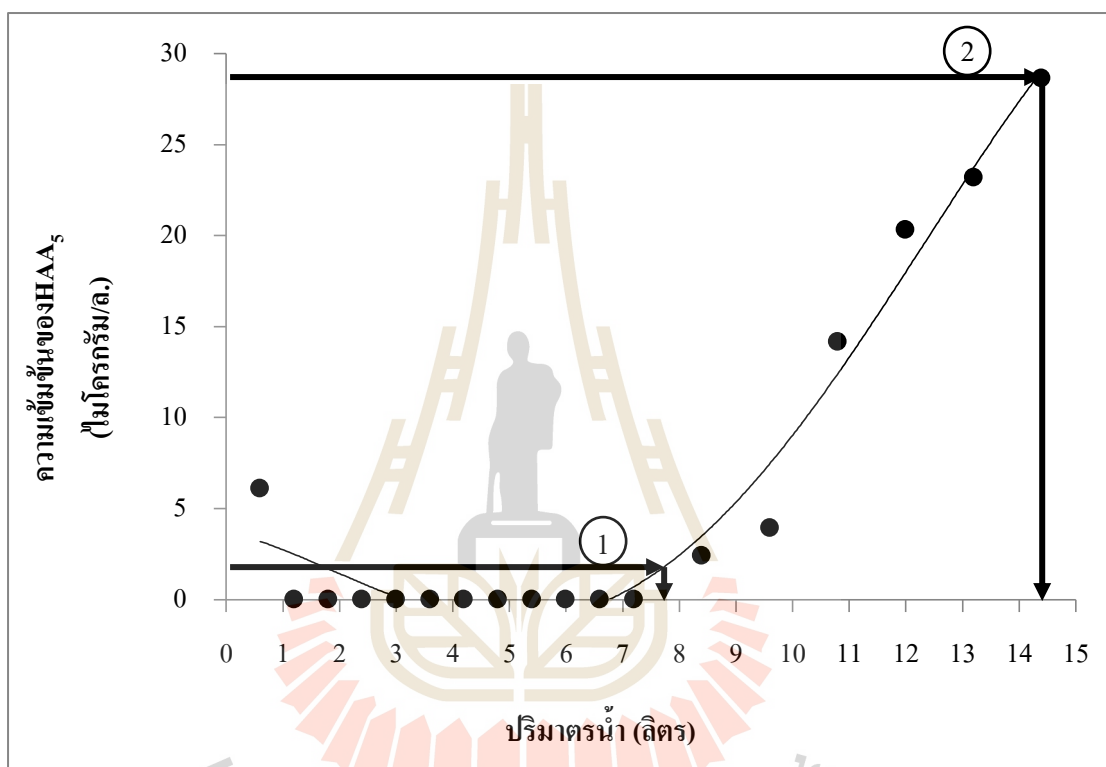
การคำนวณความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ฉ.1 การคำนวณความสามารถการบำบัดในชุดทดลองแบบคอลัมน์

ฉ.1.1 ความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

การหาค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ด้วยชุดทดลองแบบคอลัมน์ที่มีถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon เป็นตัวกลางดูดซับ แสดงดังในรูปที่ ฉ.1 และตารางที่ ฉ.1



รูปที่ ฉ.1 การคำนวณจากรูปเบรกทูลระหว่างปริมาณน้ำกับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก

การคำนวณประกอบไปด้วย

- จุดเริ่มหมดสภาพ (Break point) คือ ความเข้มข้นของน้ำออกเริ่มมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้จากรูปได้เท่ากับ 1.50 ไมโครกรัมต่อลิตร หรือประมาณ 7.8 ลิตร
- จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) จากรูปได้เท่ากับ 28.50 ไมโครกรัมต่อลิตร หรือประมาณ 14.3 ลิตร

ตารางที่ ๑.1 การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับกรดฮาโลอะซีติก

เวลา (ชม.)	V (ล.)	V _i (ล.)	C _{ei} (ไมโครกรัม/ล.)	C _e (ไมโครกรัม/ล.)	C _e -C _{ei} (ไมโครกรัม/ล.)	(C _e -C _{ei})V _i (ไมโครกรัม)
1	0.6	0.6	6.09	28.50	22.41	13.44
2	1.2	1.8	0	28.50	28.50	51.30
3	1.8	3.6	0	28.50	28.50	102.60
4	2.4	6	0	28.50	28.50	171
5	3	9	0	28.50	28.50	256.50
6	3.6	12.6	0	28.50	28.50	359.10
7	4.2	16.8	0	28.50	28.50	478.80
8	4.8	21.6	0	28.50	28.50	615.60
9	5.4	27	0	28.50	28.50	769.50
10	6	33	0	28.50	28.50	940.50
11	6.6	39.6	0	28.50	28.50	1128.60
12	7.2	46.8	0	28.50	28.50	1333.80

หมายเหตุ

V คือ ปริมาณน้ำ HAA₅ สังกะระห้

V_i คือ ปริมาณน้ำ HAA₅ สังกะระห้สะสม

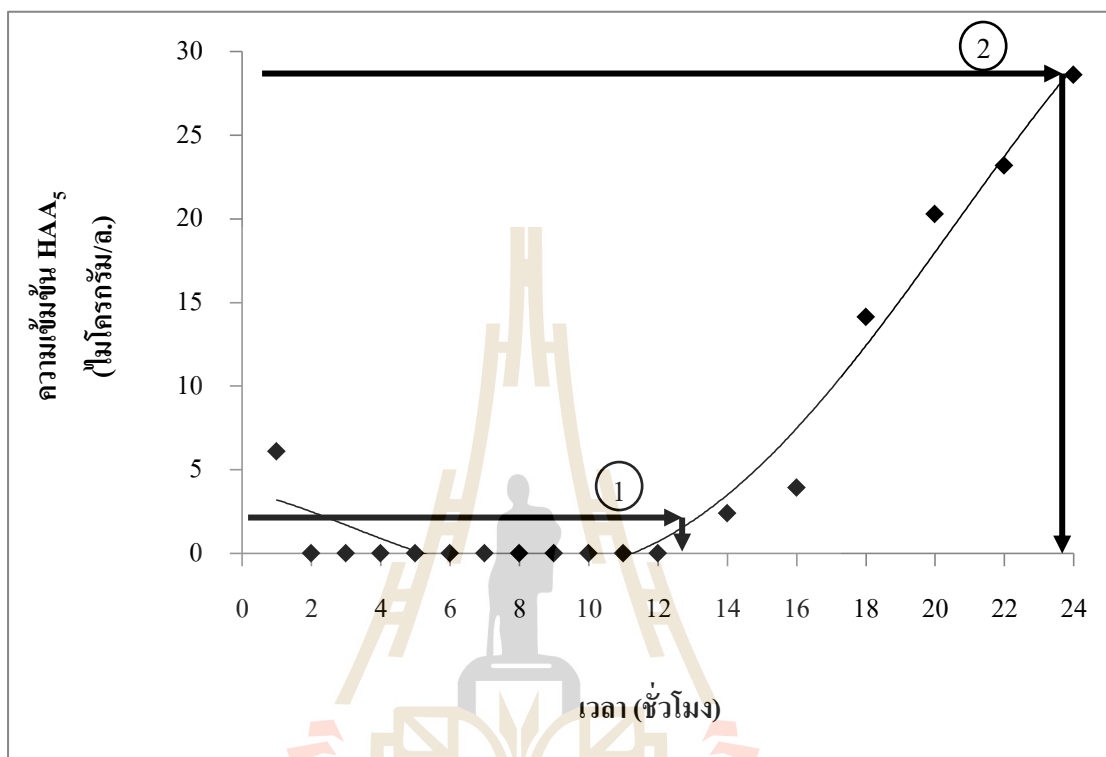
C_{ei} คือ ความเข้มข้น HAA₅ ณ ปริมาณน้ำที่ i

C_e คือ ความเข้มข้น HAA₅ ณ จุดหมดสภาพ

$$\begin{aligned}
 \text{ความสามารถในการดูดซับ} &= \frac{\sum_{i=1}^T (C_e - C_{ei})dV_i}{\text{Weight(media)}} \\
 &= \frac{6,220.74 \text{ (ไมโครกรัม/ลิตร)(ลิตร)}}{169.60 \text{ กรัม}} \\
 &= 36.68 \text{ ไมโครกรัมต่อกรัม}
 \end{aligned}$$

ฉ.1.2 ความยาวของชั้นการดูดซับ และระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบ

การหาความยาวของชั้นการดูดซับ (Mass transfer zone หรือ Sorption) จะใช้ข้อมูลดัง
แสดงในรูป ฉ.2



รูปที่ ฉ.2 การคำนวณจากรูปเบรกทูระหว่างระยะเวลากับความเข้มข้นของกรดฮาโลอะซีติก

การคำนวณประกอบไปด้วย

1. ระยะเวลาเบรกทู (Breakthrough time) คือ เวลาที่ใช้จากเริ่มจนถึงน้ำออกเริ่มมีค่า
เกินค่าที่ยอมรับได้จากรูปได้เท่ากับ 12.6 ชั่วโมง

2. จุดหมดสภาพ (Exhaustion point) จากรูปได้เท่ากับ 23.8 ชั่วโมง

$$\begin{aligned}
 \text{ความยาวของชั้นการดูดซับ} &= L_m = L \left[1 - \frac{t_b}{t_s} \right] \\
 &= 15 \text{ เซนติเมตร} \left[1 - \frac{12.6 \text{ ชั่วโมง}}{23.8 \text{ ชั่วโมง}} \right] \\
 &= 7.05 \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินระบบใช้วิธี Empty bed contact time (EBCT)

$$\begin{aligned} \text{EBCT} &= \frac{\text{Bed volume}}{\text{Flow rate}} \\ &= \frac{0.59 \text{ ชั่วโมง}}{0.6 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง}} \\ &= 0.98 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

อัตราการใช้สารดูดซับ Usage rate = $\frac{\text{Weigth of absorbent in column}}{\text{Volume at breakthrough}}$

$$\begin{aligned} &= \frac{169.60 \text{ กรัม}}{14.3 \text{ ลิตร}} \\ &= 11.86 \text{ กรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ช.

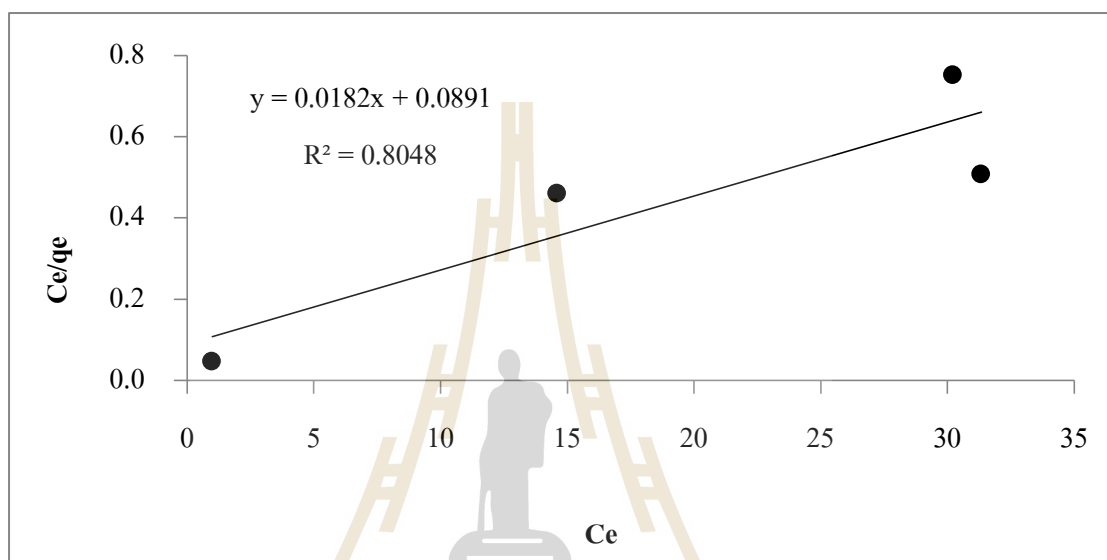
การคำนวณค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ช.1 การคำนวณค่าการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัย

ช.1.1 การคำนวณหาความสามารถการดูดซับกรดฮาโลอะซิติก

ค่าความสามารถในการดูดซับ HAA₅ ที่ความเข้มข้น 30 ไมโครกรัมต่อลิตร ของ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon สามารถคำนวณได้จากสมการ ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในรูปที่ ช.1



รูปที่ ช.1 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์

จากสมการ $y = 0.0182x + 0.0891$ เมื่อ $x = C_e$ และ $y = \frac{C_e}{q_e}$

$$y = 0.0182(30 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}) + 0.0891$$

$$y = 0.6351 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = 0.6351 \text{ ไมโครกรัมต่อลิตร}$$

$$q_e = \frac{C_e}{0.6351 \text{ ไมโครกรัม/ลิตร}}$$

$$q_e = \frac{30 \text{ ไมโครกรัม/ลิตร}}{0.6351 \text{ ไมโครกรัม/ลิตร}}$$

$$q_e = 47.24 \text{ ไมโครกรัมต่อกรัม}$$

ช.1.2 การคำนวณหาจำนวนถังกรองของระบบผลิตน้ำประปามหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สุรนารี

- กำหนดให้ 1 รอบ นาน 1 เดือน

- ความสามารถของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ในการดูดซับ HAA₅ 47.24 ไมโครกรัมต่อกรัม

- ปริมาณน้ำประปา 71,334,990 ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ

$$\begin{aligned} \text{- มวลของ HAA}_5 \text{ ต่อรอบ} &= (71,334,990 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ}) \times \\ & (30 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลิตร}) \times \left(\frac{1,000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}} \right) \\ &= 2.14 \text{ กิโลกรัมต่อรอบ} \end{aligned}$$

- ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ต่อรอบ = (2.14 กิโลกรัมของ HAA₅ ต่อรอบ) x

$$\left(\frac{1 \text{ กรัมของถ่านกัมมันต์}}{4.724 \times 10^{-8} \text{ กิโลกรัมของ HAA}_5} \right)$$

$$= 45,301.64 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$

เพื่อปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.5 เท่า = 45,301.64 กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ x 1.5

$$= 67,952.47 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$

- ปริมาตรของถ่านกัมมันต์เมื่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 0.53 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$= \frac{67,952.47 \times 10^3 \text{ กรัม}}{0.53 \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}}$$

$$= 128,212,207.50 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$= 128.21 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

- ขนาดของถังกรองใช้ เหน้การออกแบบเครื่องกรองช้าและถังทรายกรอง

(เครื่องสกัด อูคมสิน โรจน์, 2541) ชั้นถ่านกัมมันต์ 1.5 เมตร และความกว้าง 3.2 เมตร

$$= 3.14 \times (1.6 \text{ เมตร})^2 \times 1.5 \text{ เมตร}$$

$$= 12.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

ดังนั้นจำนวนถังกรอง

$$= \frac{128.21 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{12.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}$$

$$= 10.63 \text{ หรือ } 11 \text{ ถัง}$$

ช.1.3 การคำนวณหาจำนวนถังกรองของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านโลกกรวด

- กำหนดให้ 1 รอบ นาน 1 เดือน
- ความสามารถของถ่านกัมมันต์แบบเคล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ในการดูดซับ HAA₅ 47.24 ไมโครกรัมต่อกรัม
- ปริมาณน้ำประปา 54,000,000 ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ
- มวลของ HAA₅ ต่อรอบ

$$= (54,000,000 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ}) \times (30 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลิตร}) \times \left(\frac{1,000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}} \right)$$

$$= 1.62 \text{ กิโลกรัมต่อรอบ}$$
- ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ต่อรอบ

$$= (1.62 \text{ กิโลกรัมของ HAA}_5 \text{ ต่อรอบ}) \times \left(\frac{1 \text{ กรัมของถ่านกัมมันต์}}{4.724 \times 10^{-8} \text{ กิโลกรัมของ HAA}_5} \right)$$

$$= 34,292.97 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$

เพื่อปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.5 เท่า

$$= 34,292.97 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ} \times 1.5$$

$$= 51,439.46 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$
- ปริมาตรของถ่านกัมมันต์เมื่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 0.53 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$= \frac{51,439.46 \times 10^3 \text{ กรัม}}{0.53 \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}}$$

$$= 97,055,584.91 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$= 97.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$
- ขนาดของถังกรองใช้ เภณฑ์การออกแบบเครื่องกรองช้าและถังทรายกรอง (เครื่องศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) ชั้นถ่านกัมมันต์ 1.5 เมตร และความกว้าง 3.2 เมตร

$$= 3.14 \times (1.6 \text{ เมตร})^2 \times 1.5 \text{ เมตร}$$

$$= 12.05 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$
- ดังนั้นจำนวนถังกรอง

$$= \frac{97.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{12.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}$$

$$= 8.05 \text{ หรือ } 8 \text{ ถัง}$$

ช.1.4 การคำนวณหาจำนวนถังกรองของระบบผลิตน้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา

- กำหนดให้ 1 รอบ นาน 1 เดือน

- ความสามารถของถ่านกัมมันต์แบบเคล็ดชนิด Coconut shell activated carbon ในการดูดซับ HAA₅ 47.24 ไมโครกรัมต่อกรัม

- ปริมาณน้ำประปา 18,000,000 ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ

$$\begin{aligned} \text{- มวลของ HAA}_5 \text{ ต่อรอบ} &= (18,000,000 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อรอบ}) \times \\ & (30 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลิตร}) \times \left(\frac{1,000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}} \right) \\ &= 0.54 \text{ กิโลกรัมต่อรอบ} \end{aligned}$$

- ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ต้องใช้ต่อรอบ = (0.54 กิโลกรัมของ HAA₅ ต่อรอบ) x

$$\left(\frac{1 \text{ กรัมของถ่านกัมมันต์}}{4.724 \times 10^{-8} \text{ กิโลกรัมของ HAA}_5} \right)$$

$$= 11,430.99 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$

เพื่อปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.5 เท่า = 11,430.99 กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ x 1.5

$$= 17,146.49 \text{ กิโลกรัมของถ่านกัมมันต์ต่อรอบ}$$

- ปริมาตรของถ่านกัมมันต์เมื่อความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ 0.53 กรัมต่อมิลลิลิตร

$$= \frac{17,146.99 \times 10^3 \text{ กรัม}}{0.53 \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}}$$

$$= 32,352,811.32 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$= 32.35 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

- ขนาดของถังกรองใช้ เภนซ์การออกแบบเครื่องกรองช้าและถังทรายกรอง

(เครื่องศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2541) ชั้นถ่านกัมมันต์ 1.5 เมตร และความกว้าง 3.2 เมตร

$$= 3.14 \times (1.6 \text{ เมตร})^2 \times 1.5 \text{ เมตร}$$

$$= 12.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

ดังนั้นจำนวนถังกรอง

$$= \frac{32.35 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}{12.06 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}$$

$$= 2.68 \text{ หรือ 3 ถัง}$$



ภาควิชา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ซ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

จากสมมติฐานของการวิจัยที่ทดสอบจากหัวข้อ 3.5.1 โดยใช้สถิติ ANOVA Test วิเคราะห์ความแตกต่าง และใช้สถิติ Tukey วิเคราะห์คู่ความแตกต่างของปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน แสดงดังตารางที่ ซ.1 และตารางที่ ซ.2

ตารางที่ ซ.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ANOVA Test ทดสอบประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

ความเข้มข้น PACI (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cationic polymer (มก./ล.)	ความขุ่น			DOC			สรุป
		ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	
10	0.1	87.91	0.000	พบความแตกต่าง	34.82	0.000	พบความแตกต่าง	10 : 0.5
	0.2	86.02			38.61			
	0.3	85.07			23.74			
	0.4	88.39			47.21			
	0.5	88.62			43.28			

ตารางที่ ๗.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ANOVA Test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (ต่อ)

ความเข้มข้น PACI (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cationic polymer (มก./ล.)	ความขุ่น			DOC			สรุป
		ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	
20	0.1	97.24	0.000	พบความแตกต่าง	56.98	0.000	พบความแตกต่าง	20 : 0.3
	0.2	97.40			46.05			
	0.3	98.06			59.17			
	0.4	97.17			58.88			
	0.5	97.30			59.17			
30	0.1	95.78	0.000	พบความแตกต่าง	61.94	0.000	พบความแตกต่าง	30 : 0.5
	0.2	97.24			44.01			
	0.3	96.25			63.69			
	0.4	90.85			63.40			
	0.5	96.84			64.42			

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ANOVA Test ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (ต่อ)

ความเข้มข้น PACI (มก./ล.)	ความเข้มข้น Cationic polymer (มก./ล.)	ความขุ่น			DOC			สรุป
		ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)	Significance	ผลการทดสอบ	
40	0.1	78.21	0.000	พบความแตกต่าง	43.42	0.000	พบความแตกต่าง	40 : 0.4
	0.2	80.88			49.99			
	0.3	91.55			56.26			
	0.4	92.72			61.65			
	0.5	88.85			56.55			
50	0.1	21.22	0.000	พบความแตกต่าง	20.38	0.000	พบความแตกต่าง	50 : 0.3
	0.2	0			8.14			
	0.3	19.60			28.99			
	0.4	0			24.61			
	0.5	1.87			11.20			

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ Tukey ทดสอบประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

PACI : Cationic polymer (มก./ล. : มก./ล.)	PACI : Cationic polymer (มก./ล. : มก./ล.)	ความขุ่น		DOC	
		Significance	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ
10 : 0.5	20 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	30 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	40 : 0.4	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	50 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
20 : 0.3	10 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	30 : 0.5	0.064	ไม่พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	40 : 0.4	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	50 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
30 : 0.5	10 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	20 : 0.3	0.064	ไม่พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	40 : 0.4	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	50 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ Tukey ทดสอบประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำหลังผ่านกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (ต่อ)

PACI : Cationic polymer (มก./ล. : มก./ล.)	PACI : Cationic polymer (มก./ล. : มก./ล.)	ความขุ่น		DOC	
		Significance	ผลการทดสอบ	Significance	ผลการทดสอบ
40 : 0.4	10 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	20 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	30 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	50 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
50 : 0.3	10 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	20 : 0.3	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	30 : 0.5	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง
	40 : 0.4	0.000	พบความแตกต่าง	0.000	พบความแตกต่าง



ภาคผนวก ฉ.

สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละชั้นตอนที่ศึกษา

ณ.1 สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนที่ศึกษา

การดำเนินงานวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา 2) การทดลองแบบทีละเท (Batch test) และ 3) การทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test) ดังแสดงในตารางที่ ณ.1

ตารางที่ ณ.1 สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนที่ศึกษา

การดำเนินงานวิจัย	ดัชนีคุณภาพน้ำ	จำนวนตัวอย่าง	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง
การศึกษาคุณลักษณะน้ำของระบบผลิตน้ำประปา			
1. น้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปา - อ่างเก็บน้ำสุระ - อ่างเก็บน้ำหมู่บ้านโคกกรวด - อ่างเก็บน้ำบ้านหนองรังกา	ความขุ่น	3	3 ครั้ง/ สถานที่
	DOC	3	
	พีเอช	3	
	HAA ₅	3	
2. น้ำประปา - น้ำประปาภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี - น้ำประปาหมู่บ้านโคกกรวด - น้ำประปาหมู่บ้านหนองรังกา	คลอรีนอิสระคงค้าง	57	3 ครั้ง/ สถานที่
	HAA ₅	57	
การทดลองแบบทีละเท (Batch)			
1. การศึกษาผลของกระบวนการสร้างและรวมตะกอนในการกำจัดความขุ่น และสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำ (ก่อนเริ่มกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน)	ความขุ่น	1	1 ครั้ง
	DOC	1	
	พีเอช	1	
	HAA ₅	1	
(หลังกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอน)	ความขุ่น	25	1 ครั้ง/ตัวอย่าง
	DOC	25	
	พีเอช	25	
	HAA ₅	25	

ตารางที่ ๗.1 สรุปจำนวนตัวอย่างในแต่ละขั้นตอนที่ศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงานวิจัย	ดัชนีคุณภาพน้ำ	จำนวน ตัวอย่าง	ความถี่ในการเก็บ ตัวอย่าง
การทดลองแบบทีละเท (Batch) (ต่อ)			
2. การศึกษาผลการศึกษาความ เข้มข้นของสารอินทรีย์ธรรมชาติ ในน้ำ ความเข้มข้นของสาร คลอรีนและระดับการเกิด กรดฮาโลอะซีติก	คลอรีนอิสระคงค้าง	4	1 ครั้งเวลา 30 นาที
	HAA ₅	4	
3. การศึกษาจลนพลศาสตร์การ ดูดซับกรดฮาโลอะซีติก	HAA ₅	28	เวลา 0 10 30 60 120 และ 240 นาที จากนั้นเก็บ ตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง จนครบ 48 ชั่วโมง
4. การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ กรดฮาโลอะซีติก	HAA ₅	6	1 ครั้งเวลาที่ 24 ชั่วโมง
การทดลองแบบคอลัมน์ที่มีตัวกลางดูดซับ (Column test)			
1. การศึกษาผลของอัตราการไหล ผ่านคอลัมน์ต่อประสิทธิภาพการ กำจัดกรดฮาโลอะซีติก	HAA ₅	18	ทุกๆ 2 ชั่วโมงจน ครบ 12 ชั่วโมง
2. การศึกษาผลขึ้นความสูงของ ตัวกลางดูดซับต่อประสิทธิภาพ การกำจัดกรดฮาโลอะซีติก	HAA ₅	21	ทุกๆ 2 ชั่วโมง จน ครบ 12 ชั่วโมง
3. การศึกษากราฟเบรกทูร (Breakthrough curve) การดูดซับ กรดฮาโลอะซีติก	HAA ₅	19	ทุกๆ 2 ชั่วโมง

หมายเหตุ - จำนวนของดัชนีคุณภาพน้ำได้แก่ ความขุ่น DOC พีเอช และคลอรีนอิสระคงค้าง ไม่รวม
จำนวนการวิเคราะห์ซ้ำ



ญ.1 งบประมาณการดำเนินการวิจัย

การวิจัยได้ใช้งบประมาณในการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ ญ.1

ตารางที่ ญ.1 งบประมาณของการวิจัย

รายการ	งบประมาณ (บาท)
1. ค่าวัสดุอุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย	
- กระดาษกรองขนาดรูเปิด 0.45 ไมโครเมตรสำหรับวิเคราะห์ DOC จำนวน 105 ตัวอย่าง	4,284
- กระดาษกรอง GF/C สำหรับวิเคราะห์ HAA ₅ จำนวน 34 ตัวอย่าง	1,100
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ HAA ₅ จำนวน 181 ตัวอย่าง	14,690
- สารเคมีสำหรับวิเคราะห์คลอรีนอิสระคงค้าง จำนวน 183 ตัวอย่าง	3,150
- Standard mixtures of HAAs สำหรับสังเคราะห์น้ำตัวอย่าง จำนวน 2 มล.	9,200
- สารฆ่าเชื้อโรค (แคลเซียมไฮโปคลอไรด์) สำหรับการทดลองแบบทีละเท	1,370
รวม	33,794
2. ค่าวัสดุอุปกรณ์การทดลอง (คอลัมน์)	
- กระบอกลงขนาด 500 ml พลาสติก จำนวน 4 ชิ้น	880
- ค่าประกอบคอลัมน์ สายยางน้ำเข้า-ออก จำนวน 4 ชิ้น	1,200
รวม	2,080
3. ค่าใช้จ่ายการวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ	
- HAA ₅ จำนวน 190 ตัวอย่าง	18,100
รวม	18,100
รวมค่าใช้จ่าย	53,974

ประวัติผู้เขียน

นายพงศ์ธร แสงชูติ เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2535 เป็นบุตรคุณพ่อขจรศักดิ์ แสงชูติ และคุณแม่พัชรี แสงชูติ เริ่มศึกษาชั้นประถมที่โรงเรียนพิมานวิทย์ จังหวัดนราธิวาส ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนนราสิกขาลัย จังหวัดนราธิวาส และระดับอุดมศึกษา (ปริญญาตรี) ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (อนามัยสิ่งแวดล้อม) จาก สาขาวิชอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2557 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาเรื่อง การกำจัดกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ในน้ำประปาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยได้รับทุนวิจัยจากกองทุนสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้นำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 2018 2nd International Conference on Energy and Environmental Science เรื่อง Investigation of Haloacetic acids (HAAs) levels in water supply and its correlated HAAs formation ในระหว่างวันที่ 16 - 18 มกราคม พ.ศ. 2561 ที่มหาวิทยาลัยมาลาया ประเทศมาเลเซีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี