

การกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนโตรล์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Removal haloacetonitriles by activated carbon supported nanoscale zero-valent iron



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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

ต่อศักดิ์ นวนิล : การกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนโตรล์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (Removal haloacetonitriles by activated carbon supported nanoscale zero-valent iron) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 149 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) และชนิดเกล็ด (GAC) โดยการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (NZVI) บนพื้นผิว และศึกษาผลกระทบของการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโนต่อประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนโตรล์ 5 ชนิด (HANs) ได้แก่ โมโนคลอโรอะซิโตไนโตรล์ (MCAN), โมโนโบรโมอะซิโตไนโตรล์ (MBAN), ไดคลอโรอะซิโตไนโตรล์ (DCAN), ไตรโบรโมอะซิโตไนโตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซิโตไนโตรล์ (TCAN) ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-500 ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7 และค่าความแรงประจุ 0.01 โมลาร์ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับพบว่า การต่อติด NZVI บนพื้นผิวของ GAC และ PAC ส่งผลทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการอุดตัน พื้นที่ผิวภายในตัวกลางดูดซับและปริมาตรรูพรุนของตัวกลางดูดซับลดลงอย่างมากและทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนโตรล์ลดลง การศึกษาจลนพลศาสตร์พบว่า การดูดซับฮาโลอะซิโตไนโตรล์เข้าสู่สถานะสมดุลที่ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง และสอดคล้องกับสมการอันดับสองเหมือน การต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโนไม่สามารถทำให้อัตราการดูดซับของ PAC และ GAC เร็วขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับฮาโลอะซิโตไนโตรล์แบบเดี่ยวทั้ง 5 ชนิดพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสอดคล้องกับความสามารถในการละลายน้ำของ HANs โดย สาร MCAN และ MBAN มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำสุด และการต่อติด NZVI บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนโตรล์ได้

ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ HANs ระหว่างแบบผสมและแบบเดี่ยวพบว่าลำดับและปริมาณการดูดซับของ HANs แบบผสมบนพื้นผิวของ PAC, GAC และ PAC/NZVI ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบเดี่ยว และการมีอยู่ของไอออนในน้ำประปาไม่กระทบต่อสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของ PAC PAC/NZVI และ NZVI อย่างชัดเจน

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770417621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: ADSORPTION / DEGRADATION / TAP WATER / HALOACETONITRILES / ACTIVATED CARBON / NANOSCALE ZEROVALENT IRON (NZVI)

TORSAK NAWANIN: Removal haloacetonitriles by activated carbon supported nanoscale zero-valent iron. ADVISOR: ASSOC. PROF. PATIPARN PUNYAPALAKUL, Ph.D. , 149 pp.

Powdered activated carbon (PAC) and granular activated carbon (GAC) were modified surfaces by impregnation with nano zero valent iron (NZVI) in order to study their effects on haloacetonitriles adsorption capacity and mechanisms. Five haloacetonitriles (HANs) ; monochloroacetonitriles (MCAN), monobromoacetonitriles (MBAN), dichloroacetonitriles (DCAN), dibromoacetonitriles (DBAN) and trichloroacetonitriles (TCAN) at low concentrations. (0-500 µg/L), pH 7 and ionic strength 0.01 Molar. Physico-chemical characteristics of modified adsorbents were investigated. Impregnation of NZVI on GAC and PAC surfaces can cause micropore blocking and reduce active surface area of PAC and GAC, and strongly affect to HANs adsorption capacities. From adsorption kinetic study, adsorption of five HANs can reach equilibrium within 2-3 hrs and well fitted with pseudo second order equation. Modification of PAC and GAC by NZVI could not increase HANs adsorption rate on applied adsorbents. Isotherm study showed that adsorption mechanisms of five HANs strongly related to water solubility of each species, and MCAN and MBAN had lowest adsorption capacities. Modification by using NZVI could not increase adsorption capacity of HANs on PAC and GAC. Comparison of HANs adsorption capacities between single and multi-solute study showed that adsorption selectivity and capacities in multi-solute of PAC, GAC and PAC/NZVI were a little bit decreased comparing with single-solute. Furthermore, the presence of electrolytes in tap water did not affect to selective adsorption capacities of HANs on PAC PAC/NZVI and NZVI.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature

Academic Year : 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและถ่ายทอดวิชาความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างมีแบบแผน ตลอดจนสนับสนุนการทำนิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ .ดร. วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัศมี และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ .ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์ , รองศาสตราจารย์.ดร. ชนาธิป ผาริโน และ อาจารย์ ดร. อาทิตย์ เพ็ชรรัชช ที่ได้ให้เกียรติและสละเวลาเพื่อสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และชี้แนะข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) อาคารวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบพระคุณพี่ รามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและให้ความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ด้วยดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ช่วยสนับสนุน ส่งเสริมและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดแก่ผู้วิจัย จนทำให้การศึกษาครั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 สมมุติฐาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles).....	5
2.1.1 การเกิดฮาโลแอซีโตไนไตรล์.....	5
2.1.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของฮาโลแอซีโตไนไตรล์.....	9
2.1.3 ความเป็นพิษของฮาโลแอซีโตไนไตรล์	11
2.1.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาโลแอซีโตไนไตรล์.....	12
2.1.5 การตรวจพบสารฮาโลอะซีโนไนไตรล์ (HANs).....	13
2.1.6 กระบวนการกำจัดฮาโลแอซีโตไนไตรล์	14
2.1.7 ปัจจัยที่ทำให้เกิดสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์.....	14
2.1.8 กระบวนการที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ในกระบวนการผลิต น้ำประปา.....	14

2.1.9 แนวทางการป้องกันและลดปริมาณสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ในน้ำประปาในการลดปริมาณสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ในน้ำ มีวิธีการต่างๆ ดังนี้	15
2.2 อนุภาคโลหะเหล็กนาโน (Nano zero-valent iron : nZVI)	16
2.3 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon).....	19
2.3.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	19
2.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์	20
2.3.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์	20
2.3.4 กระบวนการทำงานของถ่านกัมมันต์.....	20
2.3.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	21
2.4 ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคโลหะเหล็กนาโน (AC/NZVI).....	21
2.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของอนุภาคเหล็กนาโนต่อติดกับถ่านกัมมันต์.....	23
2.5.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-ray Powder Diffraction (XRD).....	23
2.5.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน.....	24
2.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	27
2.5.4 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว.....	27
2.6 ทฤษฎีการดูดซับ.....	28
2.6.1 หลักการของการดูดซับ	28
2.6.2 กลไกของการดูดซับ	30
2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	32
1) ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ	32
2) ลักษณะของสารถูกดูดซับ	32
3) ความปั่นป่วน (turbulent).....	33
4) เวลาสัมผัส (Contact time).....	33

5) ค่าพีเอช (pH).....	33
2.6.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic).....	33
2.6.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	35
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.7.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กขนาดนาโน	37
2.7.2 การใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กโนนาดูดซับมลสารต่างๆ	38
2.7.3 การเกิดฮาโลอะซีโตไนไตรล์ในระบบการผลิตน้ำดื่ม	39
2.7.4 การกำจัดฮาโลอะซีโตไนไตรล์	39
2.7.5 การดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs).....	41
2.7.6 การฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในกรณีสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs)	42
2.7.7 การเกิดปฏิกิริยาและอายุการใช้งานของอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (NZVI).....	42
2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	44
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	45
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	45
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	47
3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กนาโน (NZVI).....	47
3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (activated carbon/NZVI).....	48
3.2.3 การสกัดแบบ liquid-liquid extraction (LLE).....	49
3.2.4 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ	50
เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ.....	50

3.2.5 การศึกษาการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs).....	51
2) การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ.....	53
3.2.7 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์.....	55
3.2.8 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำกลั่น ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.....	57
3.2.9 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำประปาโดย ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.....	59
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	61
4.1 การศึกษาสมบัติกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ.....	61
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวกลางดูดซับด้วย X-Ray Powder Diffraction.....	61
4.1.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	64
4.1.3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุน.....	68
4.1.4 ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยา (Particle size and morphology).....	73
4.1.5 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว (Surface charge).....	76
4.1.6 ปริมาณเหล็กบนตัวกลางดูดซับและการชะละลายของเหล็กในน้ำ.....	79
4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์.....	81
4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์.....	81
4.2.2 การศึกษากลไกการดูดซับไดคลอโรอะซีโตไนไตรล์.....	89
4.3 การศึกษาไอโซเทอรั่มของการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์.....	92
4.4 ผลของโครงสร้างฮาโลอะซีโตไนไตรล์ต่อความสามารถในการดูดซับ.....	98
4.4.1 ผลพีเอช.....	102
4.5 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์.....	105
4.5.1 กรณีการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำกลั่นโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.....	105
4.5.2 กรณีใช้น้ำประปา.....	107

บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	111
5.1	สรุปผลการวิจัย	111
5.2	ข้อเสนอแนะ	113
	รายการอ้างอิง	114
	ภาคผนวก.....	120
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	149



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 เกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำประปาและน้ำบริโภคที่สำคัญ	9
ตารางที่ 2-2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่มฮาโลเอซีไคโนไตรล์ชนิดต่างๆ	10
ตารางที่ 2-3 ผลกระทบต่อสุขภาพ	11
ตารางที่ 2-4 ค่า LD ₅₀ ของสารฮาโลเอซีไคโนไตรล์ที่ทดลองในหนูทดลองโดยการกิน.....	11
ตารางที่ 2-5 ปริมาณความเข้มข้นของฮาโลเอซีไคโนไตรล์ที่กำหนดไว้สำหรับน้ำดื่ม	12
ตารางที่ 2-6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้บริเวณเขตสามเสน.....	13
ตารางที่ 2-7 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nZVI).....	18
ตารางที่ 3-1 เครื่องมือและสถานที่ตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ.....	50
ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของฮาโลเอซีไคโนไตรล์บนพื้นผิวของสาร ตัวกลางดูดซับ	52
ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับฮาโลเอซีไคโนไตรล์ในน้ำกลั่น	54
ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลเอซีไคโนไตรล์ ...	56
ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับเมื่อใน น้ำกลั่นและควบคุมพีเอชเท่ากับ 7.....	58
ตารางที่ 4-1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	68
ตารางที่ 4-2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวกลางดูดซับ.....	73
ตารางที่ 4-3 ค่า pH pzc ของตัวดูดซับแต่ละชนิด	79
ตารางที่ 4-4 ปริมาณเหล็กบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆที่วัดได้จากการวิเคราะห์ผ่านเครื่อง SEM-EDS.....	80
ตารางที่ 4-5 ปริมาณเหล็กทั้งหมดใน DCAN ในน้ำกลั่น ของ PAC/NZVI , GAC- NZVI และ NZVI ด้วยเครื่อง AAS ณ เวลาต่างๆ	80
ตารางที่ 4-6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ.....	81

ตารางที่ 4-7	ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ...	88
ตารางที่ 4-8	ค่าคงที่กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค.....	92
ตารางที่ 4-9	ค่าการกระจายตัวของประจุ (Dipole Charges) ในโมเลกุลของฮาโลอะซิโตไนไตรล์.....	94
ตารางที่ 4-10	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฮาโลอะซิโตไนไตรล์โดยตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิด	101
ตารางที่ 4-11	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไดโครโรอะซิโตไนไตรล์ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 5,7 และ 9.....	104
ตารางที่ 4-12	สมบัติของน้ำประปาและความเข้มข้นของอิเลกโตรไลต์ในน้ำประปา.....	108
ตารางที่ 4-13	ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ โดยเปรียบเทียบในกรณีแบบเดี่ยว แบบผสมในน้ำกลั่นและแบบผสมในน้ำประปา.....	110

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในน้ำดื่มจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน	6
ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา	8
ภาพที่ 2.3 แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ SEM (a) GAC ; (b) Fe ⁰ ; .	22
ภาพที่ 2.4 แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ SEM (a) NZVI particle ; (b) NZVI/AC ; TEM (c) NZVI particle ; (d) NZVI/AC.....	22
ภาพที่ 2.5 ภาพจำลองของอนุภาคเหล็กศูนย์ขนาดนาโนต่อติดกับถ่านกัมมันต์	22
ภาพที่ 2.6 ภาพจำลองแสดงการบทบาทในการกำจัดสารกลุ่มผลพลอยได้น้ำในประปาของอนุภาคเหล็กศูนย์ขนาดนาโนต่อติดกับถ่านกัมมันต์	23
ภาพที่ 3.1 แผนการทดลองในการศึกษาวิจัย	44
ภาพที่ 3.2 แสดงการการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กนาโน (NZVI).....	47
ภาพที่ 3.3 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ต่อติดอนุภาคเหล็กนาโน	48
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการสกัดและเตรียมตัวอย่างสารกลุ่มฮาโลเอซีไนด์ในไตรล์.....	49
ภาพที่ 3.5 แสดงการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวกลางดูดซับ.....	51
ภาพที่ 3.6 แสดงการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางดูดซับ.....	53
ภาพที่ 3.7 แสดงการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลเอซีไนด์ในไตรล์.....	55
ภาพที่ 3.8 แสดงการศึกษาผลการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำกลั่น	57
ภาพที่ 4.1 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC).....	62
ภาพที่ 4.2 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC).....	62
ภาพที่ 4.3 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ PAC/NZVI.....	63
ภาพที่ 4.4 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ GAC/NZVI	63
ภาพที่ 4.5 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ NZVI.....	64

ภาพที่ 4.6 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ AC , AC/NZVI และ NZVI.....	64
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัม FT-IR ของ PAC/NZVI.....	65
ภาพที่ 4.8 สเปกตรัม FT-IR ของ GAC/NZVI	66
ภาพที่ 4.9 สเปกตรัม FT-IR ของ GAC.....	66
ภาพที่ 4.10 สเปกตรัม FT-IR ของ PAC.....	67
ภาพที่ 4.11 สเปกตรัม FT-IR ของ NVZI.....	67
ภาพที่ 4.12 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ PAC	69
ภาพที่ 4.13 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ PAC/NZVI	69
ภาพที่ 4.14 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ GAC/NZVI	70
ภาพที่ 4.15 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ NZVI	70
ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของรูพรุนของ PAC	71
ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของรูพรุนของ PAC/NZVI	71
ภาพที่ 4.18 การกระจายตัวของรูพรุนของ GAC/NZVI	72
ภาพที่ 4.19 การกระจายตัวของรูพรุนของ NZVI.....	72
ภาพที่ 4.20 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ NZVI	74
ภาพที่ 4.21 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ PAC	74
ภาพที่ 4.22 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ PAC/NZVI.....	75
ภาพที่ 4.23 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ GAC.....	75
ภาพที่ 4.24 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ GAC/NZVI	76
ภาพที่ 4.25 ประจุบนพื้นผิวของ PAC.....	77
ภาพที่ 4.26 ประจุบนพื้นผิวของ GAC	77
ภาพที่ 4.27 ประจุบนพื้นผิวของ GAC/NZVI.....	78
ภาพที่ 4.28 ประจุบนพื้นผิวของ PAC/NZVI.....	78

ภาพที่ 4.29	ประจุบนพื้นผิวของ NZVI.....	79
ภาพที่ 4.30	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (DCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) GAC , PAC/NZVI, GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C.....	82
ภาพที่ 4.31	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (DCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.02 กรัม) PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C.....	82
ภาพที่ 4.32	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (TCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C	83
ภาพที่ 4.33	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (MCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C	83
ภาพที่ 4.34	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (MBAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C	84
ภาพที่ 4.35	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีไนด์ (DBAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC ,PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C	84
ภาพที่ 4.36	การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ PAC.....	86
ภาพที่ 4.37	การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ GAC.....	86
ภาพที่ 4.38	การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ PAC/NZVI.....	87
ภาพที่ 4.39	การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ GAC/NZVI	87
ภาพที่ 4.40	การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ NZVI	88
ภาพที่ 4.41	กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ PAC.....	90

ภาพที่ 4.42 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC	90
ภาพที่ 4.43 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ PAC/NZVI.....	91
ภาพที่ 4.44 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC/NZVI	91
ภาพที่ 4.45 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC/NZVI.....	92
ภาพที่ 4.46 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับ 4 ชนิด (ไม่รวม PAC) โดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	94
ภาพที่ 4.47 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของ PAC โดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	95
ภาพที่ 4.48 ไอโซเทอมการดูดซับ TCAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง....	95
ภาพที่ 4.49 ไอโซเทอมการดูดซับ MCAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง....	96
ภาพที่ 4.50 ไอโซเทอมการดูดซับ MBAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง....	96
ภาพที่ 4.51 ไอโซเทอมการดูดซับ DBAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง....	97
ภาพที่ 4.52 ไอโซเทอมการดูดซับ ไตรโคลอโรมีเทน (TCM) ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	97
ภาพที่ 4.53 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซีไตนไตร์ลต่อความสามารถในการดูดซับ ของPAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	99
ภาพที่ 4.54 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซีไตนไตร์ลต่อความสามารถในการดูดซับ ของ GAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ±2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง	99

ภาพที่ 4.55 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตร์ลต่อความสามารถในการดูดซับของ PAC/NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	100
ภาพที่ 4.56 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตร์ลต่อความสามารถในการดูดซับของ GAC/NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	100
ภาพที่ 4.57 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตร์ลต่อความสามารถในการดูดซับของ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	101
ภาพที่ 4.58 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ PAC ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	103
ภาพที่ 4.59 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ PAC/NZVI ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	103
ภาพที่ 4.60 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ NZVI ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	104
ภาพที่ 4.61 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ HANs ในกรณีสารละลายเดี่ยว (a) และ สารละลายผสม (b) ของ GAC/NZVI ที่ pH 7 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	106
ภาพที่ 4.62 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ HANs ในกรณีสารละลายเดี่ยว (a) และ สารละลายผสม (b) ของ GAC/NZVI ที่ pH 7 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	107
ภาพที่ 4.63 ความสามารถในการดูดซับ HANs ในน้ำประปาจริงของ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง.....	109

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด มนุษย์เองก็เช่นกันมีความจำเป็นต้องใช้น้ำในการประกอบกิจกรรมต่างๆ แหล่งน้ำดิบที่นำมาใช้นั้นจะมีการเจือปนอยู่ของความขุ่น, สี, สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่อยู่ในรูปละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และอาจมีเชื้อโรคปนเปื้อน จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค หรือเรียกกระบวนการดังกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการการผลิตน้ำประปา (tap water treatment) ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวมีความจำเป็นที่จะต้องทำการฆ่าเชื้อโรคเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบในทางสุขภาพต่อผู้บริโภคน้ำได้ โดยในปัจจุบันการฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะนิยมใช้การเติมสารฆ่าเชื้อโรคกลุ่มสารฮาโลเจน เช่น คลอรีน (Cl) หรือ โบรมีน (Br) เป็นต้นลงไปในหน่วยการผลิต โดยสารดังกล่าวจะทำหน้าที่ฆ่าเชื้อโรคและสารอินทรีย์ในน้ำและยังพบว่าสารดังกล่าวจะคงเหลืออยู่หลังส่งจ่ายออกสู่ท่อส่งจ่ายอีกด้วย เพื่อป้องกันการตกค้างของเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนภายในท่อส่งนั่นเอง ด้วยเหตุนี้เองสารฆ่าเชื้อโรคนั้นกล่าวจะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในน้ำซึ่งจะส่งผลให้เกิดสารพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection by-products , DBPs) ซึ่งเป็นสารที่ทำลายดีเอ็นเอในร่างกายของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งได้ในระยะยาวเมื่อได้รับติดต่อกัน โดยแบ่งเป็นสองกลุ่มใหญ่คือ สารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากคาร์บอน (C-DBPs) เช่น กลุ่มไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes , THMs) , ฮาโลอะซิติกแอซิด (Haloacetic acids , HAAs) เป็นต้น และอีกกลุ่มคือ สารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากไนโตรเจน (N-DBPs) เช่น กลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) (Marhaba, 1998) โดยในงานวิจัยสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) ซึ่งเป็นหนึ่งในสารพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์กับสารแฮโลเจนของสารฆ่าเชื้อโรค ซึ่งพบว่าจะมีความเข้มข้นที่เกิดขึ้นประมาณร้อยละ 10 ของความเข้มข้นของสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าฮาโลอะซิโตไนไตรล์มีความเป็นพิษกว่าสารกลุ่มไตรฮาโลมีเทนและกรดฮาโลอะซิติก และอาจเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ไปเป็นฮาโลอะซิตาไมด์ (Haloacetamides) และกรดฮาโลอะซิติกซึ่งเป็นพิษที่มากกว่า (กัตตินานู สกุสสวัสดิพันธ์, 2555) โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) (World Health Organization, 2012) ได้กำหนดค่าแนะนำสำหรับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ซึ่งจะมีทั้งหมด 4 รูป ได้แก่ ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (DCAN) ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร , ไดโบรมอะซิโตไนไตรล์ (DBAN)

ไม่เกิน 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (TCAN) ไม่เกิน 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร และ โบรโมคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (BCAN) ยังไม่พบข้อมูล

สำหรับวิธีในการกำจัดนั้นจะเลือกใช้วิธีการดูดซับบนพื้นผิวโดยเลือกใช้ตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวที่ให้ประสิทธิภาพที่ค่อนข้างสูงในการดูดซับมลสารต่างๆ และเป็นตัวดูดซับที่ค่อนข้างมีราคาถูกเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ โดยเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ เกรดการค้าชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon : GAC) และชนิดผง (Powder Activated Carbon : PAC) นำมาทำการต่อต้านกับอนุภาคเหล็กนาโน (nanoscale zero valent -iron; NZVI) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์กลุ่มฮาโลเจน (halogenated organic compound) ได้ค่อนข้างสูง (Xiao et al., 2014) เพื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ ไอโซเทอมการดูดซับ ผลกระทบของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ อีกทั้งยังศึกษาสมบัติการคัดเลือกการดูดซับ เพื่อสามารถหาประสิทธิภาพในการกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (MCAN) , โมโนโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (MBAN) , ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (DCAN) , ไดโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (TCAN) เพื่อลดอัตราการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งและโรคอื่นๆ ที่เกิดจากการใช้น้ำที่มีสารตกค้างต่างๆจากการฆ่าเชื้อโรค

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (MCAN) , โมโนโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (MBAN) , ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (DCAN) , ไดโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (TCAN) บนพื้นผิวของตัวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดเกล็ดและชนิดผง ที่ทำการต่อต้านร่วมกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (AC/NZVI)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนในการกำจัดสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิดที่ทำการต่อต้านบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการคัดเลือกการดูดซับของสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ของถ่านกัมมันต์ที่ต่อต้านกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (AC/NZVI)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัยได้แก่

- 1.3.1 เลือกใช้ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ ชนิดเกล็ด (GAC) และชนิดผง(PAC) เกรดการค้า
- 1.3.2 สังเคราะห์อนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nano- Zero Valent Iron) เพื่อทำการต่อต้านกับ ถ่านกัมมันต์ ชนิดเกล็ด (GAC) และชนิดผง(PAC) เกรดการค้า
- 1.3.3 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับด้วยเทคนิค XRD, BET, SEM และ FTIR และทำการตรวจสอบปริมาณเหล็กทั้งหมด (total iron content) โดย เครื่องตรวจวัด Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
- 1.3.4 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท (batch) ใช้น้ำสังเคราะห์ ทำการศึกษาการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรอะซีโตไนไตรล์ (MCAN) , โมโนโบรโมอะซีโตไนไตรล์ (MBAN) , ไดคลอโรอะซีโตไนไตรล์ (DCAN) , ไตรโบรโมอะซีโตไนไตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซีโตไนไตรล์ (TCAN)
- 1.3.5 ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ของอนุภาคเหล็กนาโนต่อต้านกับ ถ่านกัมมันต์ ที่ช่วงพีเอช 5 , 7 และ 9
- 1.3.6 เตรียมตัวอย่างด้วยการสกัดและทำการวิเคราะห์ปริมาณสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography (GC/ECD) ตามวิธีของ EPA method 551.1
- 1.3.7 ศึกษาสมบัติในการคัดเลือกของตัวกลางดูดซับในน้ำประปาโดยใช้สารละลายผสมของสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ 5 ชนิด ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

1.4 สมมุติฐาน

- 1.4.1 สารฮาโลอะซีโตไนไตรล์สามารถถูกดูดซับได้สูงขึ้นบนตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และชนิดผงที่ทำการต่อต้านด้วยอนุภาคเหล็กขนาดนาโนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์กลุ่มฮาโลเจน (halogenated organic compound)
- 1.4.2 โครงสร้างของโมเลกุลของสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์แต่ละชนิด จะมีผลต่อการคัดเลือกการดูดซับ โดยชนิดที่มีน้ำหนักของโมเลกุลมากจะถูกดูดซับได้มากกว่า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถประเมินประสิทธิภาพการดูดซับสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมกับอนุภาคโลหะเหล็กขนาดนาโน (nano zero valent iron) เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์จากกระบวนการผลิตน้ำประปา



บทที่ 2

ความรู้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

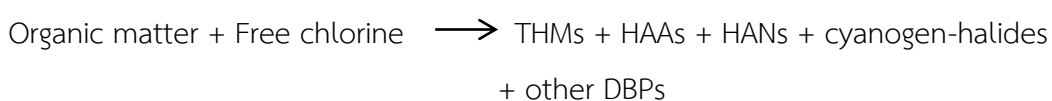
2.1 ฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles)

2.1.1 การเกิดฮาโลเอซิโตไนไตรล์

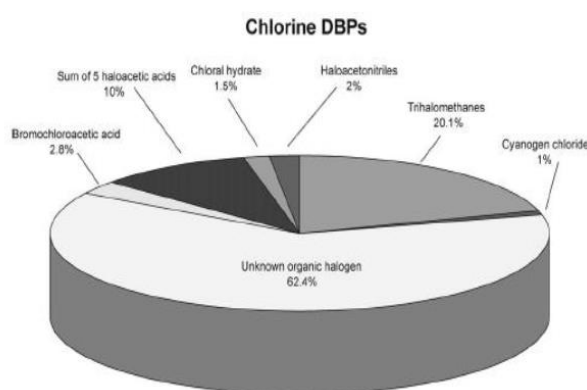
กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำเป็นกระบวนการที่มีความจำเป็นต่อการผลิตน้ำประปา ซึ่งการหาเชื้อโรคในน้ำนั้น มีอยู่หลายวิธี เช่นการเติมสารฮาโลเจน (มันซิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) โดยเป็นการเติมสารคลอรีนลงไปในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรค เนื่องจากเป็นสารที่มีคุณสมบัติของการฆ่าเชื้อโรคได้ดี ให้ประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 รวมถึงสามารถฆ่าเชื้อโรคจำพวกไวรัสและเชื้ออีโคไลได้ และคลอรีนยังสามารถคงฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนมาภายหลังด้วย นอกจากนี้คลอรีนยังมีข้อดี คือ ราคาถูก นำมาใช้ได้ง่าย และสามารถเก็บรักษาได้ง่าย โดยคลอรีนที่นำมาใช้มีด้วยกันหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น คลอรีนชนิดผง คลอรีนชนิดเม็ด และก๊าซคลอรีน เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ ดังสมการดังต่อไปนี้ (การประปานครหลวง, 2557)



โดยที่ Cl_2 , HOCl และ OCl^- เรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือ (Free residual Chlorine) ซึ่งยังพบว่าสารตัวนี้ยังทำปฏิกิริยาได้ต่อกับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่อยู่ในน้ำ ผลส่งผลให้เกิดเป็น ผลิตภัณฑ์สารพลอยได้ (Disinfection by Product, DBPs) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane, THMs) กรดฮาโลอะซิติก (Haloacetic acid, HAAs) ฮาโลเอซิโตไนไตรล์ (Haloacetonitriles, HANs) และอื่นๆดังสมการด้านล่าง (บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญญผล, 2556)



สัดส่วนของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนในน้ำดื่มดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยพบว่าปริมาณของฮาโลแอซิโตไนไตรล์ที่เกิดขึ้นมีประมาณร้อยละ 2 โดยทั่วไป ปริมาณที่พบของผลิตภัณฑ์พลอยได้จะมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ แต่หากได้รับต่อเนื่องเป็นเวลานานอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพทำให้เกิดโรคได้ (Richardson, 2003)



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนปริมาณของผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในน้ำดื่มจากการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน (Plewa, Wagner, & Richardson, 2017)

จากภาพที่ 2.1 เป็นการแสดงถึงสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในกระบวนการผลิตน้ำดื่มซึ่งพบว่าสารกลุ่มหลักจะเป็นกลุ่ม THMs และยังมีสารกลุ่ม HANs ในร้อยละ 10 ของความเข้มข้นสารกลุ่ม THMs แต่สารกลุ่ม HANs จะมีความเป็นพิษที่อยู่ในระดับที่สูงกว่ากลุ่ม THMs (พนิดา ปรารัตน์, 2554)

โดยกระบวนการผลิตน้ำประปา น้ำดิบจะต้องผ่านกระบวนการผลิตหลายขั้นตอนด้วยกันซึ่งรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้ (การประปานครหลวง, 2550)

1) แหล่งน้ำ

แหล่งน้ำที่นำมาผลิตน้ำประปานั้นได้มาจากแม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ หนอง บึง และน้ำน้ำจะต้องไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเกินกว่าที่กำหนดไว้ และปราศจากสิ่งโสโครกปะปน มีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการตลอดปีซึ่งเราจะติดตั้งเครื่องสูบน้ำไว้ใกล้กับแหล่งน้ำในโรงสูบน้ำแรงดันต่ำเพื่อสูบน้ำดิบไปผลิตเป็นน้ำประปา

2) การเติมสารเคมี

ก่อนที่น้ำดิบจากแหล่งน้ำจะไหลเข้าถังตกตะกอนจะมีการใส่สารเคมีลงไปเพื่อเร่งการตกตะกอน ได้แก่ สารส้ม และปูนขาว ในอัตราส่วนที่พอเหมาะพอดีกับคุณภาพน้ำดิบในแต่ละฤดูกาล

3) การตกตะกอน

เมื่อใส่สารเคมีแล้วน้ำดิบจะไหลเข้ามายังถังตกตะกอนโดยผ่านระบบการกวนเพื่อให้สารเคมีได้สัมผัสและทำปฏิกิริยากับตะกอน หรือความขุ่นที่อยู่ในน้ำจับเป็นก้อนเล็กๆแล้วค่อยๆมีขนาดใหญ่ขึ้นตกลงสู่ก้นถัง เหลือแต่น้ำใสไหลไปยังถังกรองน้ำ การตกตะกอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ความขุ่นของน้ำที่ออกจากถังตกตะกอนไม่เกิน 7 หน่วย

4) การกรองน้ำ

เมื่อผ่านการตกตะกอนมาแล้วน้ำจะไหลเข้ามายังถังกรองน้ำเพื่อกรองเอาตะกอนที่ละเอียดออกอีกครั้ง น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะใสมาก มีความขุ่นไม่เกิน 3 หน่วย ถังกรองจะต้องมีการล้างน้ำทรายกรองอยู่เสมอ

5) การฆ่าเชื้อโรค

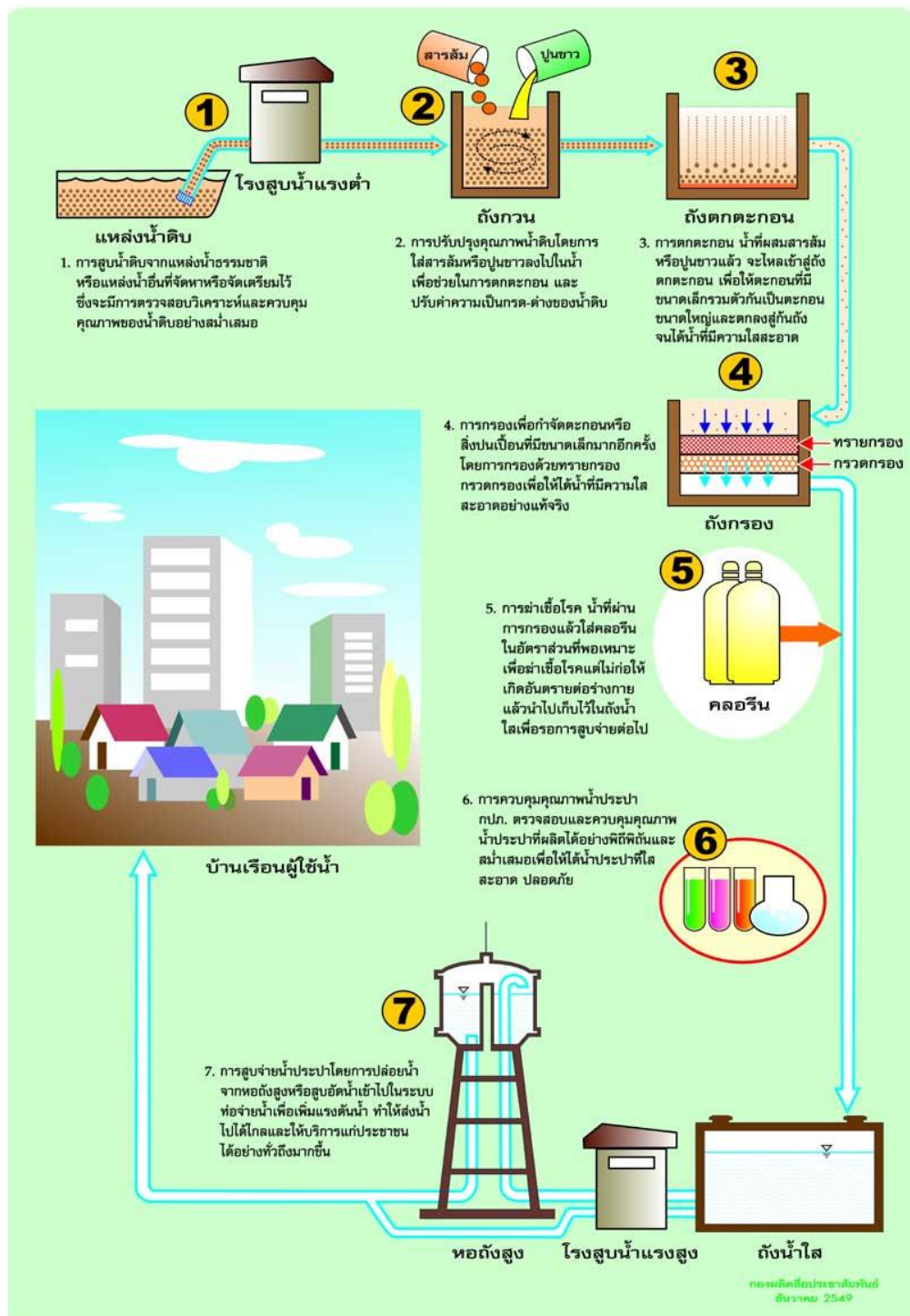
น้ำที่กรองแล้วเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีเชื้อโรคหลงเหลืออยู่จึงต้องมีการใส่สารคลอรีนฆ่าเชื้อโรค ซึ่งคลอรีนสามารถฆ่าเชื้อโรคได้เกือบทุกชนิดควบคุมง่ายและช่วยกำจัดกลิ่นสีโดยการใส่คลอรีนในน้ำให้ไหลไปตามเส้นท่อเพื่อฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนเข้ามาภายหลัง

6) ถังน้ำใส

เป็นถังสำหรับเก็บน้ำสะอาดที่ผ่านการกรองแล้ว เรียกว่า น้ำประปา เพื่อรอจ่ายให้ผู้บริโภคได้ใช้น้ำสะอาด

7) หอถังสูง

เป็นหอถังสูงที่เก็บน้ำที่สูบขึ้นมาจากถังน้ำใส เพื่อทำให้เกิดแรงดันน้ำในการจ่ายให้บริการไปตามเส้นท่อถึงบ้านประชาชน



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตน้ำประปา (ที่มา : การประปานครหลวง , 2550)

โดยมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำประปาและน้ำบริโภคที่สำคัญ ดังตารางที่ 2-1
เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภค


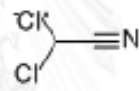
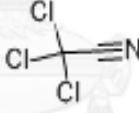
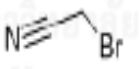
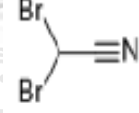
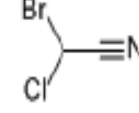
ตารางที่ 2-1 เกณฑ์มาตรฐานของคุณภาพน้ำประปาและน้ำบริโภคที่สำคัญ

พารามิเตอร์	หน่วย	คุณภาพน้ำดื่ม ของWHO	คุณภาพน้ำ บริโภค ในชนบท*	คุณภาพ น้ำประปา กรมอนามัย (ปี 2543)
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	pH	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5	6.5 - 8.5
ความขุ่น (Turbidity)	NTU	5	10	10
ปริมาณสารละลายทั้งหมดที่เหลือ จากการ ระเหย (TDS)	mg/L (ppm)	1,000	1,000	1,000
เหล็ก (Fe)	mg/L (ppm)	0.3	0.5	0.5
คลอรีนอิสระตกค้าง(Residual Free Chlorine)	mg/L (ppm)	-	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5

2.1.2 ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของฮาโลเอซีไตนไตรล์

สารกลุ่มฮาโลเอซีไตนไตรล์ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในการผลิตน้ำดื่มนี้ มีทั้งหมดอยู่ด้วยกัน 6 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Monochloroacetonitrile) , ไดคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Dichloroacetonitrile) , ไตรคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Trichloroacetonitrile) , โมโนโบรโมเอซีไตนไตรล์ (Monobromoacetonitrile), ไดโบรโมเอซีไตนไตรล์ (Dibromoacetonitrile) และ โบรโมคลอโรเอซีไตนไตรล์ (Bromochloroacetonitrile) โดยคุณสมบัติเบื้องต้นแต่ละชนิดดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารกลุ่มฮาโลแอซิโตไนไตรล์ชนิดต่างๆ (พนิดา ปรา
รัตน์, 2554)

ชื่อสารฮาโลแอซิโตไนไตรล์	สูตรโมเลกุล	สูตรโครงสร้าง	น้ำหนัก โมเลกุล (กรัม/ โมล)	จุดเดือด (°C)	ค่าการ ละลาย น้ำ (มก/ มล)
โมนอคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Monochloroacetonitrile : MCAN)	C_2H_2ClN		75.50	126	100
ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Dichloroacetonitrile:DCAN)	C_2HClN		109.94	112- 113	10-50
ไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Trichloroacetonitrile: TCAN)	C_2Cl_3N		144.39	181	<1
โมนอโบรมอแอซิโตไนไตรล์ (Monobromoacetonitrile:MBAN)	C_2H_2BrN		119.95	150	50-100
ไดโบรมอแอซิโตไนไตรล์ (Dibromoacetonitrile:DBAN)	C_2HBr_2N		198.85	170	50
โบรมอคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Bromochloroacetonitrile:BCAN)	$C_2HBrClN$		154.39	138- 140	N.A

*หมายเหตุ N.A = ไม่มีข้อมูล

การเกิดสารประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำดิบได้แก่ ปริมาณสารฆ่าเชื้อที่เติมลงไป
ในน้ำและปริมาณสารอินทรีย์ธรรมชาติ นอกจากนี้การลดพีเอชหรือเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความ
เข้มข้นของสารกลุ่มนี้มากขึ้นด้วย (Siddiqui และคณะ, 1996)

2.1.3 ความเป็นพิษของฮาโลแอซีโตไนไตรล์

ความเป็นพิษของฮาโลแอซีโตไนไตรล์ที่พบ คือจะมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงระดับทางพันธุกรรมของมนุษย์ (Daniel และคณะ., 1986) และถ้าได้รับเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน จะส่งผลให้เกิดโรคมะเร็งระดับซี (X.-F. Li & Mitch, 2018) และยังพบว่าสารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษที่มากกว่ากลุ่ม THMs และ HAAs (Plewa และคณะ., 2017) ดังตาราง 3.4 และมีค่า LD₅₀ ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ผลกระทบต่อสุขภาพ (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

ลักษณะการเข้าสู่ร่างกาย	ผลกระทบต่อร่างกาย
หายใจ	การหายใจเข้าไปจะทำให้มีอาการไอ และวิตกังวล
ผิวหนัง	การสัมผัสผิวหนังนั้นจะทำให้เกิดการระคายเคือง
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้มีอาการปวดท้อง คลื่นไส้และเกิดกรดไฮโดรยานิกเกิดขึ้น
ตา	การสัมผัสลูกตาทำให้ตาแดงและปวดตา
การก่อมะเร็งและความผิดปกติอื่นๆ	ความเข้มข้นในบรรยากาศที่อันตรายที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็วที่ 20 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 2-4 ค่า LD₅₀ ของสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ที่ทดลองในหนูทดลองโดยการกิน (Clearsynth, 2013, U.S Department Health and Human Services, 2013)

ชื่อสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์	สูตรโมเลกุล	LD50 (มก/กก)
โมนอคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (Monochloroacetonitrile : MCAN)	C ₂ H ₂ ClN	300
ไดคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (Dichloroacetonitrile : DCAN)	C ₂ HClN	300
ไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (Trichloroacetonitrile: TCAN)	C ₂ Cl ₃ N	250

ชื่อสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์	สูตรโมเลกุล	LD50 (มก/กก)
โมนอโบรโมแอซีโตไนไตรล์ (Monobromoacetonitrile:MBAN)	C_2H_2BrN	269
ไดโบรโมแอซีโตไนไตรล์ (Dibromoacetonitrile:DBAN)	C_2HBr_2N	245
โบรโมคลอโรแอซีโตไนไตรล์ (Bromochloroacetonitrile:BCAN)	$C_2HBrClN$	300

2.1.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาโลแอซีโตไนไตรล์

ในปัจจุบันได้มีการกำหนดระดับความเข้มข้นของการปนเปื้อนฮาโลแอซีโตไนไตรล์ในน้ำดื่มในหลายองค์กรด้วยกัน เช่น U.S Environmental Protection Agency (U.S EPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดระดับความปนเปื้อนมากที่สุด (Golfinopoulos, Nikolaou, & Lekkas, 2003) และองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, 2012)ได้แนะนำ ระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Maximum Contaminant Levels and Advisory Levels) ของน้ำดื่ม สำหรับฮาโลแอซีไนไตรล์ที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์วัยผู้ใหญ่ที่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม ดังตารางที่ 2-4 สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการระบุไว้ในมาตรฐานน้ำดื่มและบริโภค

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-5 ปริมาณความเข้มข้นของฮาโลแอซีโตไนไตรล์ที่กำหนดไว้สำหรับน้ำดื่ม

ฮาโลแอซีโตไนไตรล์	US EPA, 1999 มิลลิกรัมต่อลิตร	(Richardson, 2011) มิลลิกรัมต่อลิตร	WHO, 2011 ไมโครกรัมต่อลิตร
ไดคลอโรอะซีโตไนไตรล์	≤ 0.006	≤ 0.09	≤ 20
ไดโบรโมแอซีโตไนไตรล์	≤ 0.02	≤ 0.1	≤ 70
ไตรคลอโรแอซีโตไนไตรล์	N.A	≤ 0.01	≤ 1
โบรโมคลอโรแอซีโตไนไตรล์	N.A	N.A	N.A

หมายเหตุ N.A – ข้อมูลยังไม่เพียงพอ

2.1.5 การตรวจพบสารฮาโลอะซิโนไนไตรล์ (HANs)

มีรายงานในการตรวจพบสารผลพลอยได้จากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคในระบบสูบน้ำประปาในเขตกรุงเทพมหานคร 4 โรงผลิตน้ำ ได้แก่ โรงผลิตน้ำประปาสามเสน , โรงผลิตน้ำประปามหาสวัสดิ์, โรงผลิตน้ำประปาธนบุรีและ โรงผลิตน้ำประปาบางเขน ซึ่งพบว่าการตรวจวัดมีค่าของสารไดคลอโรอะซิโนไนไตรล์ (DCAN) ซึ่งเป็นหนึ่งในสารของกลุ่มฮาโลอะซิโนไนไตรล์ในบริเวณเขตสามเสนที่มีค่าที่เกินค่ามาตรฐาน เมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดขององค์การอนามัยโลก (WHO,2011) ซึ่งอาจมีความเสี่ยงต่อผู้ที่ได้รับสารดังกล่าว ในกรณีที่ได้รับเป็นระยะเวลาที่ต่อเนื่องและยาวนาน อาจนำไปสู่การพัฒนาต่อการเกิดผลกระทบทางสุขภาพที่เป็นมาจากสารดังกล่าวต่อผู้ที่ได้รับได้ (โครงการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เสนอ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รศ.ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล, 2557) พบว่ามีค่าของสารกลุ่มฮาโลอะซิโนไนไตรล์ที่มีค่าตรวจวัด ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2-6 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้บริเวณเขตสามเสน

พื้นที่เก็บตัวอย่าง	pH	Chlorine residual (mg/l)	DCAN (ug/l)	TCAN (ug/l)
บริเวณต้นสายจากจุดจ่ายน้ำของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน				
องค์การเภสัชกรรม	7.69	0.85	17.13	8.95
สถาบันสุขภาพจิตและ วัยรุ่นราชนครินทร์	7.53	0.85	2.54	N.A
กระทรวงอุตสาหกรรม	7.84	0.85	14.40	7.37
บริเวณปลายสายจากจุดจ่ายน้ำของโรงผลิตน้ำประปาสามเสน				
โรงแรมรอยัลปรีนเซส	7.69	0.67	24.31**	8.96
โรงพยาบาลมิชชั่น (จุด1)	7.7	0.67	26.72**	8.21
โรงพยาบาลมิชชั่น (จุด2)	7.8	0.67	15.92	7.97

** = มีค่าเกินค่ามาตรฐานเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานขององค์การอนามัยโลก ,2011

N.A = ข้อมูลไม่เพียงพอ

2.1.6 กระบวนการกำจัดฮาโลเอซีโตไนไตรล์

การกำจัดหรือการควบคุมการเกิดฮาโลเอซีโตไนไตรล์ในน้ำดื่มสามารถทำได้ที่ขั้นตอนหลักในการผลิตน้ำดื่ม ดังนี้

- 1) ควบคุมหรือกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติในน้ำก่อนเข้ากระบวนการฆ่าเชื้อโรค
- 2) การเลือกใช้กระบวนการฆ่าเชื้อโรคที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้น้อยที่สุด
- 3) กรณีที่เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ขึ้นแล้ว ต้องเลือกวิธีการหรือเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการกำจัด

2.1.7 ปัจจัยที่ทำให้เกิดสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์

- 1) ปริมาณสารตั้งต้นของอินทรีย์สาร (organic substances) การเกิดสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์จะมีปริมาณมาก ถ้ามีปริมาณของอินทรีย์สารมาก
- 2) ปริมาณสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์ (Halogen - substituted concentration) การเกิดสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์จะมีปริมาณมาก ถ้ามีปริมาณของสารฮาโลเจนมาก
- 3) ระยะเวลาที่คลอรีนสัมผัสน้ำ (contact time) การเกิดสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์จะมีปริมาณมากขึ้นถ้าระยะเวลาที่คลอรีนสัมผัสน้ำมีระยะเวลานานขึ้น
- 4) อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิสูง สารฮาโลเอซีโตไนไตรล์และคลอรีนจะระเหยได้มากขึ้น ทำให้มีสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์เหลืออยู่ในน้ำน้อยลง
- 5) ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของน้ำที่เหมาะสมคืออยู่ในช่วง pH 5-7 เนื่องจากเป็นช่วงที่คลอรีนอยู่ในรูปไฮโปคลอไรต์สามารถเกิดปฏิกิริยาในการฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนต่างๆได้ดี แต่ถ้า pH อยู่ในช่วงสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนต่างๆ จะน้อยลง ทำให้มีสารอินทรีย์มากขึ้น และถ้า pH ต่ำกว่า 4 จะมีคลอรีนอิสระอยู่ในน้ำมาก

2.1.8 กระบวนการที่สำคัญซึ่งก่อให้เกิดสารฮาโลเอซีโตไนไตรล์ในกระบวนการผลิตน้ำประปา

- 1) กระบวนการ pre-chlorination เป็นการเติมสารคลอรีนครั้งที่ 1 ในน้ำดิบที่สูบน้ำมาเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนในน้ำปรับสภาพของน้ำให้เหมาะสมก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตในขั้นต่อไป โดยจะเติมในน้ำดิบก่อนเข้าถังตกตะกอน
- 2) กระบวนการ post - chlorination เป็นการเติมสารคลอรีนครั้งที่ 2 หลังจากที่น้ำผ่านกระบวนการกรองแล้วเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนในน้ำ

3) การเติมสารคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนในน้ำประปาเป็นการฆ่าเชื้อโรคและป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค และเหตุผลที่ใช้คลอรีนเนื่องจากคลอรีนมีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ดีนอกจากนี้การเติมคลอรีนยังมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

- ออกซิไดซ์เหล็ก แมงกานีส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสีและกลิ่น
- ทำลายสารอินทรีย์
- ควบคุมปริมาณสาหร่าย
- ลดค่า BOD
- ช่วยให้การเกิดตะกอนดีขึ้น

2.1.9 แนวทางการป้องกันและลดปริมาณสารฮาโลเอซีโตไนโตรลีนในน้ำประปาในการลดปริมาณสารฮาโลเอซีโตไนโตรลีนในน้ำ มีวิธีการต่างๆ ดังนี้

การลดที่กระบวนการผลิตน้ำประปา

- 1) ใช้แหล่งน้ำดิบที่มีคุณภาพดี
- 2) ใช้จุนสี (copper sulfate) กำจัดสาหร่ายในแหล่งน้ำและกระบวนการผลิตน้ำ แทนการใช้คลอรีนโดยควบคุมไม่ให้มีปริมาณสูงเกินระดับซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่น โดยปกติทั่วไปใช้ที่ความเข้มข้นประมาณ 0.16-1.2 mg/l
- 3) ไม่มีการ pre – chlorination ในกระบวนการผลิตน้ำประปา
- 4) ควบคุมการจ่ายคลอรีนในการ post – chlorination ให้มีปริมาณที่เหมาะสม (optimum dose) ไม่เกินความจำเป็น
- 5) ปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้ากระบวนการผลิตเพื่อลดสารอินทรีย์ เช่น การเติมอากาศ การเติมผงถ่านกัมมันต์
- 6) เปลี่ยนสารเคมีใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมาเป็น การใช้โอโซน คลอรามินหรือคลอรีนไดออกไซด์

การลดที่รูปแบบการบริโภค

- 1) การต้มเดือดและการผึ่งแดด เนื่องจากสารฮาโลเอซีโตไนโตรลีนเป็นสารที่ระเหยง่าย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารฮาโลเอซีโตไนโตรลีนจะระเหยไปอย่างง่าย

- 2) การตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์สามารถระเหยได้แม้ในอุณหภูมิห้อง
- 3) การกรองด้วยเครื่องกรอง โดยคาร์บอนจะจับคลอรีนไว้ทำให้ปริมาณคลอรีนลดลง
- 4) การแช่แข็ง ทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวระหว่างสารฮาโลแอซีโตไนไตรล์ และ สารอินทรีย์เกิดขึ้นช้าลง

2.2 อนุภาคโลหะเหล็กนาโน (Nano zero-valent iron : nZVI)

โลหะเหล็กนาโนคือโลหะเหล็ก (iron metal) ที่มีขนาดนาโน (nano zero-valence iron หรือ NZVI) มักถูกเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยารีดิวซ์อนุมูลเหล็กให้กลายเป็นอนุภาคของเหล็ก โดยใช้สารช่วยการกระจายตัวเพื่อไม่ให้อนุภาคเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ตามปกติ จุดหลอมเหลวของเหล็กอยู่ที่ 1811 เคลวิน หรือ 1538 องศาเซลเซียส แต่เมื่อมีสภาพเป็นอนุภาคนาโนแล้ว จุดหลอมเหลวจะลดลงอย่างมาก อนุภาคเหล็กนาโนมีสมบัติในการทำปฏิกิริยารีดิวซ์สารอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดมลภาวะให้กลายเป็นสารที่มีพิษน้อยลงหรือไม่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อนุภาคเหล็กนาโนถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังใช้ในการผลิตเหล็กหล่อ ที่หล่อขึ้นด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการหลอมเหล็กปกติ (เลอสรร จนสุกาญจน์ และคณะ 2012)

อนุภาคโลหะเหล็กนาโน (Nano zero-valent iron : nZVI) นี้เป็นวัสดุขนาดนาโน ที่มีความนิยมในการนำมาใช้ในการฟื้นฟู (remediation) โดยอาจจะนำมาผสมหรือเคลือบกับวัสดุอื่นๆ เช่น แพลเลเดียม , เงิน หรือ ทองแดง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (catalyst) ซึ่งอาจเรียกว่า bimetallic nanoparticle นอกจากนี้ยังพบว่า nZVI อาจจะเป็น ส่วนผสมร่วมกับ สารลดแรงตึงผิว และ น้ำมัน ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างชั้นผนังที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการมีปฏิสัมพันธ์กับของเหลวที่ไม่ชอบน้ำ และป้องกันในส่วนของการทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำได้ในเชิงพาณิชย์ nZVI นี้จะมีขนาดอนุภาคที่ไม่เกิน 100 นาโนเมตร

Bardos (2011)) สำหรับ nZVI นี้พบว่าจะมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ปนเปื้อนรวมถึง สารประกอบอินทรีย์คลอรีน (chlorinated organic compounds) เช่น โพลีคลอริเนเตดไบฟีนิลส์ (PCBs) และ ไตรคลอโรเอเทน (TCE) สำหรับ nZVI และ อนุภาคนาโนอื่นๆที่

ไม่ชอบแสงจะสามารถฉีดลงไปได้ดินที่เป็นส่วนของการปนเปื้อนเรียกว่าการบำบัดพื้นฟูน้ำใต้ดิน และอาจทำได้กับการบำบัดในดิน

สำหรับการเตรียมอนุภาค nZVI นี้จะสามารถเตรียมได้จากโซเดียมโบโรไฮไดรต (NaBH_4 (0.2 M)) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์โดยทำการเติมลงไปในการละลายไอออนคลอไรด์ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.05 M) ในอัตราส่วนผสม 1:1 ดังสมการดังต่อไปนี้ และวิธีการสังเคราะห์ nZVI แบบต่างๆสามารถสรุปรวมได้ดังตารางที่ 2-6



ตารางที่ 2-7 วิธีการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nZVI)

วิธีการสังเคราะห์	คำอธิบาย	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด	ขนาด (nm)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	อ้างอิง
Lithography-grinding	ใช้การย่อยจากอนุภาคเหล็กขนาดใหญ่	ราคาถูก	มีความจำกัดในเรื่องการกระจายของอนุภาคขนาดใหญ่	N.A	N.A	Shan และคณะ, 2009
Chemical reduction	การลดลงของเกลือของเหล็กโดยใช้ตัวรีดิวซ์	ไม่ยุ่งยากและง่ายต่อการใช้ในห้องปฏิบัติการ	ต้องใช้สารพิษเป็นตัวรีดิวซ์	1-100	33.5	(Fan, O'Brien Johnson และคณะ, 2016)
Carbotherma-l reduction	Fe ²⁺ เป็นตัวรีดิวซ์ nZVI ที่อุณหภูมิสูง	ได้อนุภาคเหล็กทรงกลม, ตัวรีดิวซ์มีราคาค่อนข้างถูก (H ₂ , CO ₂ , CO)	ยังไม่นิยมใช้	201-50	130	(Dai และคณะ, 2016)
Ultrasound	ใช้คลื่นอัลตราซาวนด์และสารรีดิวซ์	ได้อนุภาคเหล็กขนาดนาโน	ต้องใช้สารพิษเป็นตัวรีดิวซ์	10	34.0-42.0	(Jamei, Khosravi และคณะ, 2014)
Green synthesis	เป็นการสังเคราะห์โดยการสกัดจากพืช	ใช้แทนสารพิษที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์	ได้รูปร่างที่ไม่แน่นอน	20-120	5.8	(Kuang, Wang, และคณะ, 2013)

2.3 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

2.3.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติหรืออินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ (activation process) จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีคุณสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้ดี ซึ่งเป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูงเพราะมีรูพรุน 18 -10,000 อัมสตรองเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ตามผิวของรูพรุนยังมีเลคตรอนอิสระที่พร้อมจะแลกเปลี่ยนประจุและยึดเหนี่ยวโมเลกุลของสารต่างๆ ได้อย่างดี ถ่านกัมมันต์เมื่อใช้หมดแล้วอาจทำให้กลับมาความสามารถในการดูดซับ กลิ่น และก๊าซ และสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยการ Regenerate (ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 2553)

Derbyshire และคณะ., (2001) กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือวัตถุดิบที่มีผิวภายในและมีความพรุนสูง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้านโดยอาจใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่นอกจากนั้นถ่านกัมมันต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและราคาที่ไม่แพงของถ่านกัมมันต์ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่ถูกใช้กันมาก

Jankowskaและคณะ,(1981) กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือการนำเอาวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ซึ่งทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งหากดูพื้นที่หน้าตัดของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (87 -90%) และมีธาตุอื่นๆเป็นองค์ประกอบ คือ ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และไนโตรเจน โดยจะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดนั้นขึ้นกับปริมาณที่มีในวัตถุดิบและอาจเกิดขึ้นอีกได้ในขั้นตอนการผลิต

มอก. 900-2532 กล่าวว่า ถ่านกัมมันต์คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่คาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำและมีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างได้เป็นอย่างดี

2.3.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์

ธราพงษ์ วิทิตสานต์ (2553) กล่าวว่า ในการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วยวิธีการกระตุ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- 1) การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน
- 2) เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังศักย์สูงขึ้น โดยจัดการเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ที่มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- 3) เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

2.3.3 วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันกรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 2 ขั้นตอน คือ

- 1) คาร์บอนในเข้ชั้นเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง โดยใช้ความร้อนทำให้สารระเหยแตกตัวและแทรกออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ ก๊าซและน้ำมันหยาบ กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น การคาร์บอนไนซ์ทำให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้ อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน
- 2) การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นการทำให้ผิวถ่านชาร์เกิดรูพรุนขนาดต่างๆ ด้วยสารกระตุ้น อาจเป็นได้ทั้งไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารเคมี ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) เป็นต้น

2.3.4 กระบวนการทำงานของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้หลักการดูดซับ (Adsorption) และดูดซึม (Absorption) การดูดซับจะเป็นการจับกันอย่างหลวมๆของสารอินทรีย์และคาร์บอนที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ โดยยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นชั้นๆ ส่วนกระบวนการดูดซึมนั้นจะอาศัย

หลักการแพร่ของก๊าซหรือสารประกอบเข้าไปในร่างแหรูพรุนภายในเม็ดถ่านซึ่งภายในจะเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น โอโซนถูกดูดซึมเข้าไปและถูกคาร์บอนรีดิวซ์เป็นออกซิเจน ซึ่งตัวโอโซนหรือออกซิเจนไม่ได้ไปสร้างหรือถูกจับไว้โดยถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด ส่วนกระบวนการดูดซึมอีกประเภท คือ การดูดซึมไปแล้วเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไม่ได้ สร้างพันธะที่หนาแน่นกับคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ (ธนาพงษ์ วิจิตต์, 2553)

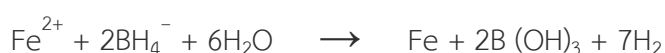
2.3.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์

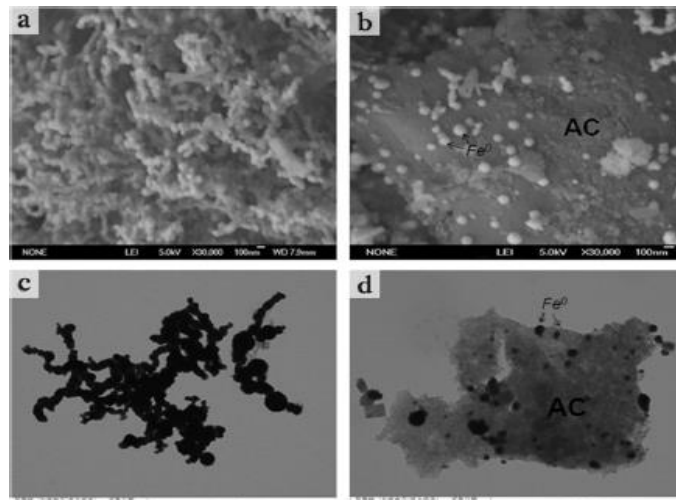
ตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) ได้จำแนกชนิดของถ่านกัมมันต์ออกเป็น 2 ชนิดหลักคือ

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (Granular Activated Carbon : GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำมาผ่านตะแกรงแล้วจะมีขนาด 150 ไมโครเมตร แต่จะต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
- 2) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon : PAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่นำมาผ่านตะแกรงแล้วจะมีขนาด 150 ไมโครเมตร แต่จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

2.4 ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคโลหะเหล็กนาโน (AC/NZVI)

ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคโลหะเหล็กนาโน (AC/NZVI) โดย NZVI เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{2+} ในเฟสของเหลวร่วมกับ $NaBH_4$ โดยการนำ 1.986 กรัม $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ละลายใน 100 มล. เอทานอลและน้ำ ในอัตราส่วนของ เอทานอลต่อน้ำเป็น 3 ต่อ 7 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) โดยใช้ PEG (0.5 กรัม) เป็นสารลดแรงตึงผิว ถ่านกัมมันต์ (2.0 กรัม) ผสมสารละลายที่มีอนุภาคเหล็ก 100 มล. จากนั้นกวนเร็วที่ 120 รอบต่อนาที ในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นแช่อ่างน้ำคองอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 90 นาที และทำการหยดโซเดียมโบโรไฮไดรไรด์ ($NaBH_4$) 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 50 มล. ด้วยอัตรา 2 มิลลิลิตรต่อนาทีลงในภาชนะ หลังจากนั้นทำการเขย่าอีก 30 นาที จากนั้นนำ NZVI / GAC ที่ได้มาทำความสะอาด โดยการล้างด้วยน้ำ RO เพื่อกำจัดเอทานอลสามครั้งในระบบเปิดและทำให้แห้ง ที่ $80^\circ C$ บนจานร้อนไฟฟ้า (electric hot plate) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเกิดฟองของไนโตรเจนขึ้น จากนั้นทำการเก็บรักษาไว้ในขวดปิดผนึกภายใต้ไนโตรเจนที่อุณหภูมิห้อง (Xiao และคณะ ,2015)





SEM image of NZVI particles (a) and NZVI/AC (b); TEM images of NZVI particles (c) and NZVI/AC (d)

ภาพที่ 2.3 แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ SEM (a) GAC ; (b) Fe⁰ ; (c) GAC-Fe⁰ ; TEM (d) GAC ; (e) Fe⁰ ; (f) GAC-Fe⁰ (Xiao.,2015)

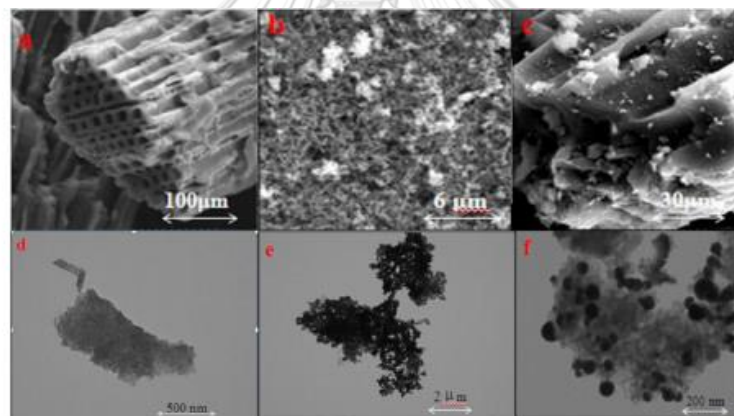
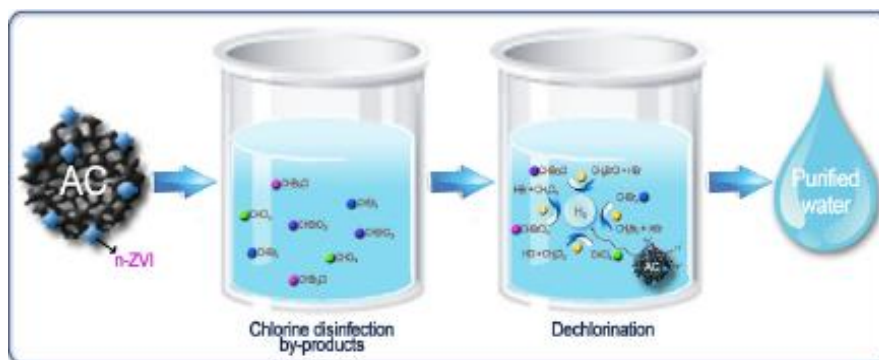
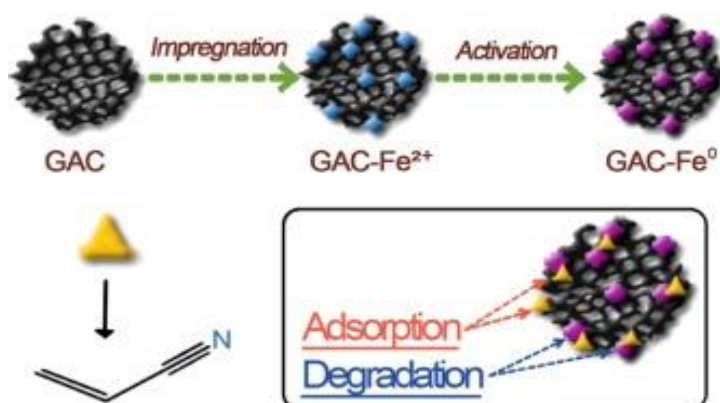


Fig. 1. SEM images of GAC (a); Fe⁰ nanoparticles (b); GAC-Fe⁰ nanoparticles (c); TEM images of GAC (d); Fe⁰ nanoparticles (e); GAC-Fe⁰ nanoparticles (f).

ภาพที่ 2.4 แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ SEM (a) NZVI particle ; (b) NZVI/AC ; TEM (c) NZVI particle ; (d) NZVI/AC (Xiao.,2015)



ภาพที่ 2.5 ภาพจำลองของอนุภาคเหล็กศูนย์ขนาดนาโนต่อติดกับถ่านกัมมันต์ (Xiao.,2014)



ภาพที่ 2.6 ภาพจำลองแสดงการบทบาทในการกำจัดสารกลุ่มผลพลอยได้น้ำในประปาของอนุภาคเหล็กศูนย์ขนาดนาโนต่อติดกับถ่านกัมมันต์ (Xiao.,2014)

2.5 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของอนุภาคเหล็กโนนาต่อติดกับถ่านกัมมันต์

2.5.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยใช้ X-ray Powder Diffraction (XRD)

X-ray diffraction (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non - destructive method) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้ ดังนี้ คือ

1. ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

2.5.2 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน

วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนโดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับไนโตรเจน โดยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H วิธีการใช้คือ ใช้ Adsorption vessel 2 ใบ ที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยใบหนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกใบหนึ่งเป็นภาชนะเปล่า แล้วผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปใ้ภาชนะทั้งสองภายใต้ความดันปกติ ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นทำให้ภาชนะทั้งสองเย็นจัดใน cold bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับไนโตรเจนบนผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภาชนะทั้งสองซึ่งสามารถวัดได้ โดยมานอมิเตอร์ โดยมีวิธีการดังนี้

- 1) อบอุ่นตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นจัดในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งมา 0.02-0.05 กรัม ใส่ลงใน Adsorption vessel
- 2) วางเซลล์ที่บรรจุตัวอย่างไว้ลงใน Heating Thermostat
- 3) อบอุ่นตัวอย่างที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผ่านก๊าซไนโตรเจนธรรมดาที่ควบคุมความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลาประมาณ 45 นาที เพื่อกำจัดโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างก่อนทำการวัด
- 4) ให้เซลล์ 2 เซลล์ ที่มีปริมาตรเท่ากันโดยเซลล์หนึ่งบรรจุตัวอย่าง อีกเซลล์หนึ่งเป็นเซลล์เปล่า
- 5) ผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไปใ้เซลล์ทั้งสอง ภายใต้ความดันปกติที่อุณหภูมิห้อง
- 6) ทำให้เซลล์ทั้งสองเย็นจัดใน Cold Bath ที่บรรจุไนโตรเจนเหลวไว้ การดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนพื้นผิวของตัวอย่างจะทำให้เกิด Pressure Difference ระหว่างเซลล์ทั้งสองซึ่งวัดได้โดยใช้ Differential Monometer
- 7) อ่านค่าที่ได้แล้วนำไปคำนวณค่าพื้นที่ผิวต่อไป

พื้นที่ผิวจำเพาะคำนวณโดยใช้ข้อมูลการดูดซับในช่วงความดันสัมพัทธ์ตั้งแต่ 0.06 - 0.14 และใช้สมการของ Brunauer – Emmett – Teller (BET) คือ

$$\frac{1}{v\left[\left(\frac{p_0}{p}\right) - 1\right]} = \frac{C - 1}{V_m C} \left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{1}{V_m C}$$

เมื่อ V = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูพรุน (cm^3)

- V_m = ปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวรูพรุนแบบโมเลกุลชั้นเดียว (Mono - molecule Layer) ปกคลุมทั่วผิวแบบรูพรุน (cm^3)
 P = ความดันที่สภาวะใดๆ (mmHg)
 P_0 = ความดันไอหรือความดันอิ่มตัว (Vapor Pressure or Saturated Vapor) (mmHg)
 C = ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด

ค่าจำเพาะสำหรับการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิด (C) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$c = \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{RT}\right)$$

เมื่อ E_1 เป็นความร้อนของการดูดซับในชั้นที่หนึ่ง และ E_2 เป็นความร้อนการดูดซับในชั้นที่สองหรือมากกว่า

จากสมการของ BET สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงได้ โดยแกน Y คือค่า $1/v[(P_0 / P) - 1]$ และแกน X คือค่า $\phi = P/p_0$ ที่ได้จากการทดลอง เรียกกราฟที่ได้ว่า BET plot

เมื่อ V_m และ C เป็นค่าที่ได้จากสมการของ BET จากการ plot โดยได้จากความชัน และจุดตัดแกน Y สามารถนำไปคำนวณปริมาณในการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งได้จากสมการ

$$V_m = \frac{1}{A + 1}$$

$$C = 1 + \frac{A}{1}$$

V_m มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะในหน่วยตารางเมตรต่อกรัม ได้จากสมการ

$$S = \frac{N_0 V_m A}{22414 m}$$

เมื่อ	S	=	พื้นที่ผิวจำเพาะ
	N_0	=	เลขอวกาโตร
	m	=	ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊ส ($N_2 = 16.2$ Å^2)

ขนาดของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุน สามารถคำนวณหาได้โดยวิธีของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) และสมการ Kelvin ซึ่งสมการ Kelvin นั้น จะใช้หาขนาดในช่วง 2-6.5 นาโนเมตร เมื่อมีการใช้สมการ Kelvin ในการศึกษาการดูดซับและคายซับไนโตรเจน โดยจะตั้งสมมติฐานให้รูปร่างของรูพรุนเป็นทรงกระบอก ที่ถูกเติมเต็มด้วยไนโตรเจนเหลว ซึ่งสมการเป็นดังนี้

$$\ln \frac{p_0}{P} = \frac{2\gamma V_l}{rRT}$$

เมื่อ	P_0	=	ความดันไออิ่มตัว
	P	=	ความดันที่สภาวะที่สมดุล
	V_l	=	ปริมาตรของของเหลว
	γ	=	ความเครียดของพื้นผิว

ถ้ารัศมีของรูพรุนน้อยกว่าค่า r จะถูกเติมเต็มด้วยความดันไอควบแน่น โดยปกติแล้วการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดการควบแน่นแบบแคปิลลารีในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการ kelvin จะไม่ให้ค่ารัศมีของรูพรุนที่ถูกต้อง เพราะขนาดของรูพรุนจะลดลงเนื่องจากความหนาของชั้นของสารดูดซับ ดังนั้นจึงต้องมีการคิดค่าการควบแน่นแคปิลลารีที่ความดันใดๆ จากสมการ

$$r_p = \frac{2\gamma V_l}{RT \ln p_0/p} + t$$

เมื่อ t = ความหนาของชั้นสารดูดซับ

ความหนาสามารถประมาณได้อย่างแม่นยำโดยสมการของ harkins – Jura ในช่วงความสัมพันธ์เท่ากับ 0.1-0.95

$$t\left(\frac{p}{p_0}\right) = 0.1 \left[\frac{60.65}{0.03071 - \log\left(\frac{p}{p_0}\right)} \right]^{-0.3968}$$

2.5.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) อินฟราเรดเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบและศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร รวมถึงการทำคุณภาพวิเคราะห์ อินฟราเรดนิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาฟังก์ชันนัลกรุปต่าง ๆ การทำปริมาณวิเคราะห์ นิยมใช้เทียบกับสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้ว สามารถวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน และหาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างว่ามีอะไรบ้าง โดยใช้ KBr ใช้การเตรียมตัวอย่าง โดยจะนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเพื่อลดผลกระทบจากการรบกวนที่เกิดจากความชื้นก่อนนำตัวอย่างไปวิเคราะห์

2.5.4 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว

วิเคราะห์โดยการไทเทรตกรด-เบส โดยใช้สารผสมของสารตัวกลางดูดซับเข้มข้น 2 กรัม/ลิตร จำนวน 20 มิลลิลิตร แปลงค่าปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่จะเติมลงไปในแต่ละสารผสมของสารตัวกลางดูดซับเพื่อแปลงค่าพีเอชให้ต่างกัน โดยมี 1 ตัวอย่างที่ไม่มีการเติมกรดหรือเบสลงไป แต่ละตัวอย่างจะถูกเจือจางด้วยน้ำดีไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 25 มิลลิลิตรจากนั้นจึงปรับค่า ionic Strength ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ แล้วนำตัวอย่างไปแช่ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ค่าประจุบนพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากพีเอชของตัวอย่างที่วัดได้หลังจากเข้าสู่ภาวะสมดุล

หลักการของการทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า จะต้องใช้ค่าค่าจากจุดทุกจุดที่ได้จากกราฟของการไทเทรต โดยผลรวมของประจุลบเท่ากับผลรวมของประจุบวก (Schulthens และ Spark , 1986) ดังสมการ

$$\text{ผลรวมของประจุบวก} = \text{ผลรวมของประจุลบ}$$

การไทเทรตจะควบคุมให้ค่าความแรงของประจุ (Ionic Strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุล จะทำการวัดพีเอชของสารละลายและเขียนเป็นกราฟระหว่างค่าพีเอชและประจุบนพื้นผิว ซึ่งได้จากการคำนวณดังสมการ

$$\text{Surface charge (C/g)} = \{ [\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}} - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-] \} \times 96500 / W$$

เมื่อ $[\text{HCl}]_{\text{add}}$ = ความเข้มข้นของ HCl ที่เติม (mol/L)
 $[\text{NaOH}]_{\text{add}}$ = ความเข้มข้นของ NaCl ที่เติม (mol/L)
 $[\text{H}^+]$ = ความเข้มข้นของโปรตอนไอออน (mol/L) คำนวณ

ได้จาก $\text{pOH} = -\log[\text{OH}^-]$ และ $\text{pOH} = 14 - \text{pH}$

96500 = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (C/mol)

W = น้ำหนักของสารตัวกลางดูดซับ (g/L)

2.6 ทฤษฎีการดูดซับ

2.6.1 หลักการของการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid -Solid Interface) ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่

เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และกาดูดซับทางเคมี

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical waal's force)

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) เป็นแรงที่เกิดจากอะตอมที่อยู่กันอย่างอิสระหรือโมเลกุลมีสภาพที่ไม่มีขั้วจะสามารถเกิดแรงดึงดูดแบบอ่อนๆ ของอะตอมหรือโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้เกิดกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน ส่งผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และทำให้สามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ แต่จะมีพลังงานในการดูดซับที่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้มีการคายซับได้ค่อนข้างง่าย (desorption) ซึ่งส่งผลให้ง่ายต่อการนำมาฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ของตัวดูดซับด้วยซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนหรือเป็นแรงที่ดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยอธิบายได้ดังนี้

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้ามกัน
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก ก็เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อน

ค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมลและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2) การดูดซับทางเคมี (chemical force)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

ปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เปียกของแข็งและของเหลว นั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate)

2.6.2 กลไกของการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การแพร่ภายนอก เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
- 2) การแพร่ภายใน เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

- 3) ปฏิกิริยาพื้นผิว เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมกเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละลายได้

การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

ขั้นตอนนี้เป็นการส่งมวลของสารที่ถูกดูดซับจากสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับ หรือที่ทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ มวลสารที่ถ่ายโอนเป็นไปตามสมการ

$$\frac{dq}{dt} = k_f S (c - c^*)$$

เมื่อ	q	= ปริมาณของสารดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
	T	= ระยะเวลา
	k_f	= mass transfer coefficient (external)
	S	= พื้นที่ผิวของสารดูดซับ
	C	= ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย
	C^*	= ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่บริเวณพื้นผิวหน้าของของแข็ง

การแพร่ภายใน (internal Diffusion)

คือการถ่ายโอนมวลสารจากมวลสารที่ถูกส่งถ่ายเข้ามาสู่บริเวณพื้นผิวรอบๆของสารดูดซับ เข้าสู่ภายในรูพรุนซึ่งมีพื้นผิวเป็นจำนวนมากสำหรับการดูดซับ

$$\frac{dq}{dt} = K_D A_v (q - q^*)$$

เมื่อ	q^*	= ปริมาณของสารดูดซับที่สมดุลกับ c^*
	A_v	= พื้นที่ผิวของสารดูดซับที่เกิดการส่งถ่ายมวลสารของสารที่ถูกดูดซับ

ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ
- 2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้น
- 3) การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่โมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้น
- 4) การดูดซับ (adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับ
- 5) ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

- 1) ขนาด และพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรง กับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

- 2) ลักษณะของสารถูกดูดซับ

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกดูดซับอย่างหนึ่งก็คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจาก

ในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3) ความปั่นป่วน (turbulent)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งของโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วน ให้ความหนาของฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4) เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูงสุดทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

5) ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายนั้น เป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจน และไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวไอออน และการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

2.6.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetic)

1) The Pseudo – first order Model

สมการจลนพลศาสตร์ของการดูดซับอย่างง่าย คือ สมการ Pseudo – first order แสดงดังสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

และเมื่อ $q_t = 0$ ที่เวลา $t=0$ และ $q_t = q_e$ ที่เวลา $t = t$ จะได้ว่า

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ Lagergren (h^{-1})
 q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)
 q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่เวลา t (mg/g)

2) The Pseudo – second – order Model

ค่าจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo – second – order ใช้อธิบายการดูดซับแบบเคมีที่มีการใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตัวกลางดูดซับและมลสารที่ถูกดูดซับ อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ Pseudo – second – order อาจขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ และปริมาณของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล สมการของจลนพลศาสตร์แบบ Pseudo – second – order คือ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t)^2$$

เมื่อให้ เป็นค่าคงที่ของ จลนพลศาสตร์แบบ Pseudo – second – order และเมื่อกำหนด $t = 0$ ถึง t และ $q_t = 0$ ถึง q_t สามารถจัดรูปสมการข้างต้นได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{2k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}$$

ข้อได้เปรียบของโมเดลนี้คือ มีจำเป็นต้องรู้ความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุล นอกจากนี้ อัตราการดูดซับเริ่มต้นสามารถบอกได้จากสมการต่อไปนี้

$$h = k_2 q_e^2$$

เมื่อ $h =$ อัตราการดูดซับเริ่มต้น ($\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{min})$)

2.6.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดซับของสารดูดซับมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จุดนี้เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ ณ จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของทั้งระบบ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของทั้งระบบ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับหรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็สารที่ถูกดูดซับ สารดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดซับที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น การแสดงถึงปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ณ จุดสมดุล เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายรูปแบบ รูปร่างของไอโซเทอมของการดูดซับนั้นจะบอกถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น และบ่งบอกลักษณะการดูดซับของพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ในขณะที่เกิดการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับได้จากเขียนกราฟระหว่างความสามารถในการดูดซับในสภาวะสมดุล (q) กับ ความเข้มข้นสุดท้ายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C_e) ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) คำนวณได้จากสมการ

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

เมื่อ	C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)
	C_e	=	ความเข้มข้นที่เหลือที่จุดสมดุล (mg/l)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (l)
	M	=	ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ (g)

ไอโซเทอมที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดซับ มีอยู่ 2 แบบ คือ

1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

การดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นพื้นฐานของการดูดซับแบบอื่นๆ ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานว่า

1. โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
 2. มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
 3. พื้นที่ของบริเวณที่เกิดการดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
 4. พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ
- ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงได้ดังสมการ

$$q = \frac{(q_m kC)}{(1 + kC)}$$

- เมื่อ q = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
- q_m = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)
- C = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)
- K = ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อ q เข้าสู่ q_m และ c เข้าใกล้อนันต์ จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{kq_m} + \frac{C}{q_m}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/q กับ C จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $1/q_m$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/kq_m$ เมื่อหารด้วย C จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{C} \frac{1}{kq_m}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $1/kq_m$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/q_m$

2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิชเป็นไอโซเทอมที่ได้รับความนิยมอย่างมาก มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อนำมาอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับ มีสมการดังนี้

$$q_e = \frac{X}{m} = KC^n$$

เมื่อ x = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม)

M = น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)

K และ $1/n$ = ค่าคงที่ของการดูดซับ

จาก
$$\frac{X}{m} = KC^n$$

$$\log \frac{X}{m} = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/m)$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log K$ ของ $\log (X/m)$ ที่ $\log C = 0$ ($C=1$) จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช จะแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี แต่หากค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 จะแสดงถึงการดูดซับที่ดี และหากเส้นกราฟมีความชันมากแสดงว่าสารดูดซับนั้นสามารถเกิดการดูดซับได้ดีความเข้มข้นสูงๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 การสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กขนาดโนนา

Xiaoshu และคณะ (2014) อนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nZVI) ร่วมกับแม่เหล็ก Fe_3O_4 / กราฟีน (nZVI @ mg) nanocomposites ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสาร Cr (VI) ในรูปสารละลาย โดยอนุภาค nZVI แสดงออกอย่างชัดเจนทั้งในหมู่อนุภาคนาโน Fe_3O_4 (Fe_3O_4 NPS) หรือสูงกว่าฐานของ

กราฟีน วัสดุนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ Cr (VI) การกำจัดของ 83.8% สูงกว่าอย่างชัดเจน (18.0% สำหรับ nZVI 21.6% สำหรับ Fe₃O₄ NPS และ 23.7% สำหรับกราฟีน) และผลรวมทั้งหมดเท่ากับ 63.3% กระบวนการกำจัดเป็นแบบ pseudo-second-order เพื่อชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเป็นขั้นตอนการควบคุมอัตรา (vi) ความจุสูงสุด Cr ดูดซับแตกต่างกันไป 66.2-101.0 มก.ต่อกรัมที่มีการลดค่า pH 8.0-3.0 ที่ 30 ° C ΔG เชิงลบและ ΔH บ่งชี้ถึงแนวโน้มที่เกิดขึ้นเองและธรรมชาติคายความร้อน ผลการดำเนินงานที่แข็งแกร่งของ nZVI @ MG เกิดจากการก่อกำเนิดของไมโคร nZVI-graphene / แบตเตอรี่ nZVI-Fe₃O₄ และความสามารถในการดูดซับแรงของแผ่นกราฟีน / พื้นผิว Fe₃O₄ กว้าง อิเล็กตรอนออกโดย nZVI กระจายไปทั่วพื้นผิวของแกรไฟีนและ Fe₃O₄ และดูดซับโครเมียม (VI) ไอออนที่พวกเขาจับอิเล็กตรอนละลายเหล่านี้และการลด Cr (III) Fe₃O₄ ยังทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันเพื่อป้องกันไม่ให้ nZVI จากการรวมตัวกันอีกด้วย

2.7.2 การใช้ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กโนนาดูดซับมลสารต่างๆ

Xiao และคณะ (2014) ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กนาโน เพื่อนำไปกำจัดสารไตรฮาโลมีเทนในกระบวนการการผลิตน้ำดื่ม โดยใช้สารสารเคมีในการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับ คือ ไอรอนซัลเฟตและสารละลายเอทานอล ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารไตรฮาโลมีเทน พบว่า จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ร้อยละ 70 ภายใน 30 นาทีของการเริ่มต้นการทดลอง โดยมี อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดคือ โบรโมฟอร์ม ไดโบรโมคลอโรมีเทน โบรโมไดคลอโรมีเทน และ คลอโรฟอร์ม ตามลำดับ ยังพบว่าเกิดการสลายตัวของกลุ่มสารไตรฮาโลมีเทนแต่ละชนิดมีความเข้มข้นเริ่มต้นของไตรฮาโลมีเทน , คลอโรฟอร์ม , โบรโมไดคลอโรมีเทน , ไดโบรโมคลอโรมีเทน และโบรโมฟอร์ม เท่ากับ 142.01 μ g/l , 42.19 μ g/l , 43.93 μ g/l , 45.71 μ g/l , 10.18 μ g/l ตามลำดับ ใช้ NZVI/AC 1.8 g/l พิเศษเท่ากับ 7.54 ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (reaction time) เท่ากับ 600 นาที โดยระยะเวลาสัมผัสที่ให้ประสิทธิภาพในการสลายสูงสุดของแต่ละสาร อยู่ประมาณ ร้อยละ 95 ณ 600 นาที

Xiao และคณะ (2015) ทำการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ชนิดเคลือบด้วยอนุภาคเหล็กนาโน เพื่อนำไปกำจัดสารอะคริโลไนไตรล์ในสารละลายของเหลว ซึ่งคล้ายกับ Chen และคณะ (2016) พบว่าผลการศึกษา ถ่านกัมมันต์ร่วมด้วยอนุภาคเหล็กศูนย์ขนาดนาโน สามารถกำจัดสารอะคริโลไน

ไตรฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง และจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพ (SEM,TEM) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคโลหะศูนย์บนถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด มีความกระจายตัวของอนุภาคอย่างครอบคลุม และยังพบว่าอนุภาคโลหะนาโนสามารถที่จะย่อยสลายทางชีวภาพของสารกลุ่มอะคริโลไนไตรล์ได้ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด เท่ากับร้อยละ 30 ที่ 480 นาที และคงที่ที่ ร้อยละ 65 ที่ 3000 นาที

Zhu และคณะ (2009) ใช้ถ่านกัมมันต์รวมด้วยอนุภาคเหล็กขนาดนาโน เพื่อนำไปกำจัดสารหนู (arsenic) ในน้ำ ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดประสิทธิภาพในการกำจัดของ arsenite สูงกว่า arsenate ที่พีเอชมากกว่า 5 ขณะที่ความสามารถในการดูดซับของ arsenite และ arsenate ที่ pH 6.5 เท่ากับ 18.2 และ 12.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่นๆที่นำมาดูดซับสารหนู

2.7.3 การเกิดฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์ในระบบการผลิตน้ำดื่ม

Smith และ คณะ (1989) ฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์เป็นสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม เกิดจากในน้ำดิบมีสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารฆ่าเชื้อโรคเช่น คลอรีน คลอรามิน หรือโบรมีน จากการศึกษาสารในกลุ่มฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์ที่พบมากหลังจากกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนคือ ไดคลอโรอะซีโตนไตรคลอไรด์ โดยมีการรายงานปริมาณไดคลอโรอะซีโตนไตรคลอไรด์ในตัวอย่างน้ำดื่มเช่น ในรัฐ South Florida ประเทศสหรัฐอเมริกา พบปริมาณไดคลอโรอะซีโตนไตรคลอไรด์ในน้ำดื่ม 42 ไมโครกรัมต่อลิตร และประเทศแคนาดา พบไดคลอโรอะซีโตนไตรคลอไรด์ในน้ำดื่ม 10 ไมโครกรัมต่อลิตร

2.7.4 การกำจัดฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์

Uyak และคณะ (2007) ศึกษาการกำจัดสารตั้งต้นของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้ด้วยการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powered activated carbon,PAC) โดยการตกตะกอนทางเคมีด้วยเพอร์ริคคลอไรด์ ซึ่งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติโมเลกุลขนาดใหญ่และที่มีประจุเป็นลบได้ดี และตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผงสามารถดูดซับสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีประจุได้

Wang และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้โอโซนก่อนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค โดยน้ำที่ใช่จากทะเลสาบ Tai พบว่าช่วยลดการเกิดของกรดไตรฮาโลอะซีติก (Trihaloacetic acid) , ไดฮาโลอะซีโตนไตรคลอไรด์ (Dihalooacetoneitiles) และ ไตรฮาโลมีเทน

(Trihalomethanes) แต่จะเพิ่มการเกิดฮาโลไนโตรมีเทน (Halonitromethanes) และ ฮาโลคีโตน (Haloketone)

Chellem และคณะ (2008) ใช้นาโนฟิวเทชั่นในการบำบัดน้ำขั้นต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำดื่มโดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ และลดสารที่ก่อให้เกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำด้วย โดยจัดว่าเป็นกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนเป็นอีกกระบวนการที่สามารถใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม โดยกระบวนการนี้ยังสามารถกำจัดความขุ่น สารอินทรีย์ และจุลชีพได้อีกด้วย แต่น้ำดิบที่นำมากำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาตินั้นที่ความแตกต่างของสารอินทรีย์ธรรมชาติจึงทำให้เกิดความหลากหลายในการเลือกใช้นวัตกรรมของเมมเบรน เช่น อัลตราฟิวเทชั่น (Ultrafiltration) และ นาโนฟิวเทชั่น (Nanofiltration)

Corin และ คณะ (1996) ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติที่มีอยู่ในน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยสารเคมี ซึ่งเป็นการลดสารตั้งต้นของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ โดยมีการประยุกต์ใช้แสงอาทิตย์เพื่อทำการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติเรียกว่ากระบวนการโฟโตไลซิสด้วยแสงอาทิตย์ (Solar photolysis) และแสงอัลตราไวโอเล็ต ในการกำจัดหรือสลายมลพิษในน้ำ พบว่าปริมาณของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ใช้ UV dose จะต้องมีปริมาณเพียงพอกับการดูดซับของกรดฟลูอิก และกรดฮิวมิก พบว่าสามารถสลายสารอินทรีย์คาร์บอนละลายน้ำได้ดีที่การดูดกลืนแสง 254 นาโนเมตร โดยองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่สามารถสลายได้ดีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น Aldehydes และ Carboxylic acids

Thanyalak และ คณะ (2016) water research ศึกษาการกำจัด HANs โดยวิธีการย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation) โดยใช้วิธี vacuum ultraviolet (VUV, 185 + 254 nm) เปรียบเทียบกับวิธีการ ultraviolet ธรรมดา (UV, 254 nm) ในการตรวจสอบ โมโนคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Monochloroacetonitrile :MCAN) , ไดคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Dichloroacetonitrile:DCAN) , ไตรคลอโรแอซิโตไนไตรล์ (Trichloroacetonitrile:TCAN) , ไดโบรโมแอซิโตไนไตรล์ (Dibromoacetonitrile:DBAN) ซึ่งเป็นชนิดของสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (HANs) จากการศึกษาพบว่า ผลการกวาดล้างก๊าซและการตัวกลางภายใต้ VUV ถูกตรวจสอบ พบว่าเป็นอัตราค่าคงที่แบบ pseudo first order โดยความเข้มข้นที่ลดลงของสาร HANs ภายใต้ VUV ต่ำกว่า รังสียูวี 2-7 ครั้งของการทดลอง ประสิทธิภาพการย่อยสลายภายใต้ VUV และรังสียูวีเป็น MCAN <DCAN <TCAN

<DBAN ประสิทธิภาพการย่อยสลายของสาร HANs ภายใต้ VUV สูงกว่าของสาร HANs ผสมบอก ผลกระทบการแข่งขันในหมู่ของสาร HANs ภายใต้การกวาดล้างไนโตรเจนค่าคงที่อัตราการกำจัดของ สาร HANs ผสมสูงกว่าที่ของสภาพมวลเบาโดย 34.4, 34.9, 10.1 และ 3.8 เท่าสำหรับ MCAN, DCAN, TCAN และ DBAN ตามลำดับ กลไกการย่อยสลายที่สำคัญสำหรับสาร HANs ที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร HANs แต่ละชนิด ตัวกลางการย่อยสลายของสาร HANs เช่น 2-chloropropionitrile, 2,2-dimethylpropanenitrile และ fumaronitrile นอกจากนี้ยังมีจำนวนที่ ลดลงของอะตอมคลอรีนรวมทั้ง MCAN และ DCAN ถูกพบเป็นตัวกลางของ DCAN และ TCAN การ ย่อยสลายตามลำดับ

2.7.5 การดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs)

Prarat และคณะ (2011) ศึกษาการดูดซับสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์จากน้ำ โดยใช้ วัสดุ มีรูพรุนอินทรีย์ที่ดัดแปร ชนิดเมโซพอร์สซิลิเกต (HMS) ที่ถูกดัดด้วยหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ หมู่อะมิโน หมู่เมอร์แคปโต และหมู่อัลคิล เพื่อศึกษาผลของการดัดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ต่อ ประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) นอกจากนี้ HMS ถูกดัดแปรโดยแทนที่ด้วยโลหะไททาเนียมในโครงสร้างเมโซพอร์สซิลิเกตเพื่อศึกษา ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างรูพรุนกับประสิทธิภาพการดูดซับเปรียบเทียบกับเมโซพอร์สซิลิเกต ชนิด SBA-15 และซีโอไลต์ NaY จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างรูพรุนที่แตกต่างกันและชนิดของ หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่ติดบนพื้นผิวมีอิทธิพลต่ออัตราเร็ว และประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งหมู่เมอร์ แคปโตบน HMS (M-HMS) มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชนิด อื่น และมีประสิทธิภาพการดูดซับสาร HANs ได้เทียบเท่า PAC โครงสร้างของสาร HANs ที่แตกต่าง กันส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของ M-HMS ในขณะที่ไม่พบ สมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของ PAC นอกจากนี้ผลกระทบของอิเล็กโตรไลต์ที่มีอยู่ในน้ำประปาต่อ การดูดซับสาร HANs และการมีอยู่ร่วมกันของสารไตรฮาโลมีเทน (THMs) และสารฮาโลแอซิติค แอ ซิติค (HAAs) ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของ HANs บนตัวกลางทั้งสองชนิด กลไกการดูดซับสาร HANs คาดว่ามีความซับซ้อนซึ่งเกิดจากแรงทางประจุไฟฟ้าระหว่างไอออนและ คู่ขั้วรวมถึงการดูดซับทางเคมีและผลจากการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับพบว่าเกิดการดูดซับแบบ ไม่ผันกลับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้เมโซพอร์สซิลิเกตชนิด SBA-CHX ถูกดัดแปรพื้นผิวโดย

การดูดซับสารลดแรงตึงผิวแบบสองหัวที่สามารถเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรซ์ได้ (PG-SBA-CHX) เพื่อศึกษาอิทธิพลของกระบวนการแอคโซลูบิไลเซชันต่อประสิทธิภาพการดูดซับสาร HANs จากการศึกษาพบว่า PG-SBA-CHX มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่มีการดัดแปรพื้นผิวโดยเฉพาะอย่างยิ่ง HANs ชนิดไม่ชอบน้ำ อย่างไรก็ตามการดูดซับสารที่มีความชอบน้ำ ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า ซึ่งบ่งว่ากระบวนการแอคโซลูบิไลเซชันมีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับสาร HANs ซึ่งสัมพันธ์กับความชอบน้ำ / ไม่ชอบน้ำของตัวดูดซับ

2.7.6 การฟื้นฟูประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในกรณีสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (HANs)

Prarat และคณะ (2011) ทำการศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับชนิด HMS , M-HMS และ PAC โดยการใส่สารละลายสกัดชนิด acetone , Methanol , Ethanol และ MtBE และปรับค่าพีเอชในช่วง 5-9 โดย ฟอสเฟต บัฟเฟอร์ ทำการควบคุม ion strength ที่ 10 มิลลิโมลาร์ , 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ ที่ความเข้มข้น 5 – 80 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยนำไปตรวจสอบหุ้ฟังก์ชันของตัวดูดซับ โดยการศึกษาพันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน (C=N) พบว่าตัวกลางดูดซับชนิด PAC สามารถให้การดูดซับกลับคืนมาได้เพียงตัวเดียว ขณะที่ HMS , M-HMS ไม่สามารถกลับมาดูดซับสารได้อีก

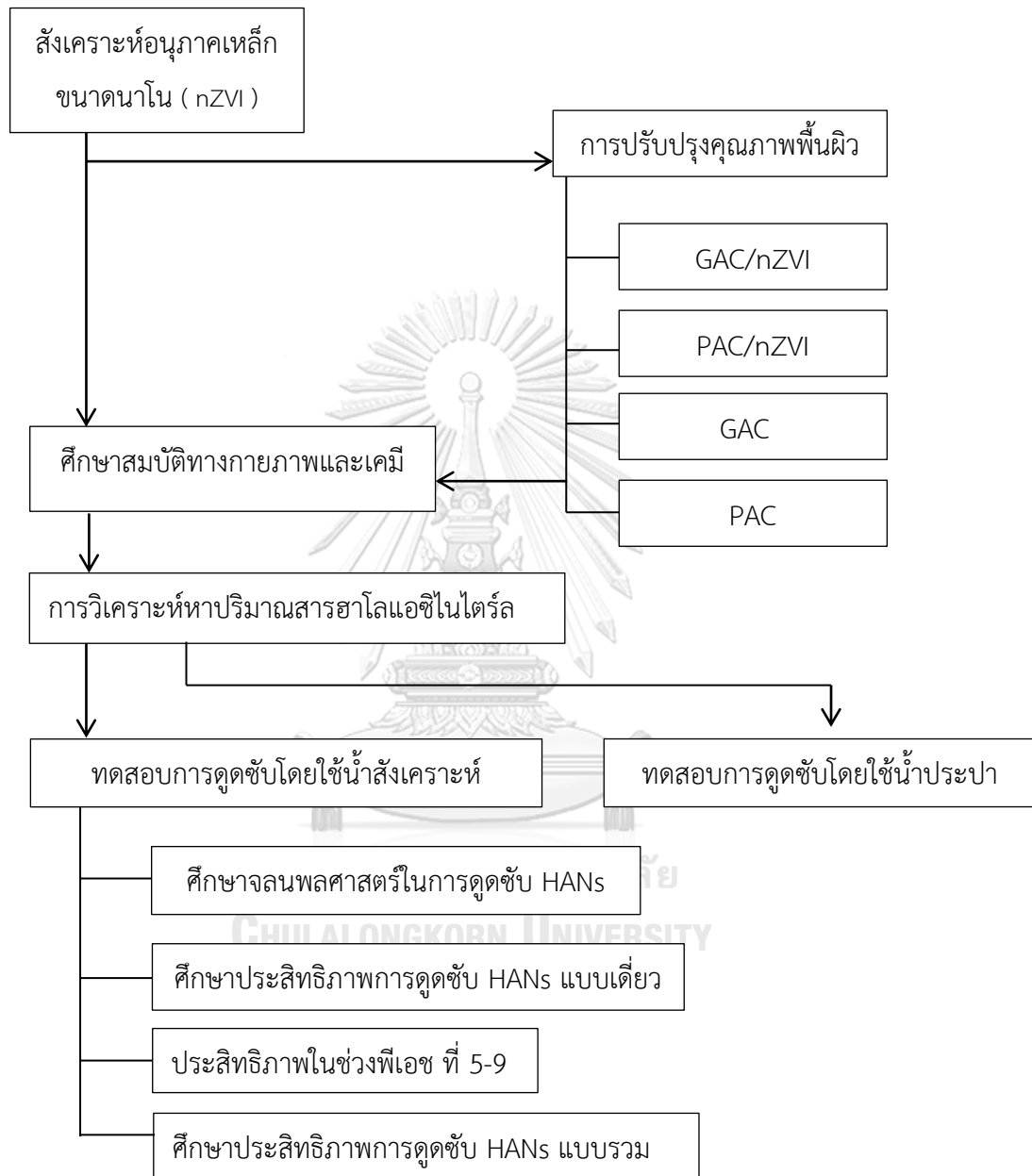
2.7.7 การเกิดปฏิกิริยาและอายุการใช้งานของอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (NZVI)

Yueqiang Liu (2006) ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาและอายุการใช้งานของอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nZVI) ต่อสารอินทรีย์ระเหยที่มีน้ำมันหนัก (DNAPL) ได้รวดเร็ว ในการบำบัดในพื้นที่ปนเปื้อน (in situ remediation) ในน้ำใต้ดิน โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเป็นสองแบบ ได้แก่ ไอออน 2^+ จากการทำปฏิกิริยารีดักชันของโซเดียมโบรโมไฮเดรต (NaBH_4) และ จากการทำปฏิกิริยารีดักชัน Fe-(oxy)hydroxides (RNIP) พบว่า nZVI มีความสามารถในการลดความเข้มข้นของสาร TCE โดยการใช้ แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวกระตุ้น ขณะที่สาร RNIP ยังคงมีปฏิกิริยาเป็นเวลาหลายเดือน ที่ pH 8.9 ในขณะที่ nZVI ถูก ออกซิไดซ์ อย่างเต็มที่ ในเวลาน้อยกว่า สองสัปดาห์ และการใช้อนุภาคเหล็กขนาดนาโนมีความเหมาะสมมากกว่าการบำบัดแบบ plume เนื่องจากจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงมากเมื่อมีสาร TCE ที่มีความเข้มข้นสูง และยังพบว่าอายุการใช้งาน ของ NZVI ในการกำจัดสาร DNAPL จะมีประสิทธิภาพสูงที่ไม่เกิน 1-2 สัปดาห์เท่านั้น

2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการสลายสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ส่งผลต่อการเกิดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ แต่ก็ยังพบการเกิดของสารผลิตภัณฑ์พลอยได้อีก ประกอบกับเทคนิคการกำจัดสารผลิตภัณฑ์พลอยได้ในกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์ยังมีงานวิจัยอยู่น้อย และประสิทธิภาพในการบำบัดยังไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำประปาที่ตรวจวัดได้นั้น มีค่าของสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ที่เกินค่ามาตรฐานอยู่ในบางจุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้เทคนิคการดูดซับด้วยตัวกลางชนิดถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติตร่วมด้วยอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nano zero valent iron , n-ZVI) ซึ่งเป็นตัวรีดิวซ์ ทำให้เกิดการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์กลุ่มฮาโลเจน (halogenated organic compound) โดยวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฮาโลอะซิโตไนไตรล์ ทั้ง 5 ชนิด โมโนคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (MCAN) , โมโนโบรมอะซิโตไนไตรล์ (MBAN) , ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (DCAN) , ไตรโบรมอะซิโตไนไตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (TCAN) ในน้ำประปาเพื่อลดอัตราการเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งและโรคอื่นๆ ที่เกิดจากการใช้น้ำที่มีสารตกค้างต่างจากการฆ่าเชื้อโรค

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.1 แผนการทดลองในการศึกษาวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

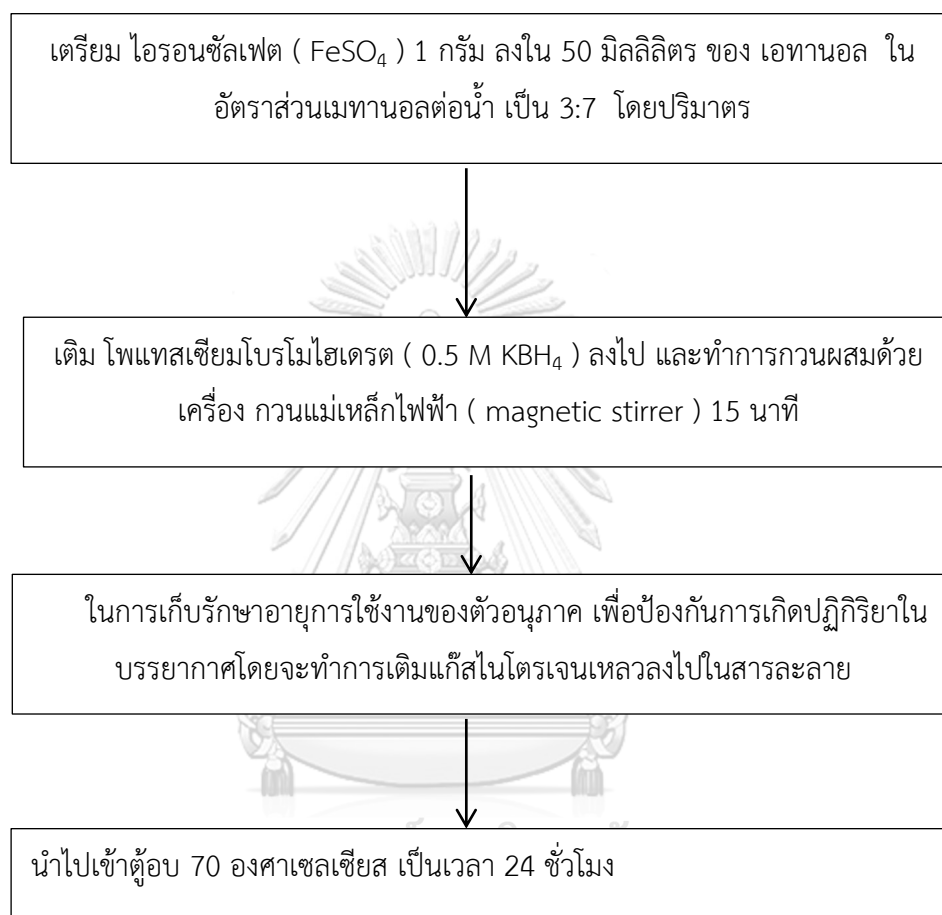
1. เครื่อง X-ray diffraction Spectrometer (XRD)
2. เครื่อง Fourier Transform Spectrometer , FT-IR (Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopr Nicolet Impact 410)
3. เครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer (Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04 H) (BET)
4. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
5. เครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX,EDS)
6. เครื่อง Gas Chromatograph,GC/ECD (Agilent GC6890)
7. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
8. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องเขย่า (Labcon)
10. เครื่องวัดพีเอช (Sartorius PB-10)
11. ตู้อบ
12. เต้าเผา
13. ตู้ดูดควัน
14. กระดาษกรอง GF/C
15. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
16. ชุดสกัดแบบซอกซ์เลต
17. เม็ดแก้ว
18. กรวยแยกสารสกัด
19. ไมโครปิเปต
20. Heating Block
21. Microsyringe

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด เกรดการค้า
2. น้ำประปา
3. โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (NaBH_4)
4. โพลีเอทิลีน ไกลคอล (polyethylenr glycol : PEG)
5. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง เกรดการค้า
6. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)
7. น้ำกลั่น (Distilled water)
8. น้ำดีไอออนไนซ์ (Deionized water)
10. สารละลายไอร์รอนซัลเฟต (FeSO_4)
11. โพแทสเซียมโบโรไฮไดรด์ (KBH_4)
12. กรดไฮโดรคลอริก 5% (HCl)
13. โมโนคลอโรอะซิโตนไตร์ล (MCAN)
14. โมโนโบรโมอะซิโตนไตร์ล (MBAN)
15. ไดคลอโรอะซิโตนไตร์ล (DCAN)
16. ไดโบรโมอะซิโตนไตร์ล (DBAN)
17. ไตรคลอโรอะซิโตนไตร์ล (TCAN)
18. แก๊สไนโตรเจนเหลว (N_2)
19. กรดไนตริก (Nitric acid : HNO_3)
20. ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2)
21. กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF)
22. Anhydrous sodium sulfate (Na_2SO_4)
23. Methyl tert-butyl ether (MtBE)

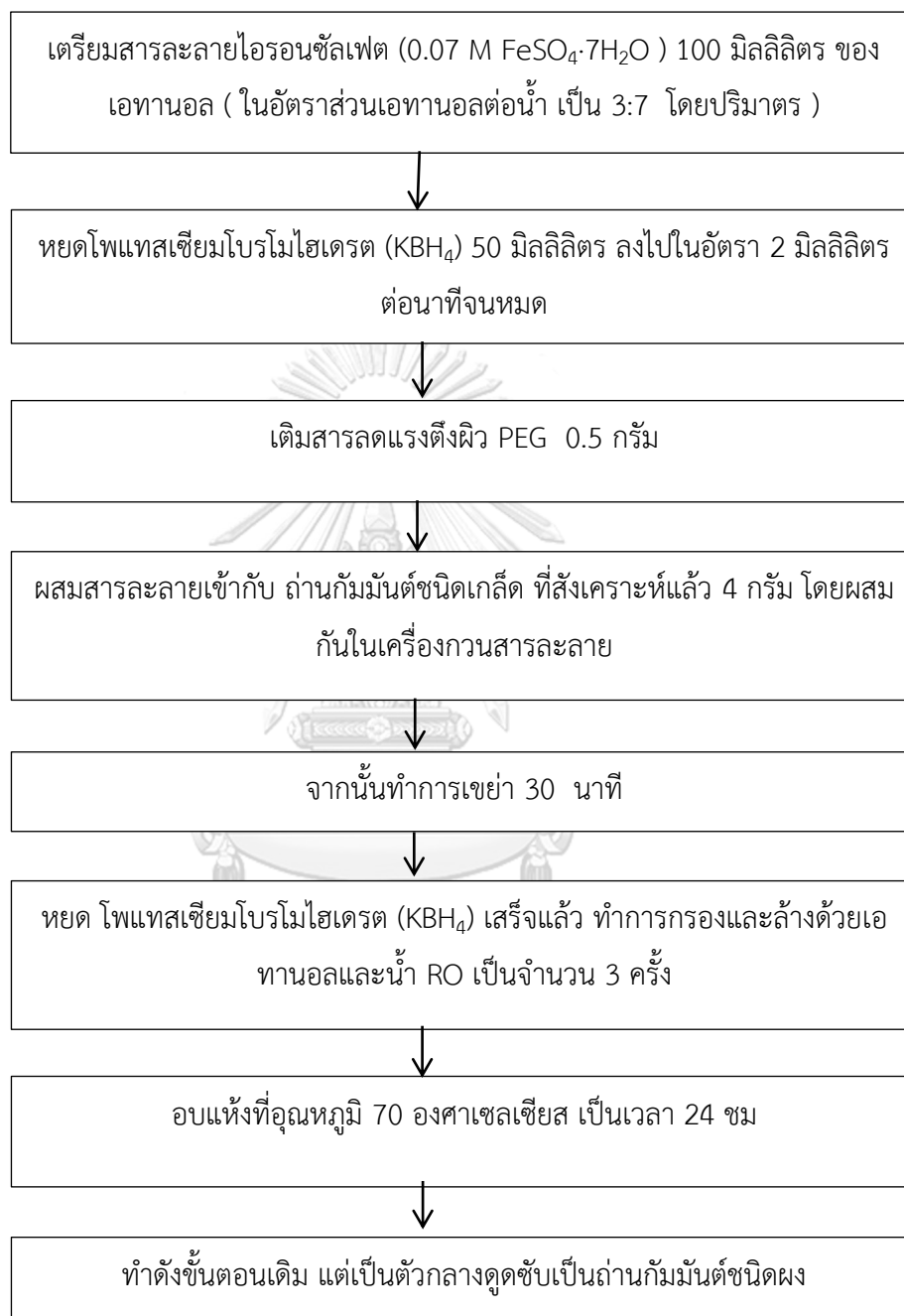
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การสังเคราะห์อนุภาคเหล็กนาโน (NZVI)



ภาพที่ 3.2 แสดงการการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กนาโน (NZVI) (Xiao และคณะ,2014)

3.2.2 การปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (activated carbon/NZVI)

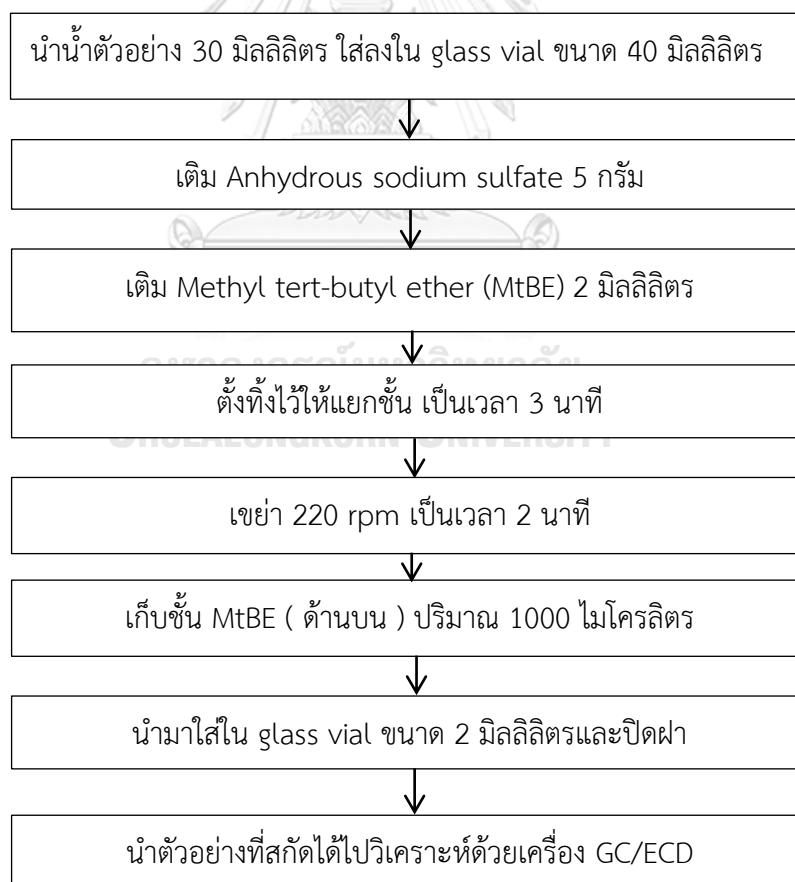


ภาพที่ 3.3 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวของตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ต่อติดอนุภาคเหล็กนาโน (Xiao และคณะ ,2014)

3.2.3 การสกัดแบบ liquid-liquid extraction (LLE)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลเอซีไนด์ในไตรลประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการสกัดและเตรียมตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.4 และวิเคราะห์หาปริมาณสารฮาโลเอซีไนด์ในไตรลด้วยเครื่อง Gas Chromatograph , GC/ECD (Agilent GC6890) จะใช้ความเร็วของฮีเลียม (Helium-carrier) ประมาณ 25 เซนติเมตรต่อวินาที และใช้ในโตรเจนในการ make-up เลือกใช้คอลัมน์สำหรับการวิเคราะห์ด้วย GC/ECD เป็น fused silica capillary column (HP-1,30 m x 0.32 mm i.d x 0.25 um film thickness) โดยตั้งอุณหภูมิในการฉีด (injection) ที่ 200 องศาเซลเซียส ระบบการฉีดสารตัวอย่างเป็นแบบ split mode และคงไว้ที่ 300 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิของคอลัมน์ภายในตู้จะตั้งโปรแกรมดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 33 องศาเซลเซียส นาน 5.5 นาที
2. เพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 35 องศาเซลเซียส โดยที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 0.5 องศาเซลเซียส ต่อ นาที จบโปรแกรม เตรียมกราฟมาตรฐานฮาโลเอซีไนด์ของทุกชนิด เพื่อให้นำมาวิเคราะห์ปริมาณที่สลายได้ต่อไป



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการสกัดและเตรียมตัวอย่างสารกลุ่มฮาโลเอซีไนด์ (U.S EPA method 551.1

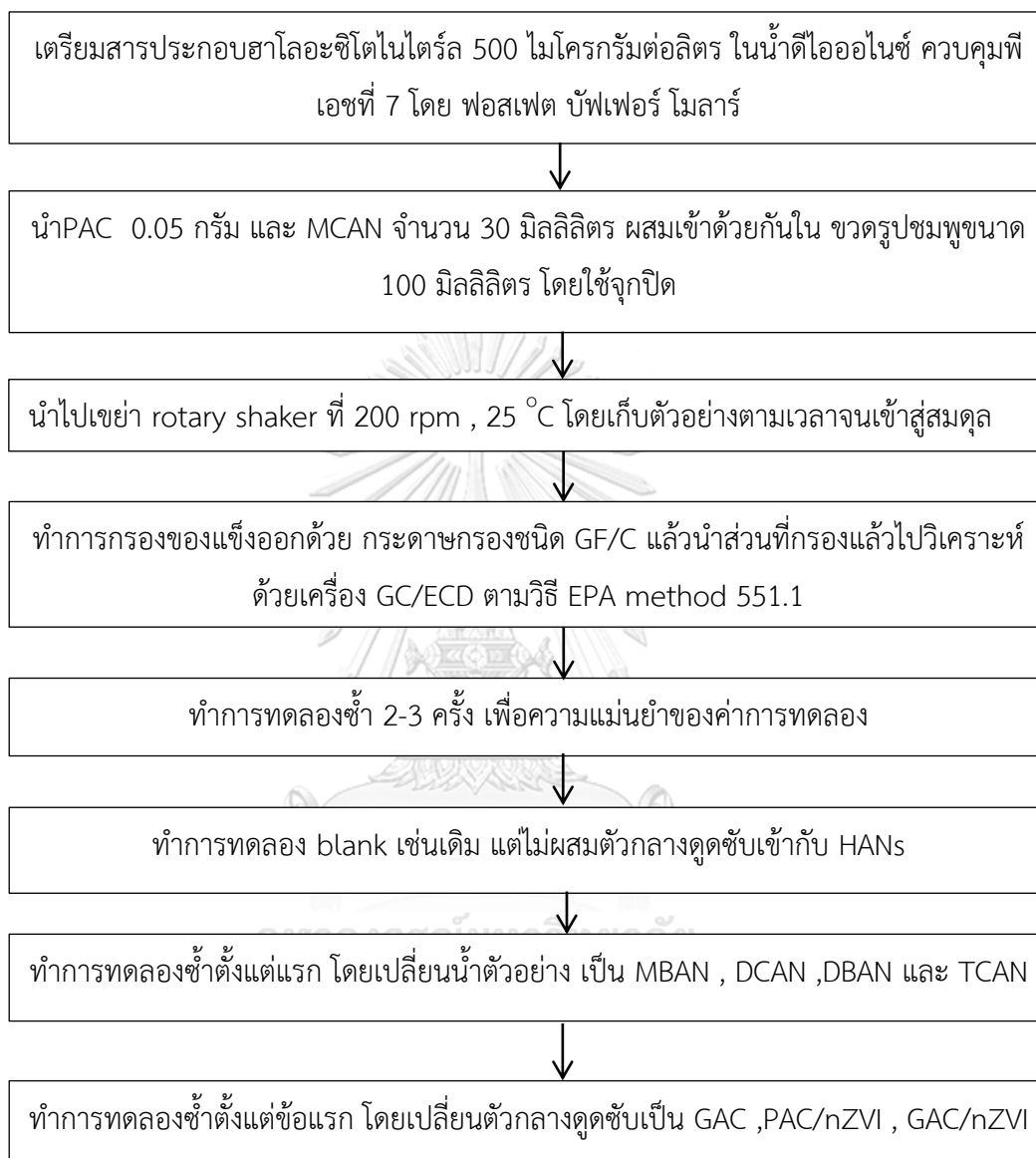
3.2.4 การวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

ตารางที่ 3-1 เครื่องมือและสถานที่ตรวจวัดคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับ

ลักษณะเทคนิค (เครื่องมือ)	วัตถุประสงค์ในการวัด	สถานที่ตรวจวัด
Atomic absorption spectrophotometer, (AAS)	ปริมาณของอนุภาคเหล็ก ขนาดนาโนและปริมาณที่หลุดออกมาหลังการกำจัดสาร HANs ในน้ำ	ตึกปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Gas Chromatograph, (GC/ECD)	ปริมาณความเข้มข้นสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs)	ตึกปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
X-ray diffraction (XRD)	โครงสร้างผลึก	ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Brunauer-Emmett-teller (BET)	พื้นที่ผิว , ขนาดรูพรุน , ปริมาตรรูพรุน	ศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)	หมู่ฟังก์ชัน และหาสารที่มาปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่าง	ศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Scanning electron microscope (SEM)	ลักษณะของอนุภาคและสัณฐานวิทยา	ศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Energy dispersive x-ray spectrometer (EDX,EDS)	เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ	ศูนย์เครื่องมือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Acid-base titration	ประจุบนพื้นผิว	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.5 การศึกษาการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs)

- 1) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด



ภาพที่ 3.5 แสดงการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวกลางดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับที่เวลาใดๆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{M} V$$

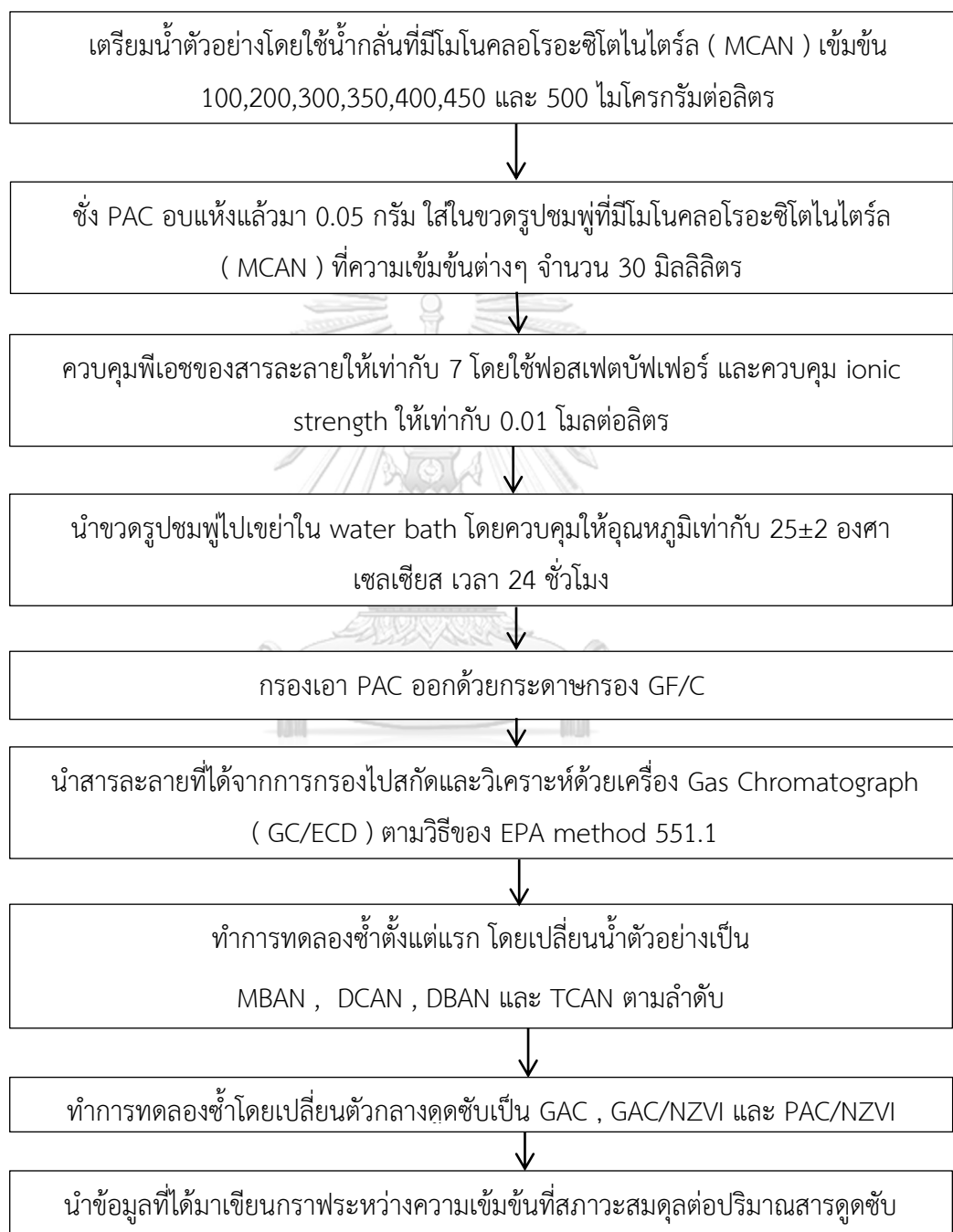
q_t	=	ความสามารถในการดูดซับ ($\mu\text{g g}^{-1}$)
C_0 และ C_t	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใดๆ ($\mu\text{g L}^{-1}$)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (L)
M	=	น้ำหนักของตัวกลางดูดซับ (g)

ตารางที่ 3-2 ตัวแปรในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของฮาโลอะซีไนด์ไนไตรล์บนพื้นผิวของสารตัวกลางดูดซับ

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
เวลา	0,1,3,7,30,60 นาทีจากนั้นเก็บตัวอย่างทุกๆ 2 ชั่วโมง
ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ ชนิดของฮาโออะซีไนด์ไนไตรล์	GAC , GAC/NZVI , PAC/NZVI และ PAC MCAN , MBAN , DCAN , DBAN และ TCAN
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของฮาโลอะซีไนด์ไนไตรล์ที่เหลืออยู่	วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟสบัฟเฟอร์
ค่า ionic strength	0.01 โมลต่อลิตร
อุณหภูมิ	25 ± 2 องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวกลางดูดซับ/น้ำเสียสังเคราะห์	0.05 กรัม/ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
ความเข้มข้นเริ่มต้น	500 ไมโครกรัมต่อลิตร
น้ำตัวอย่าง	น้ำกลั่น

2) การศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนร์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพและตารางด้านล่าง



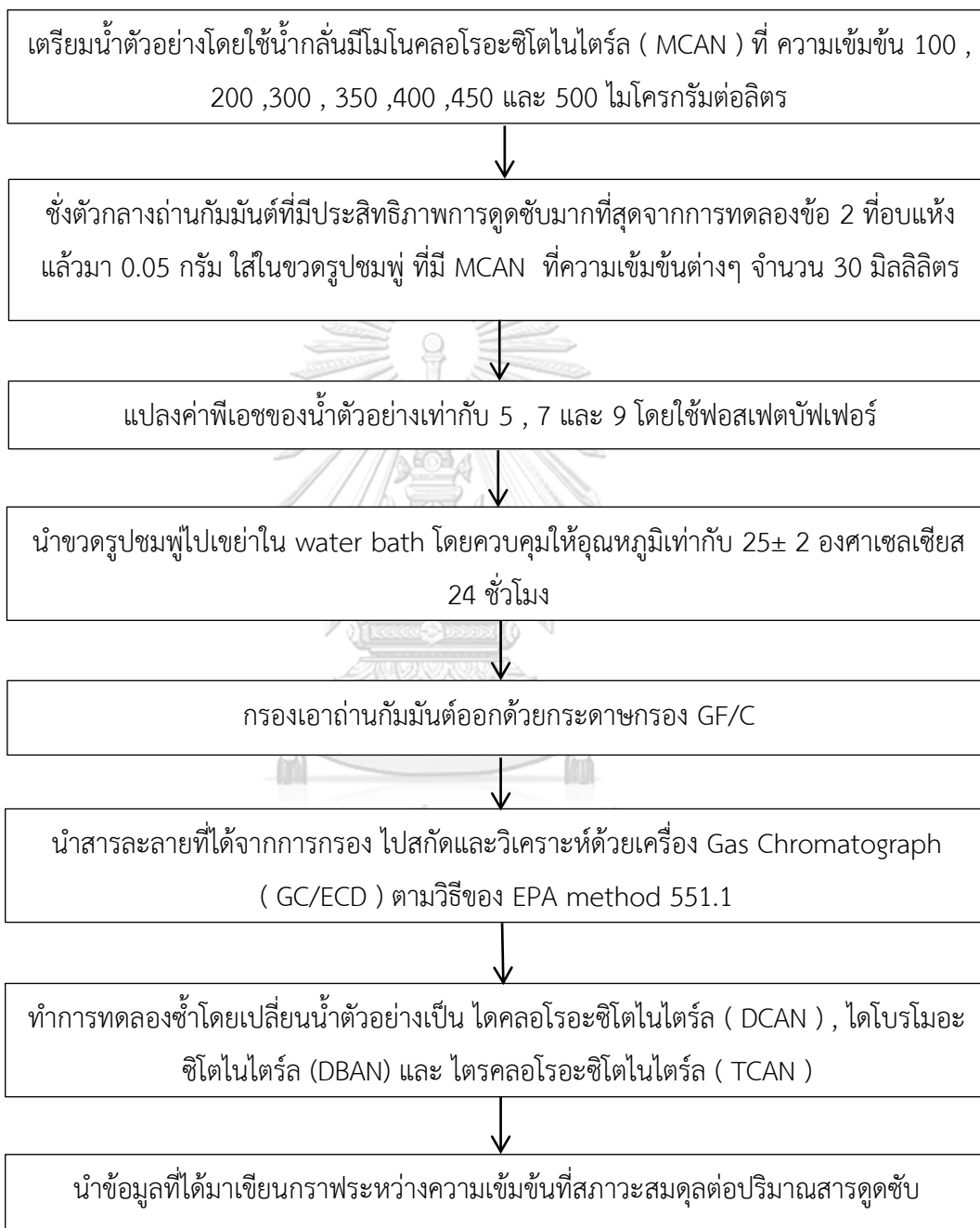
ภาพที่ 3.6 แสดงการทดลองเพื่อศึกษาข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับของตัวกลางดูดซับ

ตารางที่ 3-3 ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ในน้ำกลั่น

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์	100,200,300 ,350 ,400 ,450 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร
ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ	GAC , GAC/NZVI , PAC และ PAC/NZVI
ชนิดของฮาโลอะซีโตไนไตรล์	MCAN , MBAN , DCAN , DBAN และ TCAN
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ที่เหลืออยู่	วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
พีเอช	พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์
ค่า ionic strength	ค่าตามที่วัดได้จริงในน้ำ
อุณหภูมิ	25± 2 องศาเซลเซียส
ปริมาณตัวกลางดูดซับ	0.05 กรัม
ตัวอย่าง	น้ำกลั่น

3.2.7 การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

การศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์บนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพและตารางด้านล่าง



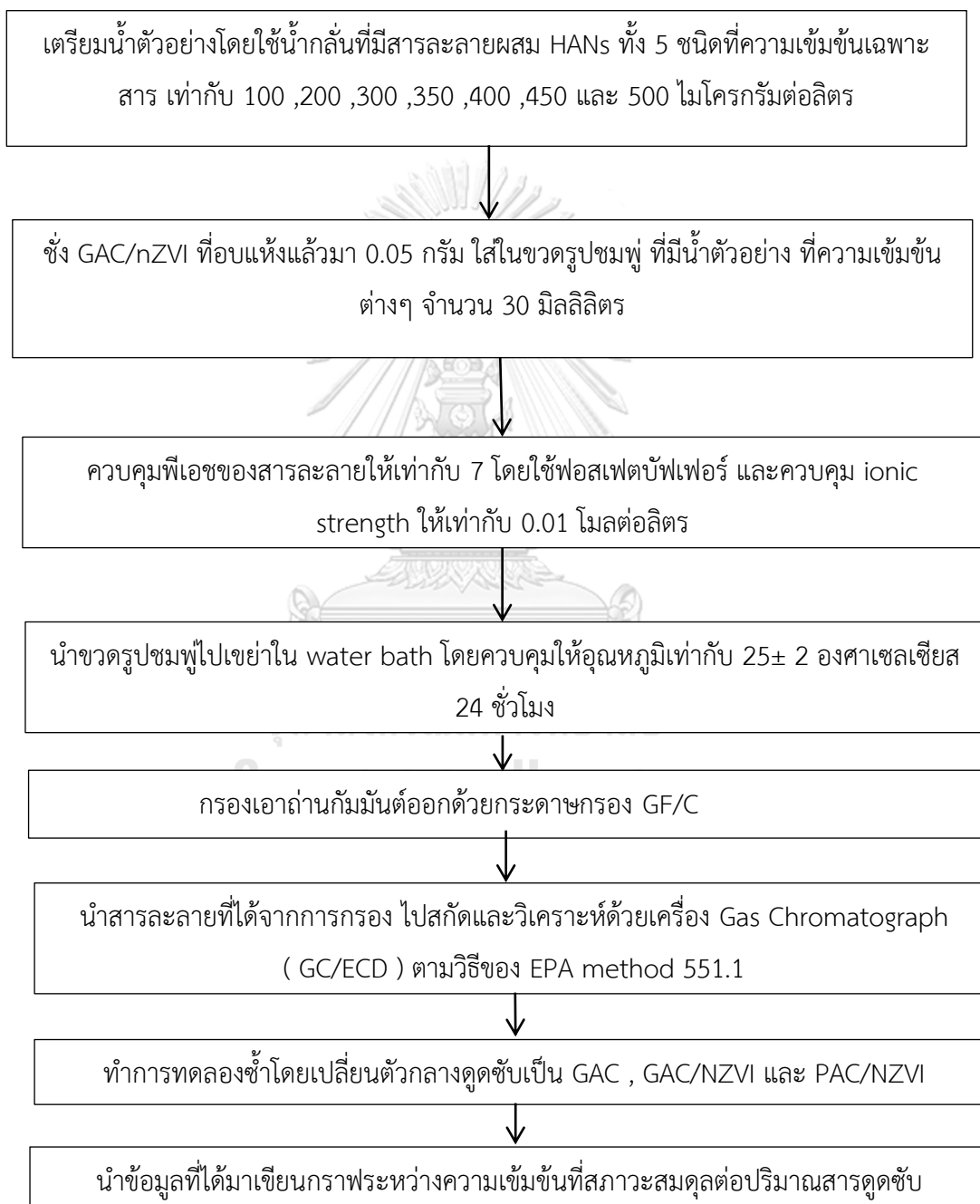
ภาพที่ 3.7 แสดงการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

ตารางที่ 3-4 ตัวแปรในการศึกษาผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ความเข้มข้นของไดคลอโรอะซีโตไนไตรล์ (DCAN) พีเอชของสารละลายตัวอย่าง	100 , 200 , 300 ,350 ,400 , 450 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร 5 , 7 และ 9
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
ความเข้มข้นของ DCAN ที่เหลืออยู่	วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GD/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดของตัวกลางดูดซับ อุณหภูมิ ปริมาณสารตัวกลางดูดซับ น้ำตัวอย่าง Ionic strength	PAC, NZVI และ PAC/NZVI 25± 2 องศาเซลเซียส 0.05 กรัม น้ำกลั่น 0.01 โมลาร์

3.2.8 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำกลั่นควบคุมพีเอช เท่ากับ 7

การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับในน้ำกลั่นควบคุมพีเอช เท่ากับ 7 ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพและตารางด้านล่าง



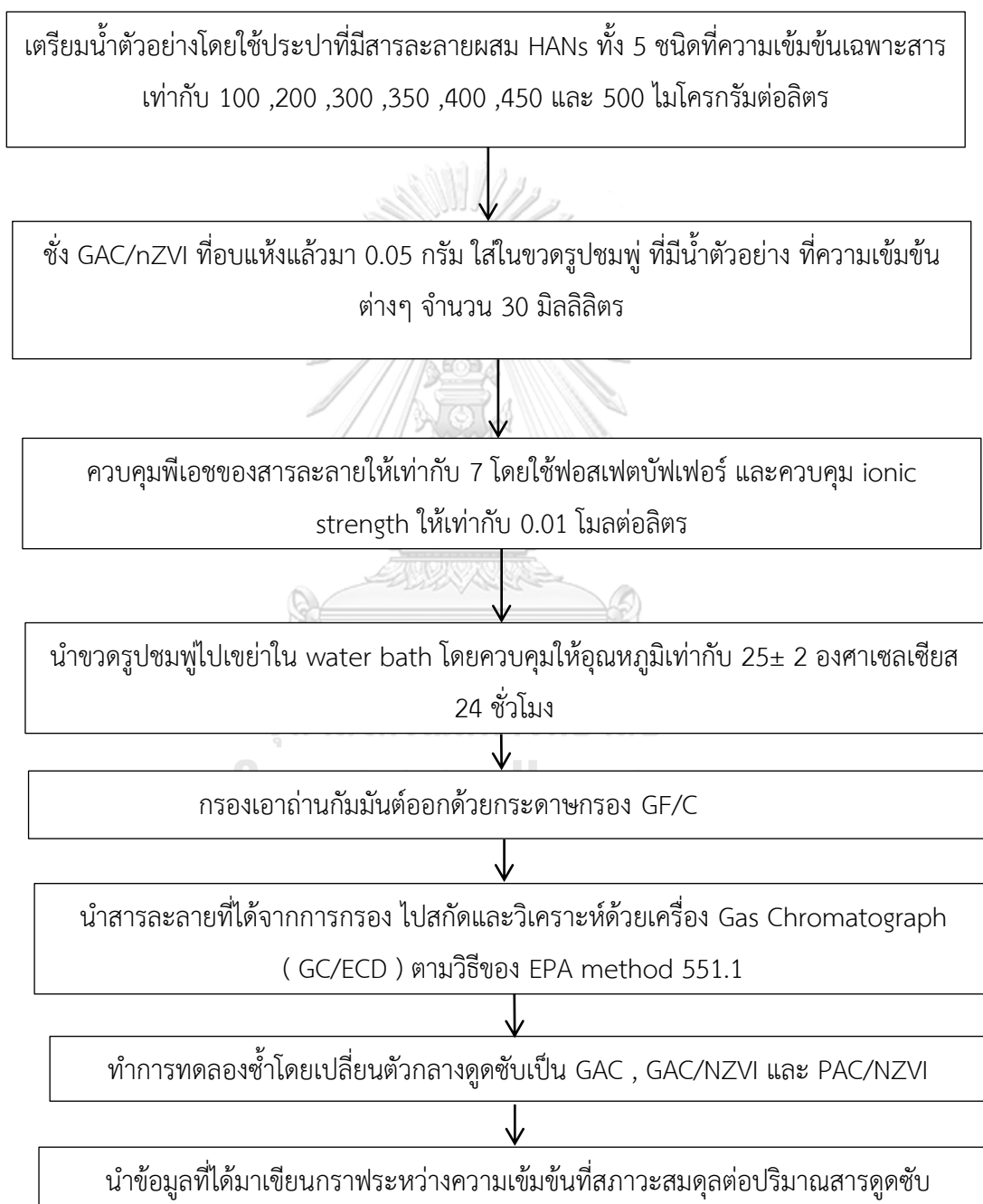
ภาพที่ 3.8 แสดงการศึกษาผลการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำกลั่น

ตารางที่ 3-5 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับเมื่อในน้ำกลั่นและควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (แบบผสม) - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ - ชนิดของฮาโลอะซีโนไตรล์ 	<ul style="list-style-type: none"> - 100 , 200 , 300 , 350 ,400 ,450 , 500 µg/l - GAC , GAC/nZVI , PAC , PAC/nZVI - MCAN , MBAN , DCAN , DBAN และ TCAN
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช - อุณหภูมิ - น้ำตัวอย่าง 	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ - 25± 2 องศาเซลเซียส - 0.05 กรัม - น้ำกลั่น

3.2.9 การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำประปาโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

การศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของตัวกลางดูดซับในน้ำประปา โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 ของตัวกลางดูดซับแต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพและตารางด้านล่าง



ภาพที่ 3.9 แสดงการศึกษาผลการคัดเลือก (selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับในน้ำประปา

ตารางที่ 3-6 ตัวแปรในการศึกษาสมบัติในการคัดเลือก (selectivity) ของสารตัวกลางดูดซับเมื่อในน้ำประปาและควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (แบบผสม) - ชนิดของสารตัวกลางดูดซับ - ชนิดของฮาโลอะซีโนไตรล์ 	<ul style="list-style-type: none"> - 100 , 200 , 300 , 350 ,400 ,450 , 500 µg/l - GAC , GAC/nZVI , PAC , PAC/nZVI - MCAN , MBAN , DCAN , DBAN และ TCAN
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีของ EPA method 551.1 (Gas Chromatograph (GC/ECD))
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<ul style="list-style-type: none"> - พีเอช - อุณหภูมิ - น้ำตัวอย่าง 	<ul style="list-style-type: none"> - พีเอชเท่ากับ 7 โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 25± 2 องศาเซลเซียส - 0.05 กรัม - น้ำประปา

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การศึกษาสมบัติกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (nano scale zero valent iron) ด้วยเทคนิค impregnation จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physico - Chemical property) ด้วยเทคนิควิเคราะห์ต่างๆ เช่น

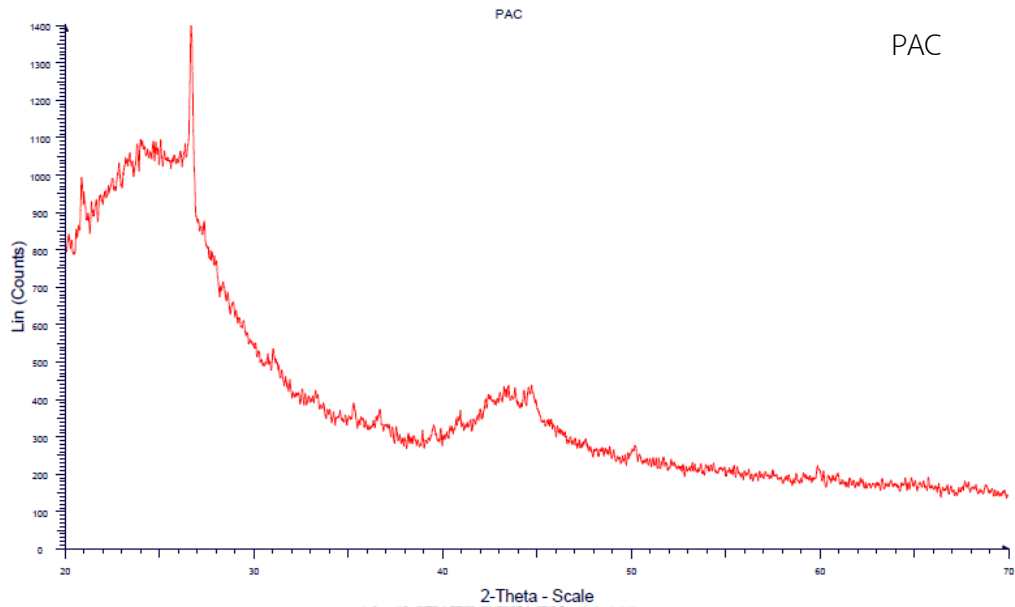
4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของตัวกลางดูดซับด้วย X-Ray Powder Diffraction

ภาพที่ 4.1-4.5 แสดงผลการศึกษาโครงสร้างของตัวกลางดูดซับต่างๆ โดย X-Ray Powder Diffraction ด้วยเครื่อง Diffractometer ที่ scanning rate 1000 deg min ที่ช่วง 20° - 70° (2θ)

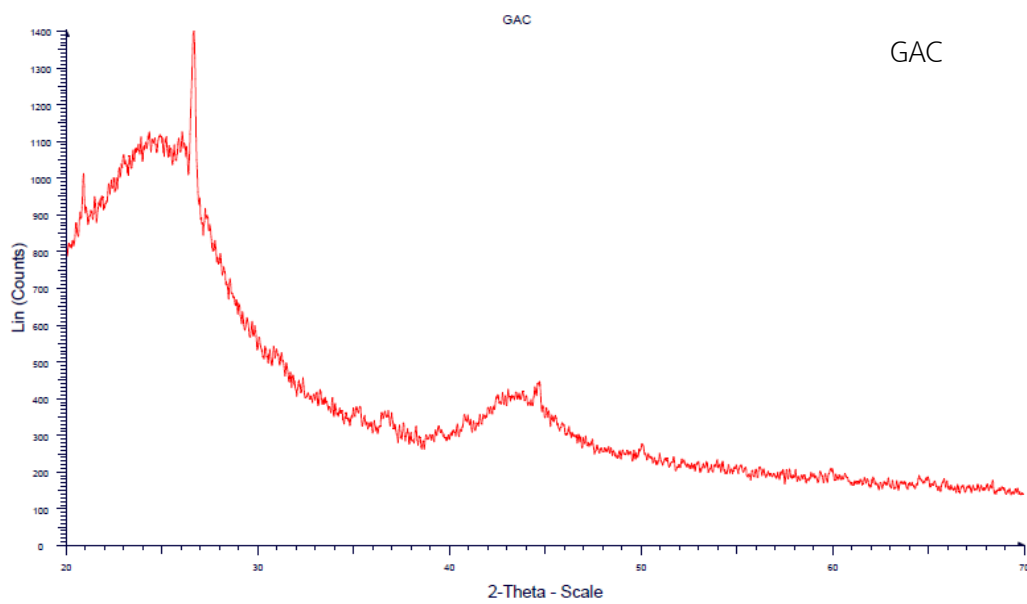
จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของถ่านกัมมันต์ตำแหน่งพีคจะปรากฏที่มุมเทต้า (2θ) ตำแหน่งของพีคแสดงในตำแหน่งที่ 26° และ 44° แสดงว่าถ่านกัมมันต์มีลักษณะของโครงสร้างผลึกแกรไฟต์ (graphite) (Yongbin et al., 2007) แต่พีคในตำแหน่งดังกล่าวจะต่ำและกว้างอยู่ในช่วง 20 - 30° และ 40 - 50° แสดงว่ายังมีลักษณะโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานปนอยู่ สามารถอธิบายได้ว่าระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเกิดการจัดเรียงตัวของคาร์บอนเป็นชั้นระนาบของแกรไฟต์และในระหว่างการคาร์บอนไซซจะมีการกระจายตัวของโครงสร้างแกรไฟต์แบบสุ่มในถ่านกัมมันต์ ทำให้ไม่มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึกคาร์บอน

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ jianan xiao และคณะ (2014) จากภาพที่ 4.6 พบว่ามีโครงสร้างของ ไอรอนออกไซด์ (Fe-O) ในตำแหน่งที่ 2θ ; 2θ ที่ 35° ซึ่งอาจจะปรากฏอยู่ในรูปของ Fe_2O_3 , Fe_3O_4 and $FeOOH$ แต่อย่างไรก็ตามการมีอยู่ของ NZVI (Fe^0) ในตำแหน่งที่ 2θ ; 2θ ที่ 46° บนโครงสร้างของ GAC และ PAC ยังไม่สามารถยืนยันได้ด้วยเทคนิค XRD เนื่องจากพีคที่แสดงถึงโครงสร้าง NZVI อยู่ในตำแหน่งที่ 45° (ภาพที่ 4.5)เช่นเดียวกับโครงสร้างผลึก

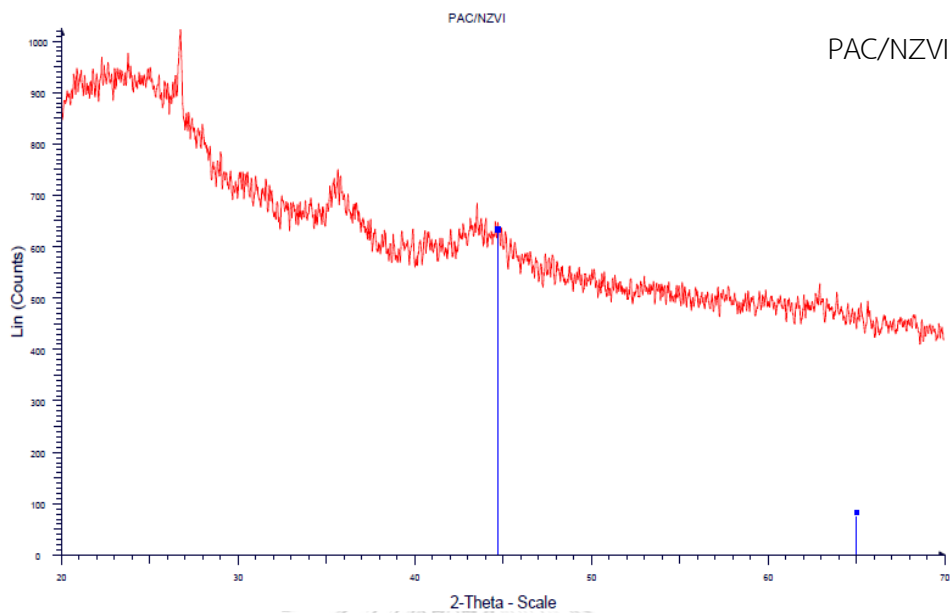
ของกราฟไฟต์ ทำให้จำเป็นต้องวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่มีอยู่บนโครงสร้างด้วยเทคนิค SEM-EDX , FTIR และการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมดบนตัวกลางดูดซับด้วย AAS ต่อไป



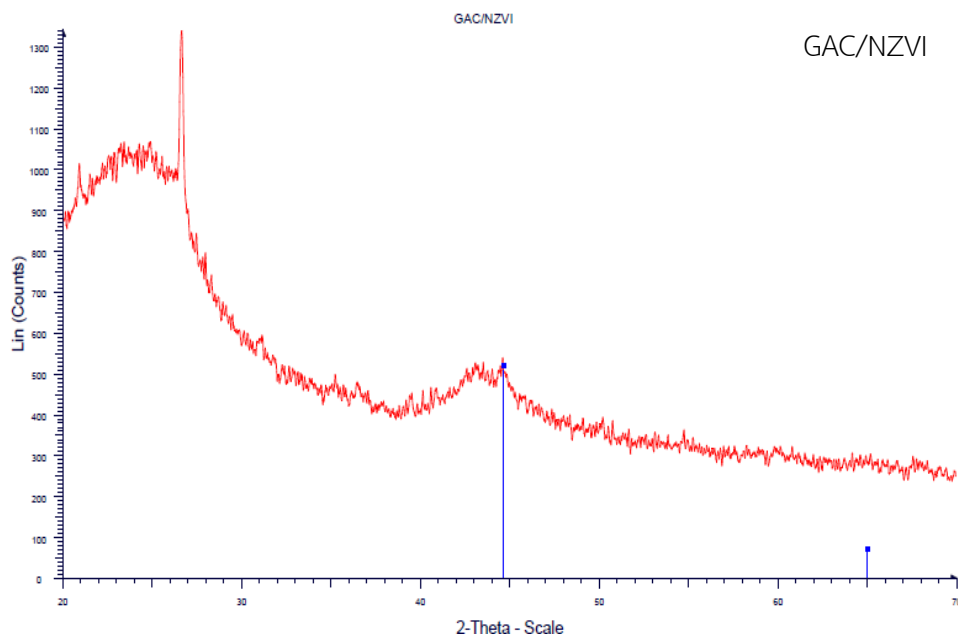
ภาพที่ 4.1 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC)



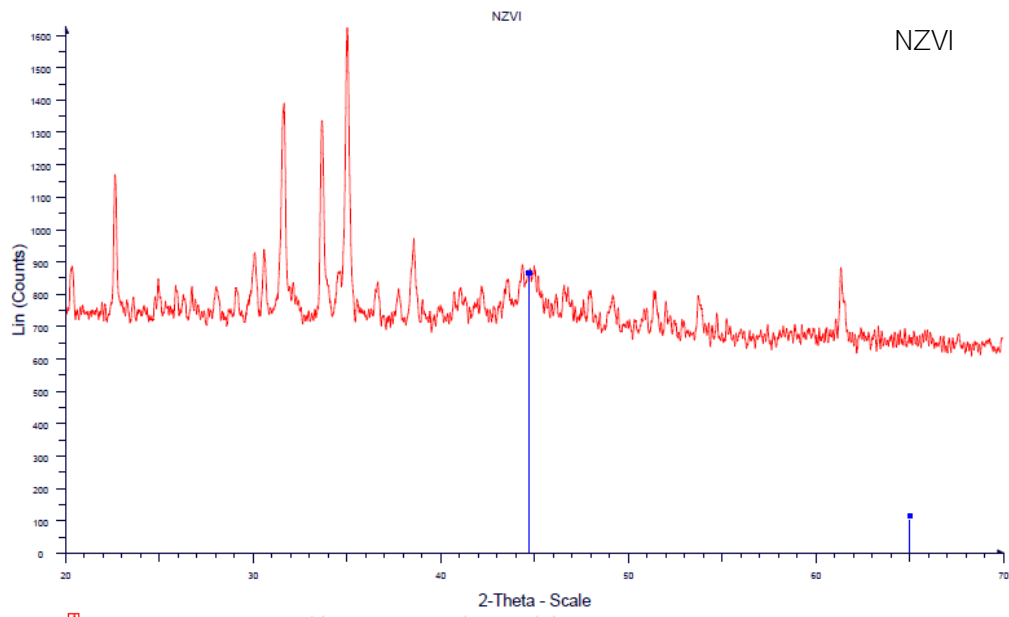
ภาพที่ 4.2 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC)



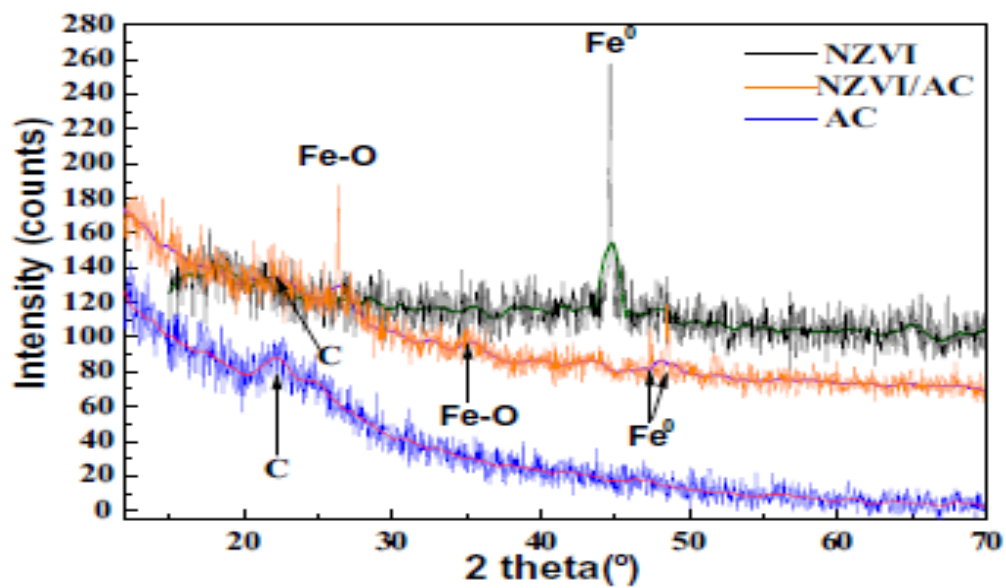
ภาพที่ 4.3 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.4 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ GAC/NZVI



ภาพที่ 4.5 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ NZVI



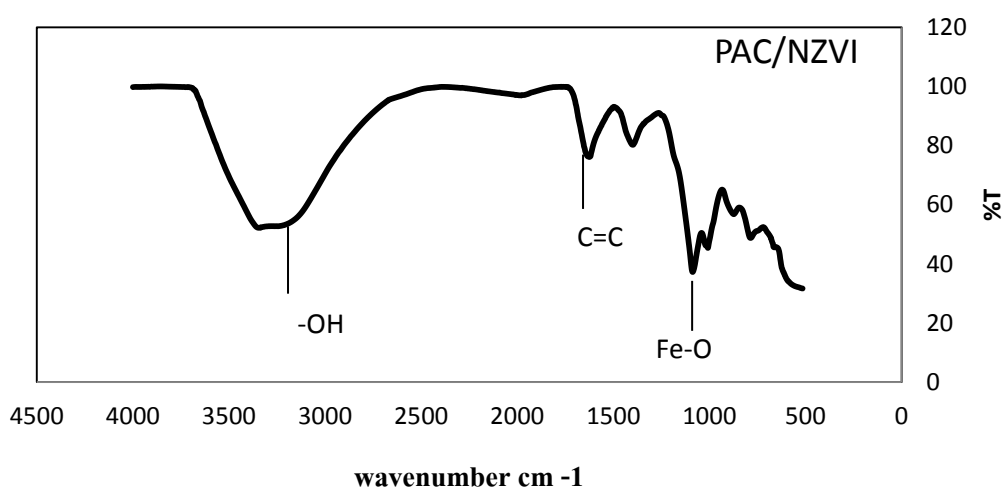
ภาพที่ 4.6 ภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของ AC , AC/NZVI และ NZVI ของ Jianan Xiao และ คณะ (2014)

4.1.2 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

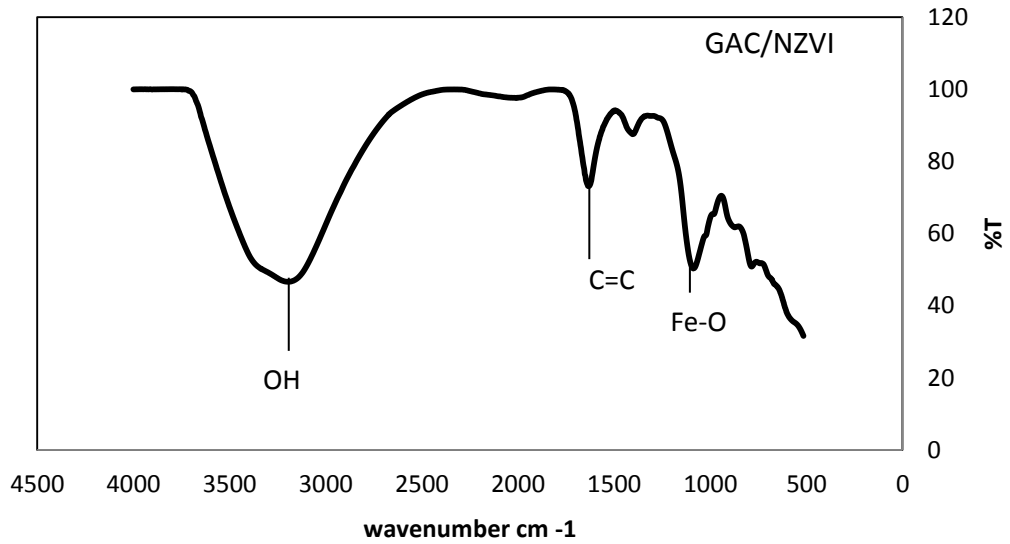
หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ, ถ่านกัมมันต์ที่ทำการดัดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโนและอนุภาคเหล็กขนาดนาโน ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค FT-IR

spectroscopy ในช่วงคลื่น $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสเปกตรัมที่วัดได้เกิดจากการสั่นของพันธะเคมีที่อยู่ในโมเลกุลของตัวกลางดูดซับในช่วงความถี่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับธาตุและชนิดของพันธะ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.7-4.11

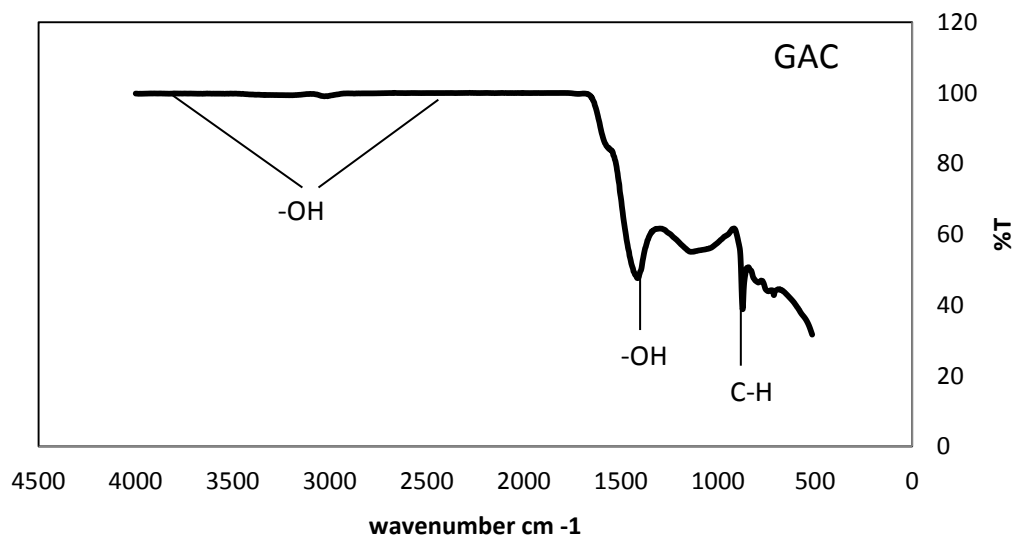
จากสเปกตรัม FT-IR ของถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ดที่ทำการต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (PAC/NZVI และ GAC/NZVI) ในตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3600 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะกว้างและต่ำ เกิดจากพันธะ O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความถี่ของการสั่นในรูปแบบการยืด (stretching vibration) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ liu และคณะ (2010) โดยหมู่ไฮดรอกซิลนี้อาจเกิดจากโครงสร้างของเหล็กไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) หรือเหล็กออกไซด์รูปแบบอื่นๆที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากการสัมผัสอากาศของ NZVI บนโครงสร้างตัวกลางดูดซับ สำหรับตำแหน่งเลขคลื่นที่ $1653.03 - 1428.79 \text{ cm}^{-1}$ แสดงถึง C=C ของโครงสร้างโอเลฟิน (olefin structures) ที่เกิดการสั่นของโมเลกุล ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1096 cm^{-1} แสดงถึง การสั่นในกลุ่มไอรอนออกไซด์ (fe-O) ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 878 แสดงถึง C-H ของการสั่นในอนุพันธ์ของเบนซีนสเปกตรัม ตำแหน่งต่างๆ ที่ปรากฏนี้จะสอดคล้องกับรายงานของ Yang and Qiu (2009) จากข้อมูล FTIR ที่ได้พบว่าสามารถตรวจพบออกไซด์ของโลหะ (ไอรอนออกไซด์) ได้บนตัวกลางชนิด PAC/NZVI และ GAC/NZVI ผ่านการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง $3600 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่จะมีโครงสร้างของ NZVI ในโครงสร้างของตัวกลางดูดซับทั้งสองชนิด ตารางที่ 4-1 สรุปหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบบนตัวกลางดูดซับที่ 5 ชนิด



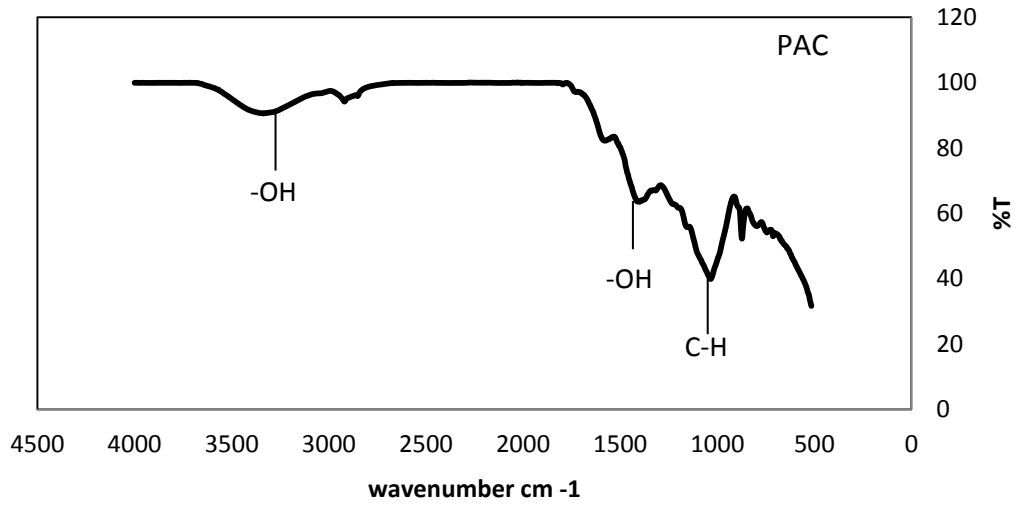
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัม FT-IR ของ PAC/NZVI



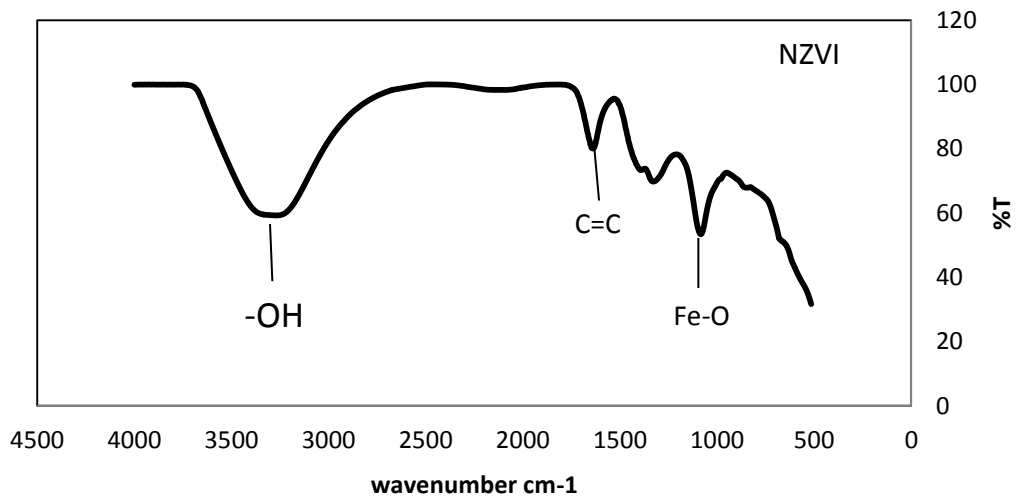
ภาพที่ 4.8 สเปกตรัม FT-IR ของ GAC/NZVI



ภาพที่ 4.9 สเปกตรัม FT-IR ของ GAC



ภาพที่ 4.10 สเปกตรัม FT-IR ของ PAC



ภาพที่ 4.11 สเปกตรัม FT-IR ของ NVZI

ตารางที่ 4-1 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

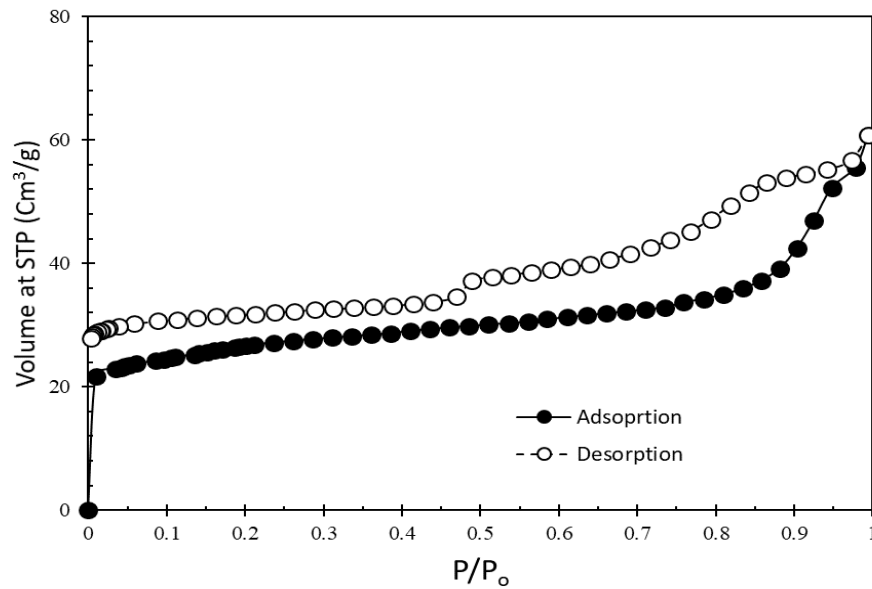
ตัวกลางดูดซับ	หมู่ฟังก์ชัน
PAC	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ
GAC	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ
PAC/NZVI	คาร์บอนิล, ฟีนิล และ ไฮดรอกซิล
GAC/NZVI	คาร์บอนิล, ฟีนิล และ ไฮดรอกซิล
NZVI	ไฮดรอกซิล

4.1.3 พื้นผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุน

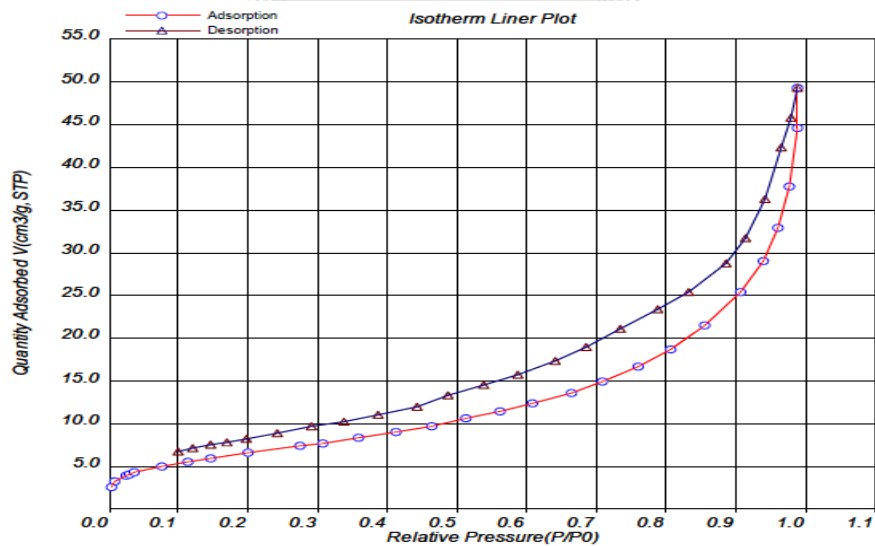
วิธีของ Brunauer – Emmett – Teller (BET) เป็นวิธีที่นิยมอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของวัสดุที่มีรูพรุนชนิดต่างๆ โดยใช้หลักการของตัวกลางดูดซับเทคนิคการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจน (N_2 adsorption – desorption) อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer Micromeritic Model : ASAP 2020 version 1.04H ซึ่งไอโซเทอมของการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนแสดงดังภาพที่ 4.12 – 4.15 จากไอโซเทอมการดูดซับของ PAC, PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI แสดงไอโซเทอมของก๊าซไนโตรเจนประเภทที่ 1 (Type I) จัด ประเภทโดย IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งชี้บ่งว่าตัวกลางดูดซับดังกล่าวมีรูพรุนขนาดเล็ก (micropore) ส่วน GAC นั้นไม่ได้ทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแต่สามารถใช้ข้อมูลผลิตภัณฑ์จากบริษัท Sigma Aldrich โดยมีข้อมูลดังนี้ CAS Number: 7440-44-0 และ Product Number C2764

ภาพที่ 4.15-4.18 แสดงข้อมูลการกระจายตัวของรูพรุนของตัวกลางดูดซับ PAC, PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI รวมถึงข้อมูลปริมาตรรูพรุนของตัวกลางดูดซับทั้ง 4 ชนิด จากภาพที่ 4.16-4.19 พบว่าการกระจายตัวของรูพรุนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก (จากการเปรียบเทียบระหว่าง PAC และ PAC/NZVI) แต่ค่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีค่าลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง (21 nm ลดลงเป็น 12.6 nm) รวมถึงปริมาตรรูพรุนเกิดการลดลงอย่างมากซึ่งอาจเกิดจากการอุดตันรูพรุนขนาด micropore จากกระบวนการ impregnation ดังนั้นการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเข้ากับถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆแล้วพบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าที่ลดลง เนื่องมาจากการที่มีอนุภาคเหล็กขนาดนาโนกระจายอยู่บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

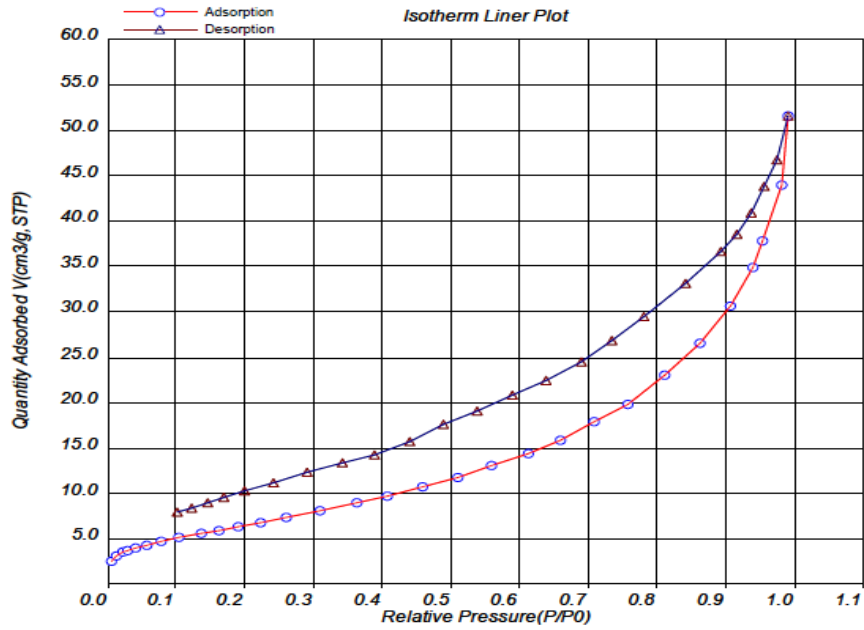
จากไอโซเทอมการดูดซับไนโตรเจนดังกล่าวสามารถวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน (ตารางที่ 4-2) พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ PAC , GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI เท่ากับ 1123 , 625 , 24.2 , 24.8 และ 41.2 ตามลำดับ



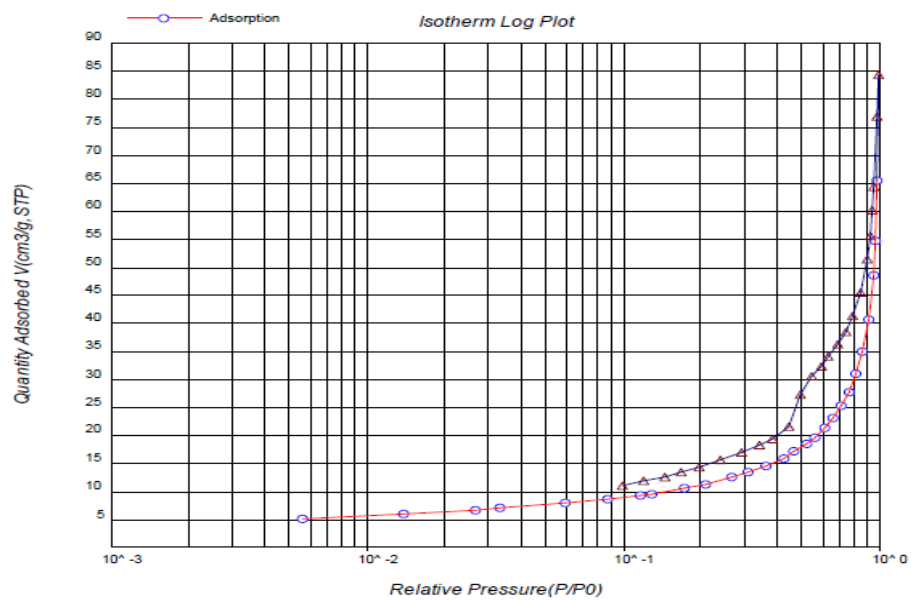
ภาพที่ 4.12 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ PAC



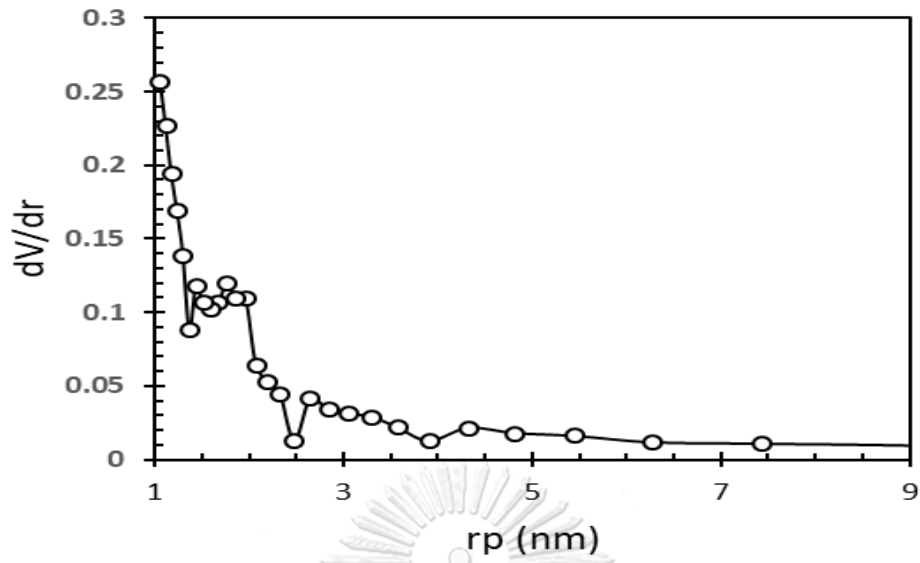
ภาพที่ 4.13 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ PAC/NZVI



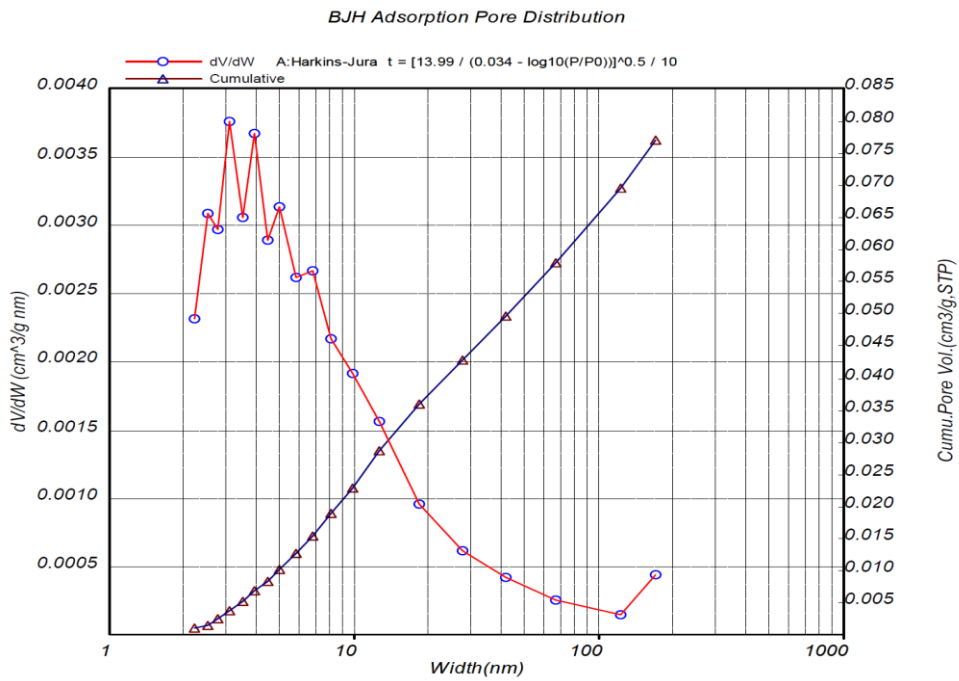
ภาพที่ 4.14 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ GAC/NZVI



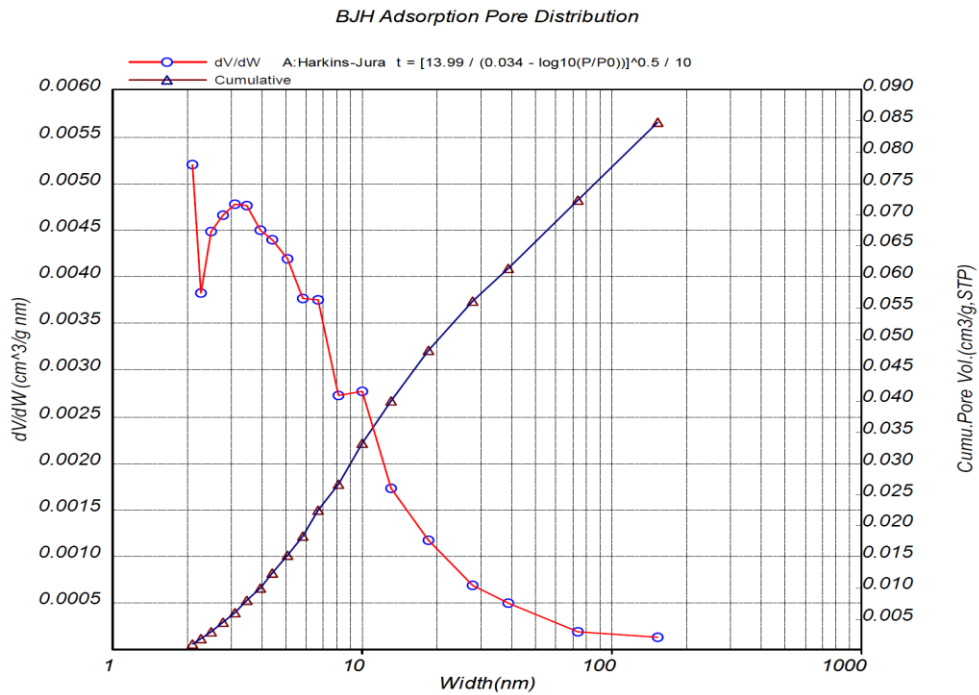
ภาพที่ 4.15 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ NZVI



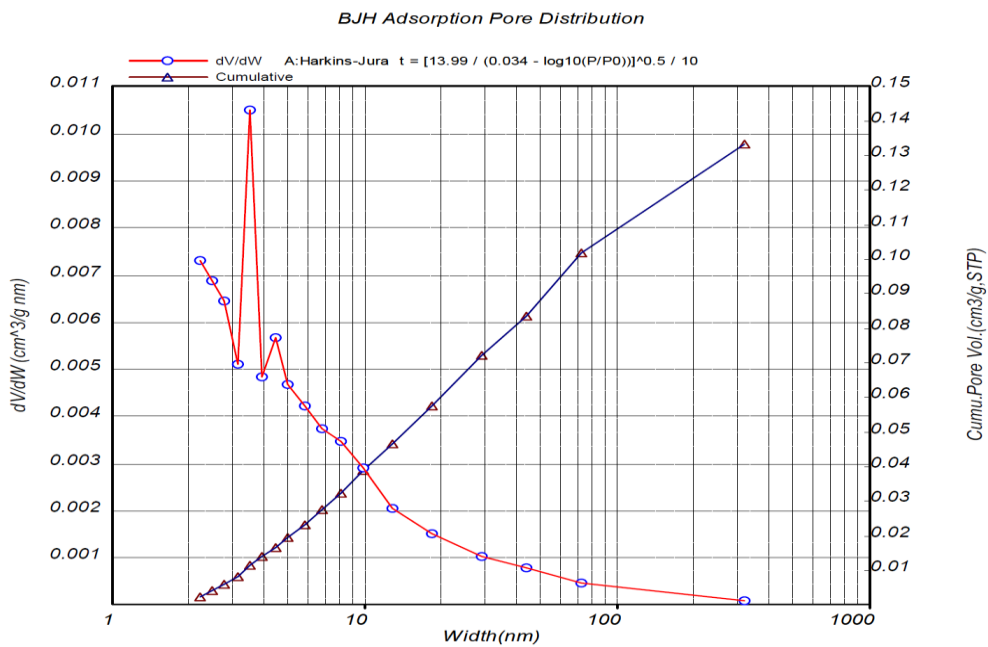
ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของรูพรุนของ PAC



ภาพที่ 4.17 การกระจายตัวของรูพรุนของ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.18 การกระจายตัวของรูพรุนของ GAC/NZVI



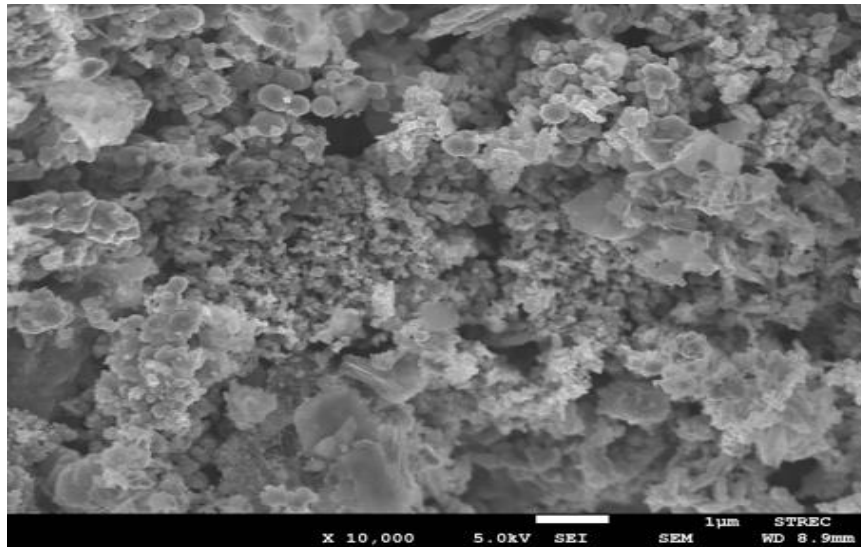
ภาพที่ 4.19 การกระจายตัวของรูพรุนของ NZVI

ตารางที่ 4-2 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวกลางดูดซับ

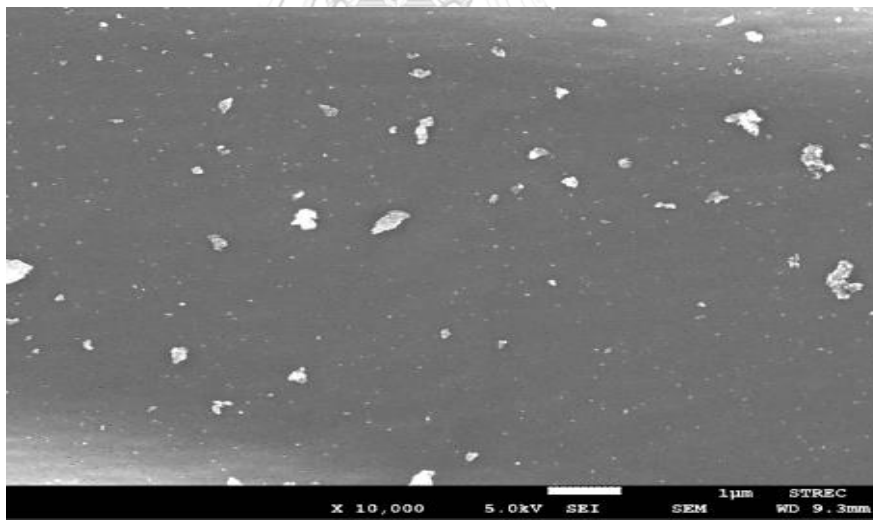
สารตัวกลาง ดูดซับ	พื้นที่ผิว จำเพาะ (m ² /g)	ขนาดของ รูพรุน (nm) BJH adsorption	ปริมาตรของ รูพรุน (Micro) (cm ³ /g)
PAC	1123	21.6	0.457
GAC	625	21.2	0.183
PAC/NZVI	24.2	12.6	0.076
GAC/NZVI	24.8	12.9	0.076
NZVI	41.2	12.6	0.130

4.1.4 ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยา (Particle size and morphology)

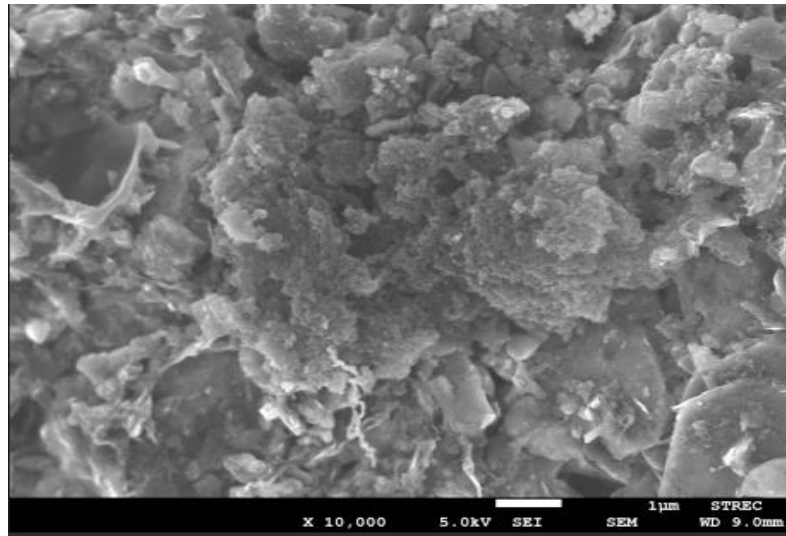
ขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค Scanning electron microscopy จากภาพที่ 4.20 แสดงลักษณะพื้นผิวของ NZVI ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดอนุภาคกลมเป็นหลัก จากภาพที่ 4.21 และ 4.22 แสดงลักษณะพื้นผิวของ PAC และ PAC/NZVI พบว่าพื้นผิวของ PAC มีลักษณะค่อนข้างเรียบ ขนาดรูพรุนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วน ภาพ PAC/NZVI พบว่ามีอนุภาคของ NZVI กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนพื้นผิว PAC และมีความขรุขระไม่แตกต่างจาก NZVI บริสุทธิ์ เช่นเดียวกับกรณี GAC ภาพที่ 4.23 ซึ่งมีพื้นผิวขรุขระกว่า PAC เล็กน้อย และเมื่อทำการต่อติด NZVI ลงบนพื้นผิวก็สามารถมองเห็นอนุภาคของ NZVI ที่ต่อติดอยู่บนพื้นผิวของ GAC/NZVI ได้เช่นกัน



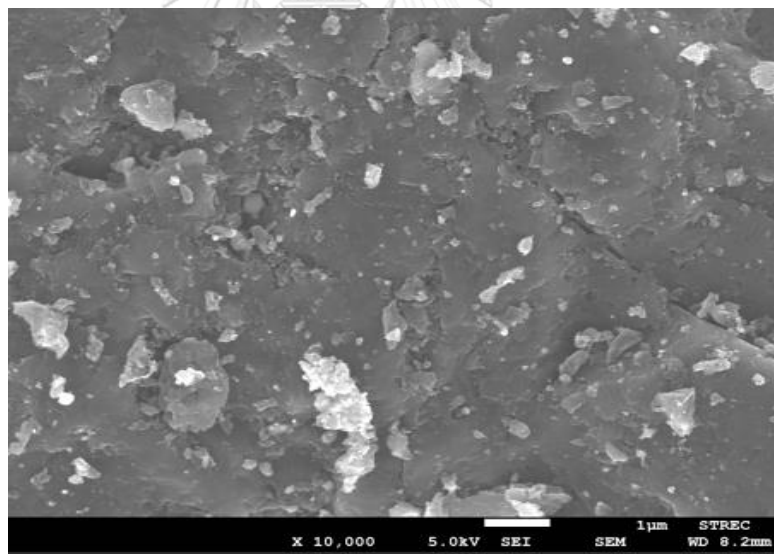
ภาพที่ 4.20 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ NZVI



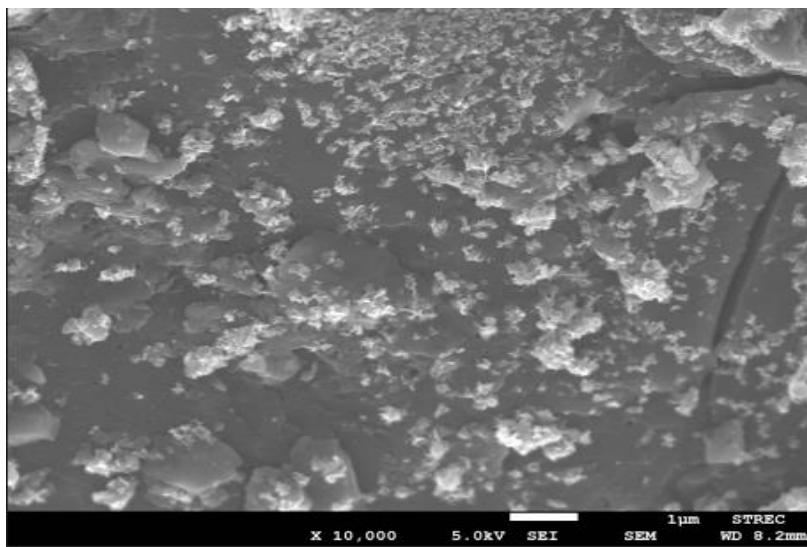
ภาพที่ 4.21 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ PAC



ภาพที่ 4.22 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.23 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ GAC

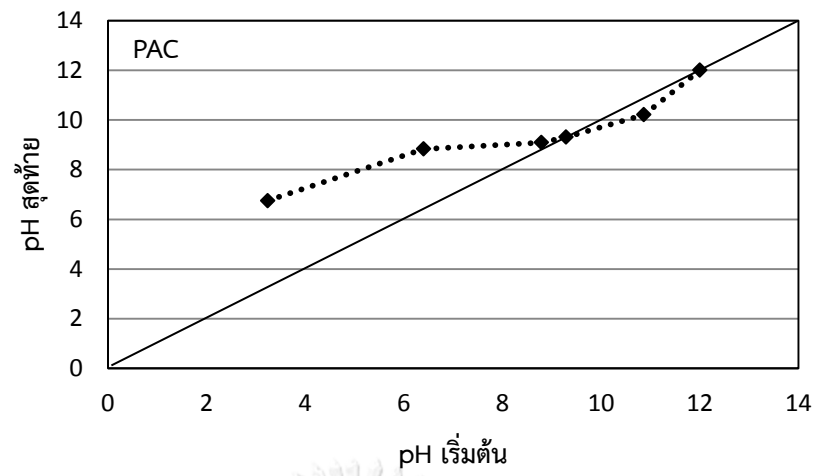


ภาพที่ 4.24 ภาพ SEM แสดงขนาดอนุภาคและสัณฐานวิทยาของตัวกลางดูดซับ GAC/NZVI

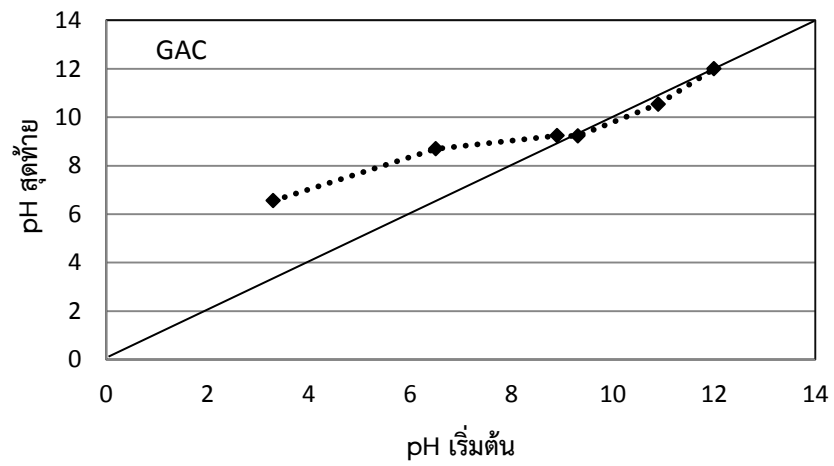
4.1.5 การวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิว (Surface charge)

สภาพประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ (Surface charge) วิเคราะห์โดยวิธี Acid- base titration ซึ่งควบคุมให้ความแรงของประจุ (Ionic strength) เท่ากับ 0.01 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลจะทำการวัดพีเอชของสารละลาย ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวกับค่าพีเอชแสดงดัง ภาพที่ 4.25-4.29 และตารางสรุปค่า pH pzc แสดงดังตารางที่ 4-3

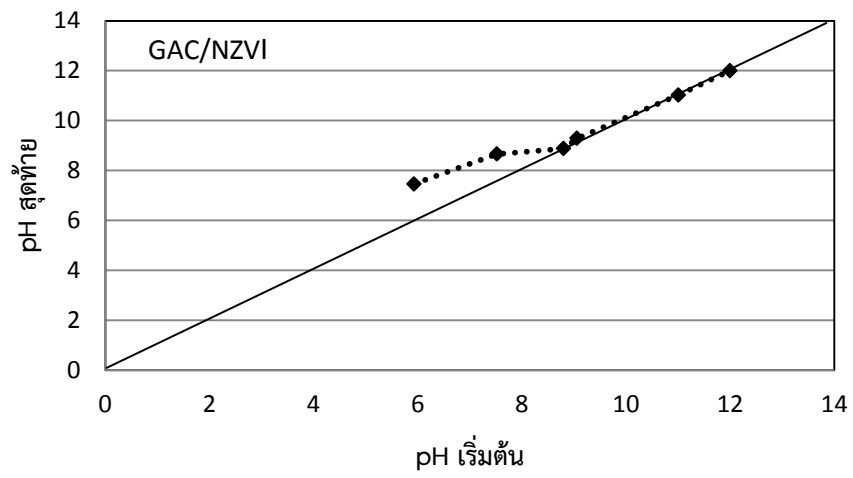
จากภาพที่ 4.25-4.29 พบว่าตัวดูดซับมีค่า pH_{pzc} หมายถึง ค่าพีเอชที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเท่ากับศูนย์ แตกต่างกันไปเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน โดยค่า pH pzc ของ PAC , GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI เท่ากับ 9.0 , 8.8 , 8.8 , 8.6 และ 7.3 ตามลำดับ



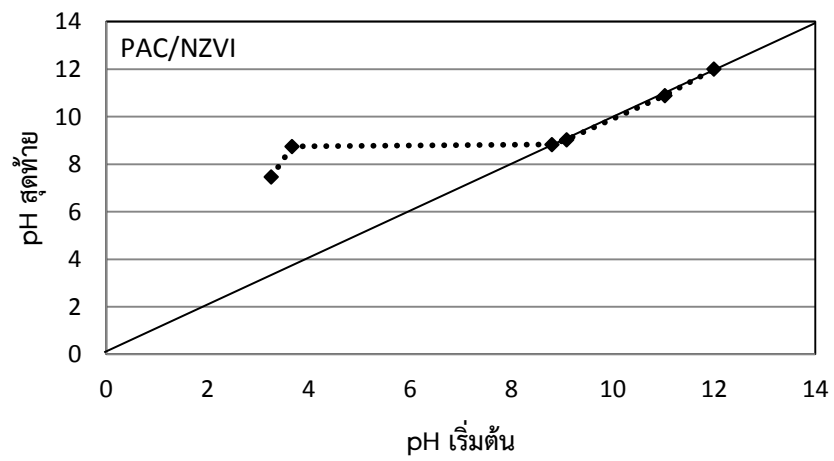
ภาพที่ 4.25 ประจุนประจุของ PAC



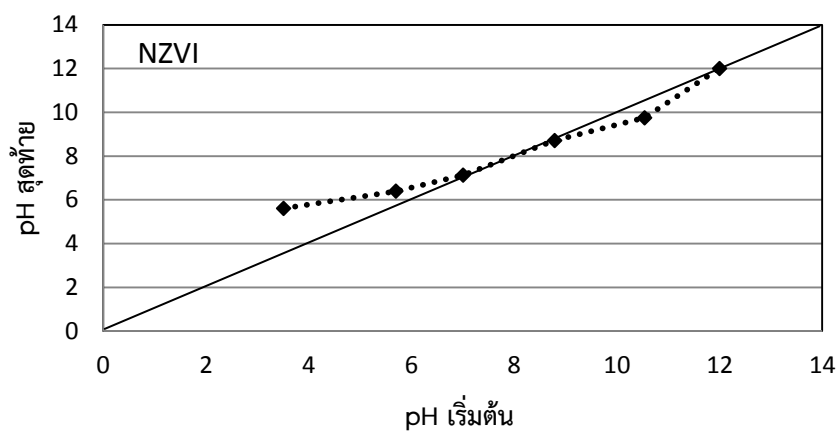
ภาพที่ 4.26 ประจุนประจุของ GAC



ภาพที่ 4.27 ประจวบพันธุ์ผิวของ GAC/NZVI



ภาพที่ 4.28 ประจวบพันธุ์ผิวของ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.29 ประจวบพื้นผิวของ NZVI

จากภาพที่ 4.25-4.29 พบว่าตัวดูดซับมีค่า pH pzc หมายถึง ค่าพีเอชที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเท่ากับศูนย์ แตกต่างกันไปเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันสามารถแตกตัวเป็นไอออนที่ค่าพีเอชแตกต่างกัน โดยค่า pH pzc ของ PAC , GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI เท่ากับ 9.0 , 8.8 , 8.8 , 8.6 และ 7.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ค่า pH pzc ของตัวดูดซับแต่ละชนิด

สารตัวกลางดูดซับ	ค่า pH pzc
PAC	9.0
GAC	8.8
PAC - NZVI	8.8
GAC - NZVI	8.6
NZVI	7.3

4.1.6 ปริมาณเหล็กบนตัวกลางดูดซับและการชะละลายของเหล็กในน้ำ

จากตารางที่ 4-4 พบว่าค่าปริมาณเหล็กทั้งหมดบนตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆซึ่งวัดโดยเทคนิค SEM-EDS พบว่าอนุภาคเหล็กขนาดนาโนมีปริมาณเหล็กมากที่สุด คือ 51.98%

รองลงมาคือ GAC/NZVI , PAC/NZVI , GAC และ PAC คือ 7.38% , 2.78% , 0.38% และ 0.14% ตามลำดับ

ตารางที่ 4-4 ปริมาณเหล็กบนตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆที่วัดได้จากการวิเคราะห์ผ่านเครื่อง SEM-EDS

สารตัวกลางดูดซับ	ปริมาณเหล็ก
PAC	0.14%
GAC	0.10%
PAC - NZVI	2.72%
GAC - NZVI	7.38%
NZVI	51.98%

นอกจากนี้ปริมาณการชะละลายของเหล็กจากตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิดได้ทำการศึกษาและแสดงดังตารางที่ 4-5 โดยในแต่ละการทดลองใช้น้ำกลั่นที่ปรับพีเอชที่ 7 ด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ และปริมาตรสารละลายเท่ากับ 30 มล. และน้ำหนักตัวกลางดูดซับที่ 0.05 กรัม จากผลการทดสอบพบว่าตัวกลางดูดซับที่มี NZVI ในโครงสร้างมีโอกาสที่จะเกิดการชะละลายของเหล็กออกสู่น้ำได้

ตารางที่ 4-5 ปริมาณเหล็กทั้งหมดใน DCAN ในน้ำกลั่น ของ PAC/NZVI , GAC- NZVI และ NZVI ด้วยเครื่อง AAS ณ เวลาต่างๆ

PAC/NZVI		GAC/NZVI		NZVI	
เวลา (นาที)	ปริมาณธาตุ Fe (mg/l)	เวลา (นาที)	ปริมาณธาตุ Fe (mg/l)	เวลา (นาที)	ปริมาณธาตุ Fe (mg/l)
1	0.688	1	0.657	1	1.279
5	0.670	5	0.522	5	1.283
10	0.250	10	0.501	10	1.787
30	0.264	30	0.187	30	1.182

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของสารตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆสามารถสรุปสมบัติทางกายภาพและเคมีได้ดังตารางที่4-6

ตารางที่ 4-6 สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

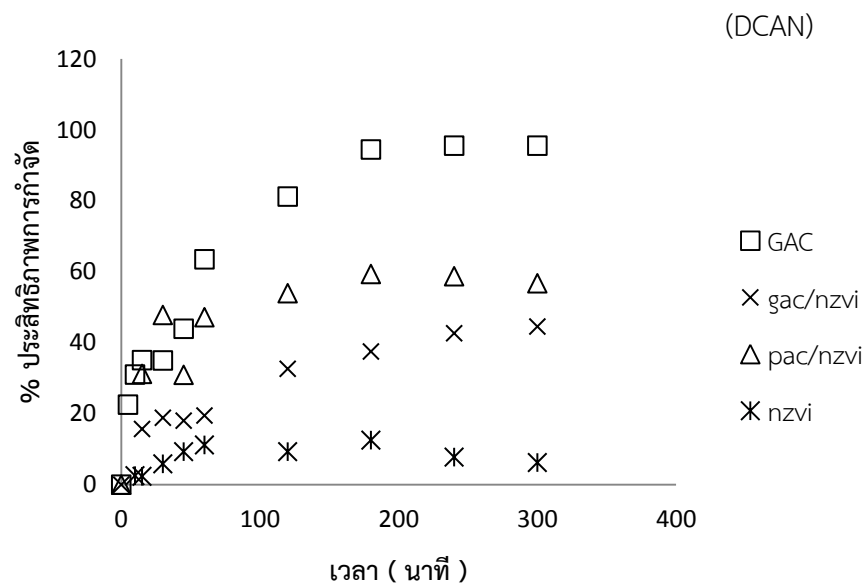
สารตัวกลางดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดของรูพรุน (nm)	ปริมาตรของรูพรุน (cm^3/g)	ปริมาณเหล็ก (%)	pH _{pzc}	หมู่ฟังก์ชัน
PAC	1123	21.6	0.457	0.14	9.0	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ
GAC	625	21.2	0.183	0.10	7.8	คาร์บอนิล, ฟีนิล และอื่นๆ
PAC/NZVI	24.2	12.6	0.076	2.72	8.8	คาร์บอนิล, ฟีนิล และ ไฮดรอกซิล
GAC/NZVI	24.8	12.9	0.076	7.38	8.6	คาร์บอนิล, ฟีนิล และไฮดรอกซิล
NZVI	41.2	12.6	0.130	51.98	7.3	ไฮดรอกซิล

4.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

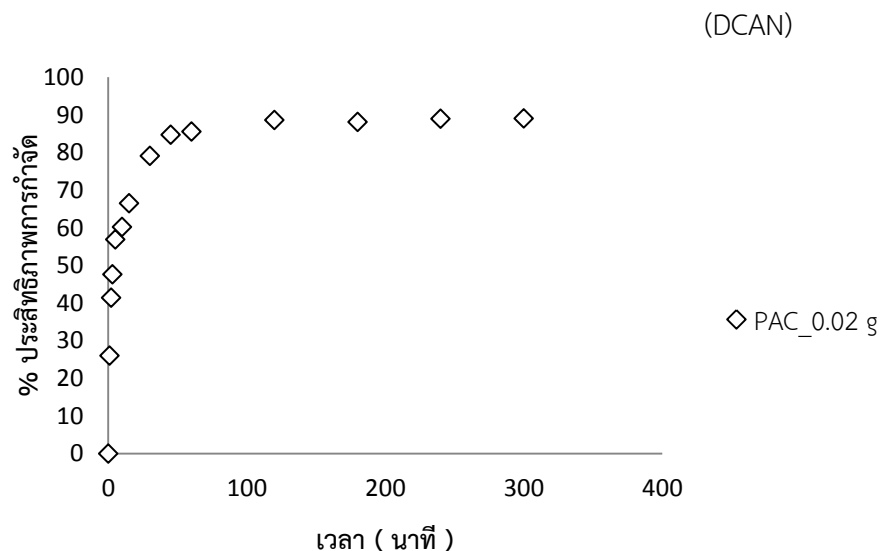
4.2.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

จากการทดสอบจลนพลศาสตร์การดูดซับของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (HANs) โดยตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิด แสดงดังภาพที่ 4.30-4.35 โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง พบว่าการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์โดย PAC/NZVI , GAC/NZVI , PAC , GAC และ NZVI เข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 4 ชั่วโมง

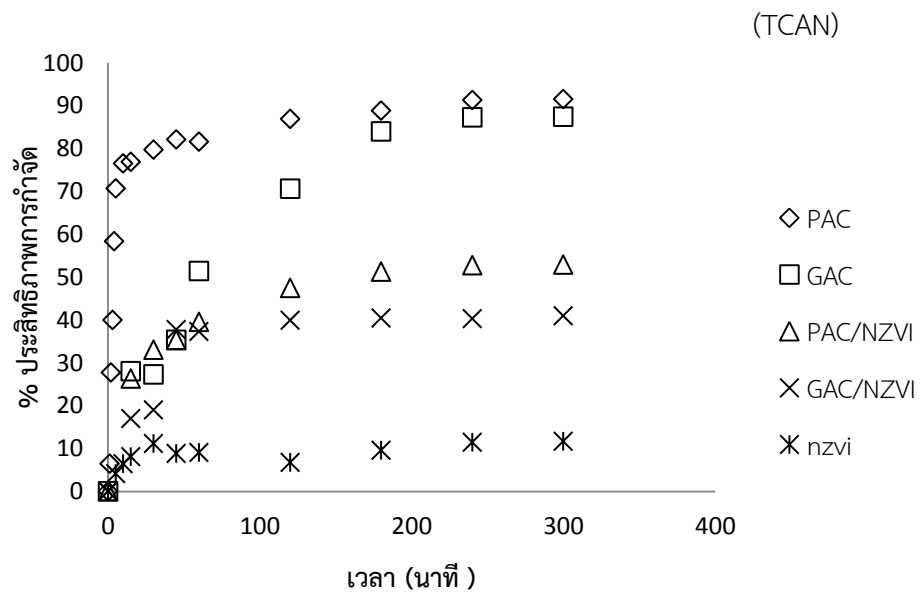
นอกจากนี้จากเบื้องต้นพบว่าการดูดซับ NZVI บนถ่านกัมมันต์ชนิดผงและเกล็ดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด HANs ลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการอุดตันรูพรุนภายในของ PAC และ GAC



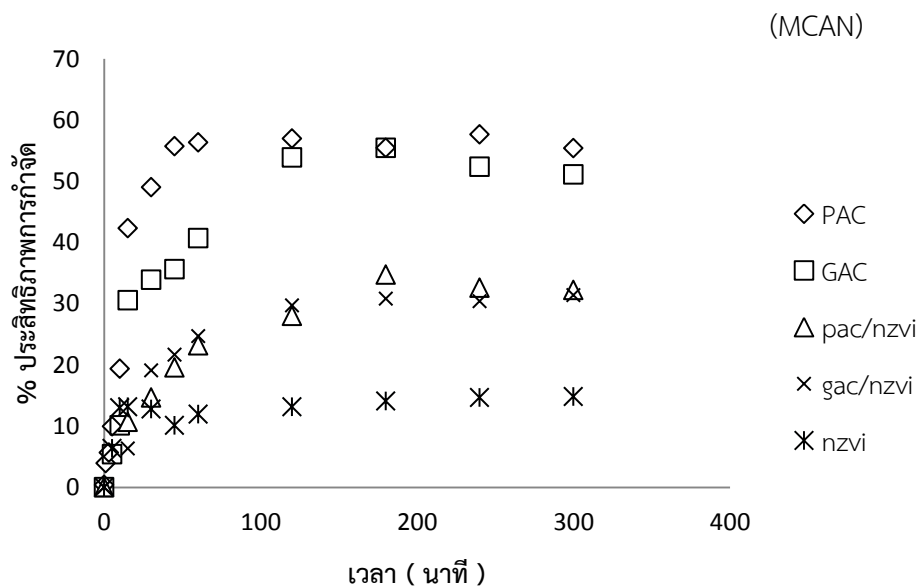
ภาพที่ 4.30 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (DCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) GAC , PAC/NZVI, GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$



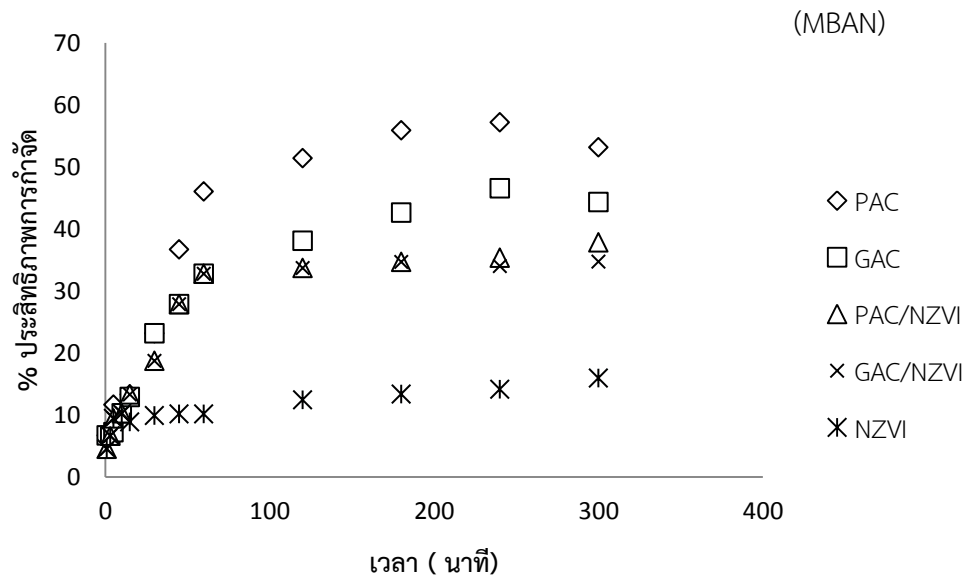
ภาพที่ 4.31 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (DCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.02 กรัม) PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$



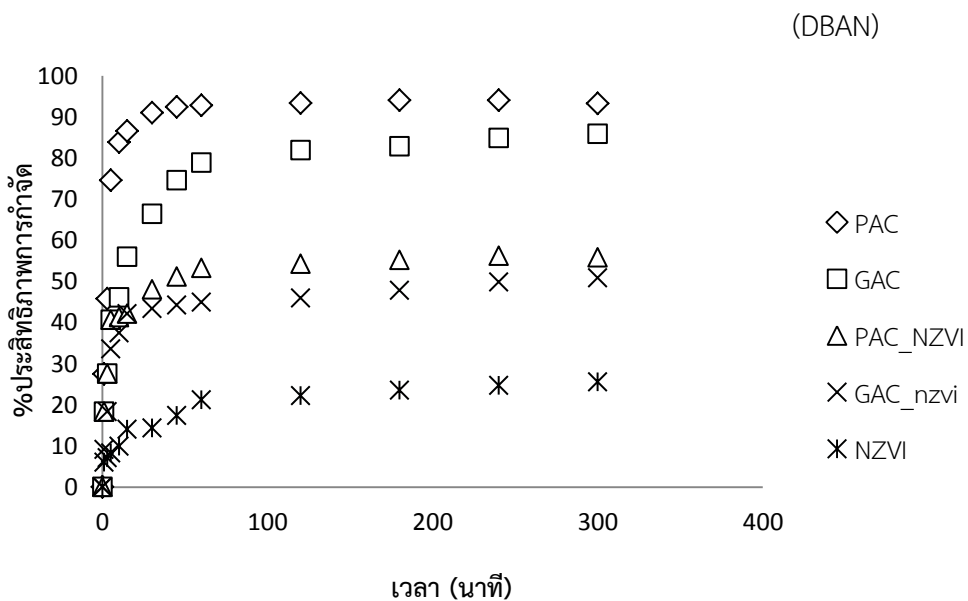
ภาพที่ 4.32 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (TCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C



ภาพที่ 4.33 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (MCAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C



ภาพที่ 4.34 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (MBAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C



ภาพที่ 4.35 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (DBAN) = 20 mg/l ปริมาตร 30 มล. ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (0.05 กรัม) PAC, GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI และ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7.0 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 °C

การวิเคราะห์อัตราเร็วในการดูดซับโดยเลือกใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first- order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order model) อธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังสมการ

1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (1/ชั่วโมง)

q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา
สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของดูดซับที่ใช้ที่เวลาใดๆ
(มิลลิกรัมต่อกรัม)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

2) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

เมื่อ k_2 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสอง (1/ชั่วโมง)

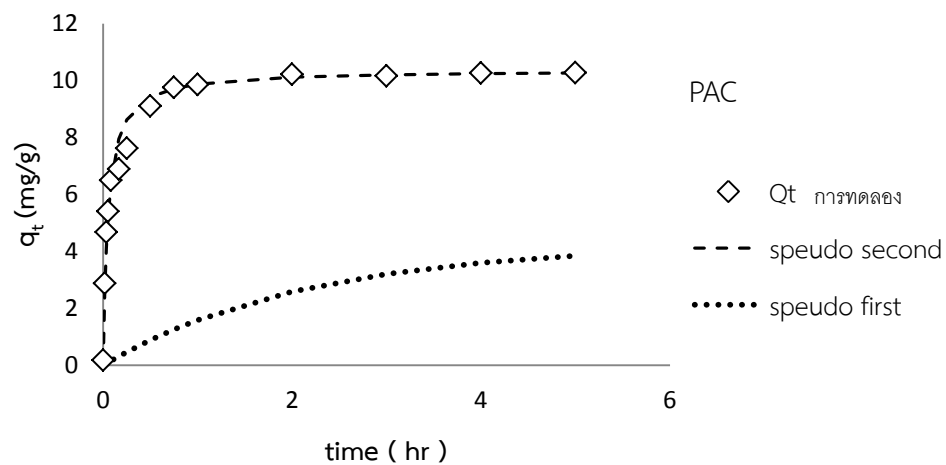
q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา
สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ที่เวลา
ใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

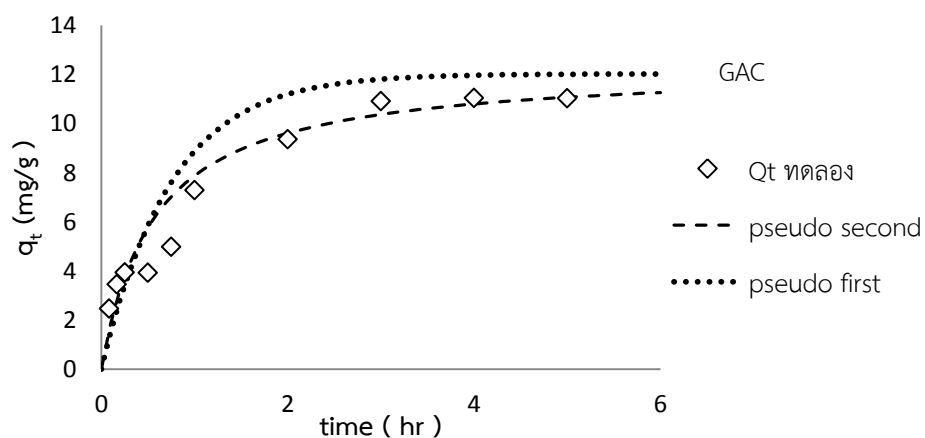
t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

จลนพลศาสตร์การดูดซับของฮาโลอะซีไนด์ในไตรลโดยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือนโดยใช้ความสัมพันธ์เชิง nonlinear โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Origin Pro 8 แสดงดังภาพที่ 4.36-4.40 และค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์

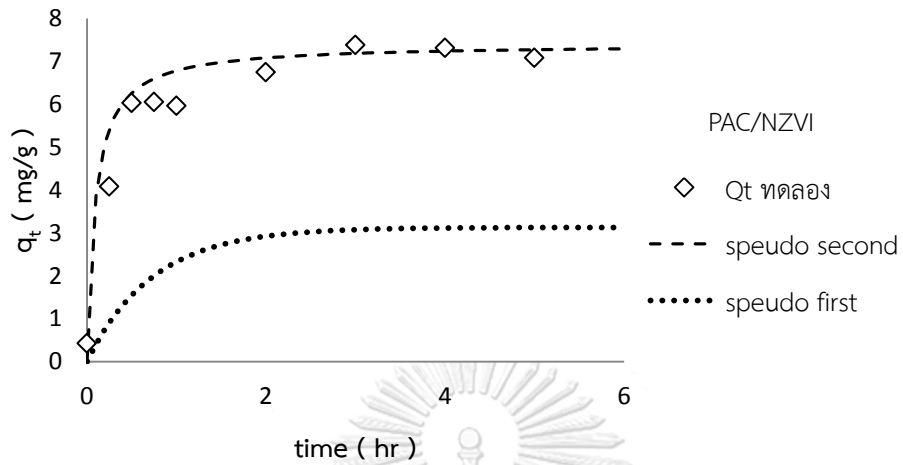
แสดงดัง ตารางที่ 4-7 ซึ่งพบว่าตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ (PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับเริ่มต้น (1/h) เร็วที่สุดและตามด้วย GAC , PAC / NZVI , GAC/ NZVI และ NZVI ตามลำดับ โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของฮาโลอะซีไนด์ไนไตรล์ (DCAN) เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการเปรียบเทียบความเข้ากันได้ของสมการจลนพลศาสตร์ทั้ง 2 ชนิดพบว่าปรากฏการณ์การดูดซับเป็นไปตามสมการอันดับสองเหมือน (ยกเว้นกรณี GAC/NZVI) โดยปริมาณของฮาโลอะซีไนด์ไนไตรล์ที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลจากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง และอัตราเร็วในการดูดซับเบื้องต้น (h) ของตัวกลางดูดซับชนิด PAC มีค่าสูงสุด



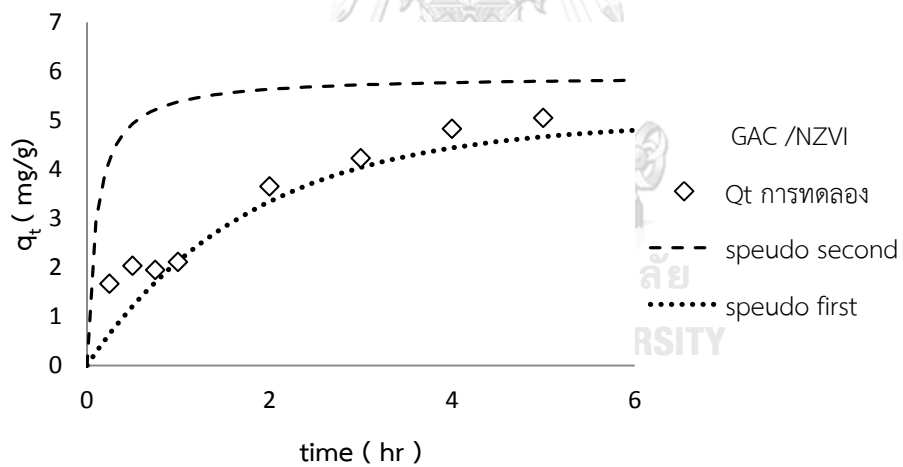
ภาพที่ 4.36 การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ PAC



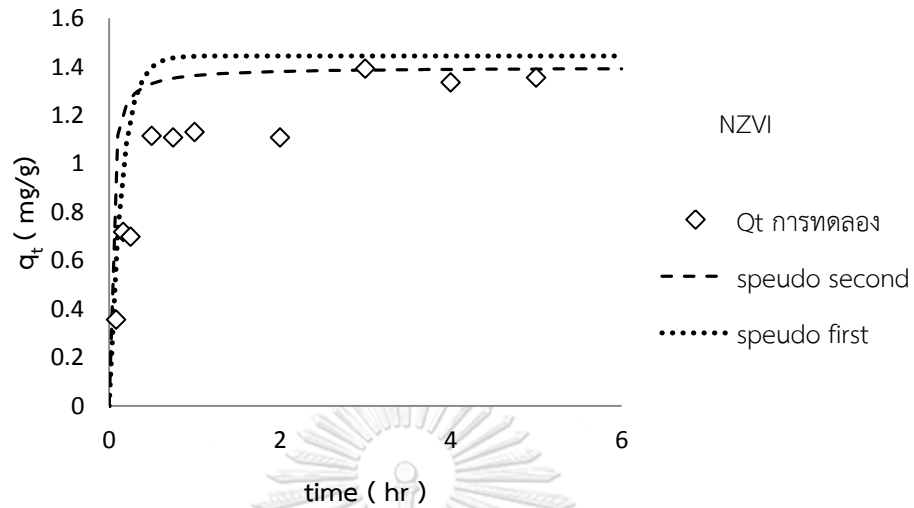
ภาพที่ 4.37 การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ GAC



ภาพที่ 4.38 การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.39 การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ GAC/NZVI



ภาพที่ 4.40 การเปรียบเทียบสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ของ NZVI

ตารางที่ 4-7 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดซับของ DCAN ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวกลาง ดูดซับ	Pseudo First Order			Pseudo Second Order					
	R^2	K_1 (h^{-1})	q_e	R^2	K_2 ($g/mg \cdot h$)	q_e (ทดลอง) (mg/g)	q_e (คำนวณ) (mg/g)	h ($mg/g \cdot h$)	$T_{0.5}$ (h)
PAC	0.644	0.468	4.260	1.000	1.893	12.159	12.194	317.01	0.043
GAC	0.927	1.338	12.02	0.968	0.144	11.035	12.318	21.85	0.564
PAC/NZVI	0.831	1.358	3.128	0.997	1.470	7.090	7.407	80.65	0.092
GAC/NZVI	0.987	0.557	4.975	0.964	1.694	5.337	5.916	59.29	0.100
NZVI	0.941	6.908	1.445	0.993	28.57	1.354	1.398	55.84	0.025

$$h = \text{the initial adsorption rate} = K_2 \cdot q_e^2$$

4.2.2 การศึกษากลไกการดูดซับไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอล

การศึกษากลไกการดูดซับไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอลโดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคตั้งสมการ

$$q_t = k_{ip} t^{0.5} + C$$

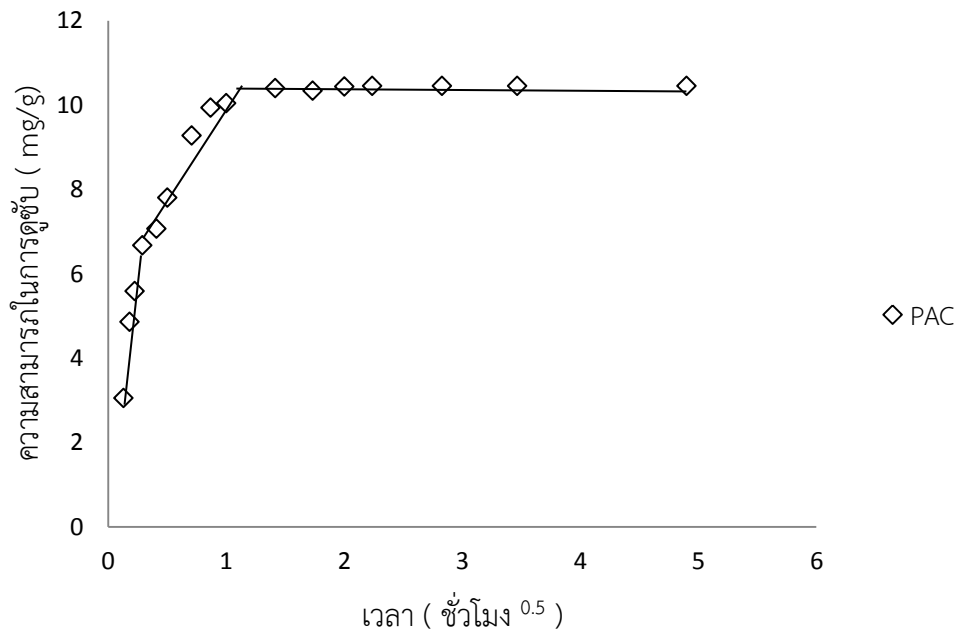
โดย K_{ip} คือค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาค ($\text{mg g}^{-1} \cdot \text{hr}^{-0.5}$)

ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.41-4.45 กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอลกับตัวกลางดูดซับชนิด PAC, GAC, PAC/NZVI, GAC/NZVI และ NZVI มี 3 ขั้นตอน ประกอบด้วยขั้นที่หนึ่งเป็นขั้นตอนการแพร่ผ่านของไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอลเข้าสู่ชั้นของของเหลว เข้าสู่ผิวหน้าของตัวกลางดูดซับแสดงให้เห็นเป็นความชันที่แรก ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว เมื่อเทียบกับอัตราการดูดซับในขั้นที่สองแสดงให้เห็นเป็นความชันที่สอง ซึ่งขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวกลางดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ และขั้นตอนที่สามเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอลติดที่ผิวของตัวกลางดูดซับซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วมากจึงไม่เกิดความชันที่เปลี่ยนแปลง

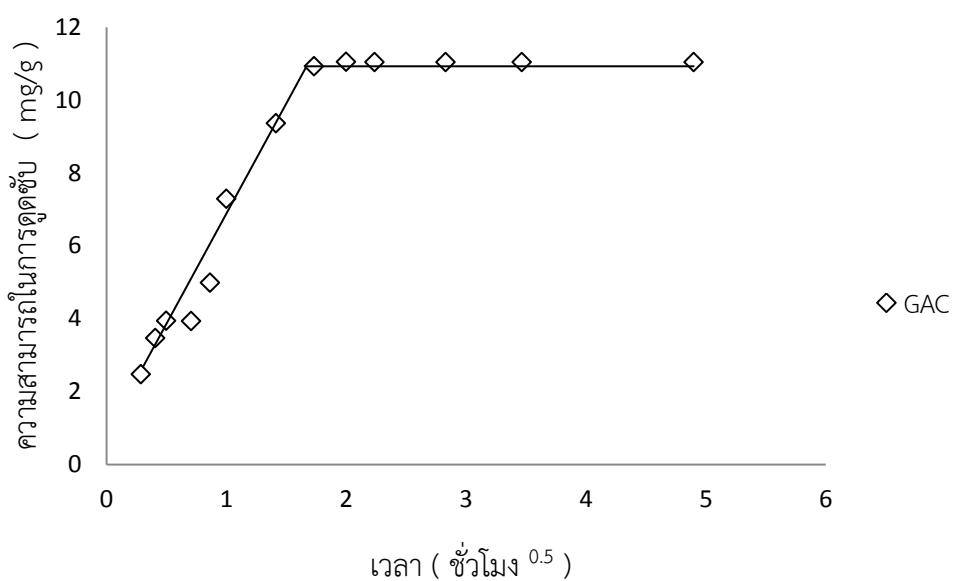
จากรูปที่ 4.41-4.45 จึงเป็นที่ชัดเจนว่าการแพร่ของไดคลอโรอะซิโตนไนด์รอลเข้าสู่รูพรุนของ PAC, GAC/NZVI และ NZVI เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วการดูดซับในช่วงความชันที่สองมีค่าต่ำกว่าช่วงความชันแรก ส่วน GAC และ PAC/NZVI พบความชันเพียงช่วงเดียวซึ่งการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของเหลวรอบอนุภาคตัวกลางดูดซับอาจเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับได้

การคำนวณหาค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาคแสดงดังตารางที่ 4-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า K_{ip1} มากกว่า K_{ip2} สำหรับตัวกลางดูดซับชนิด GAC, PAC/NZVI ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นเพียง 2 ขั้นตอน เนื่องจากมาจากตัวกลาง GAC มีพื้นที่ผิวน้อย ทำให้การแพร่เข้าสู่ชั้นของของเหลวเกิดขึ้นช้ามาก เมื่อเกิดการแพร่ภายในรูพรุน ซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่าแต่ถูกจำกัดโดยขั้นตอนแรกจึงไม่เกิดความชันที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสำหรับตัวกลาง GAC นั้นการแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ ส่วนในกรณีของ PAC/NZVI มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคเล็กขนาดนาโนบน

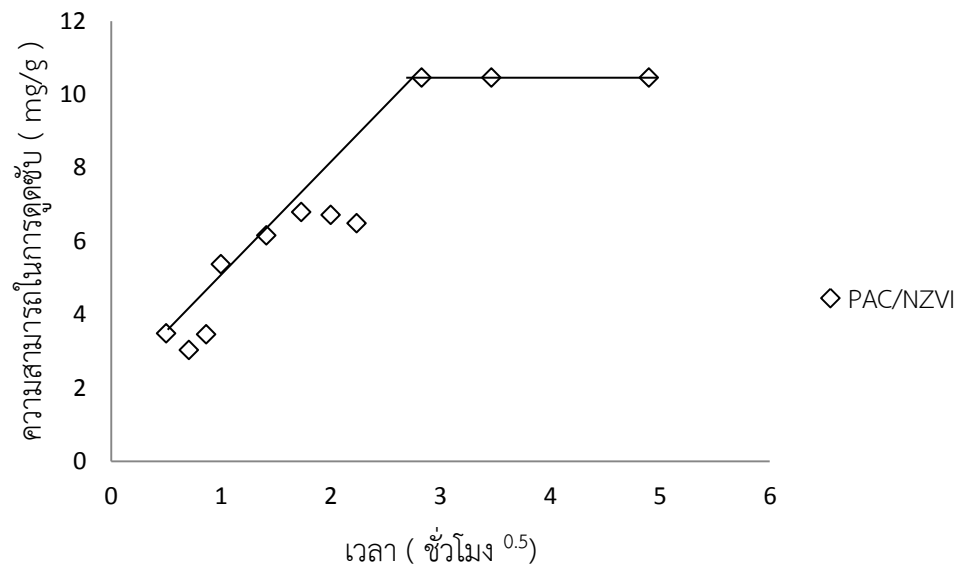
พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ การแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มจึงเกิดขึ้นเร็วทำให้เห็นเพียงความชันของขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าขั้นตอนการแพร่เข้าสู่รูพรุนเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับสำหรับตัวกลาง PAC/NZVI



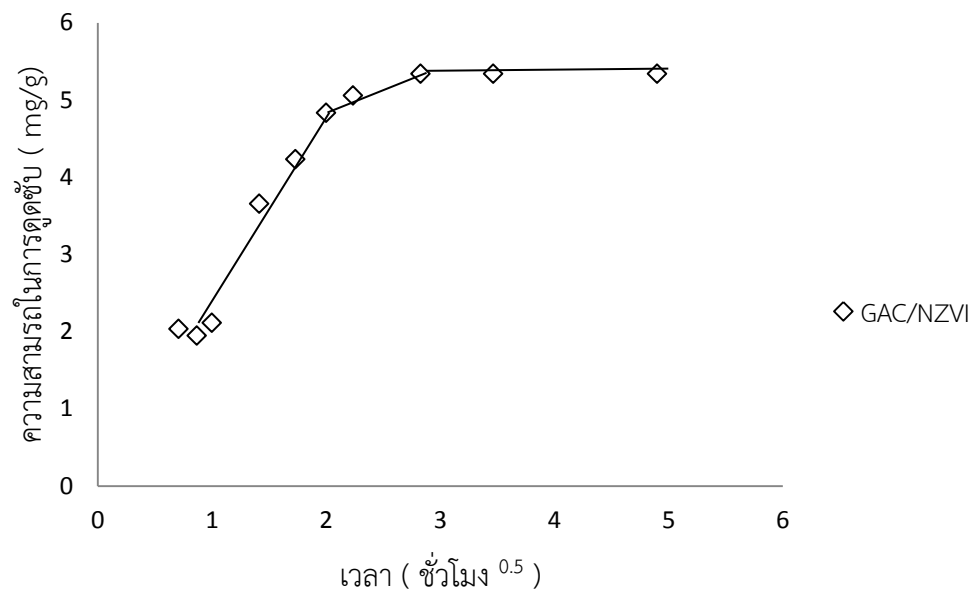
ภาพที่ 4.41 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ PAC



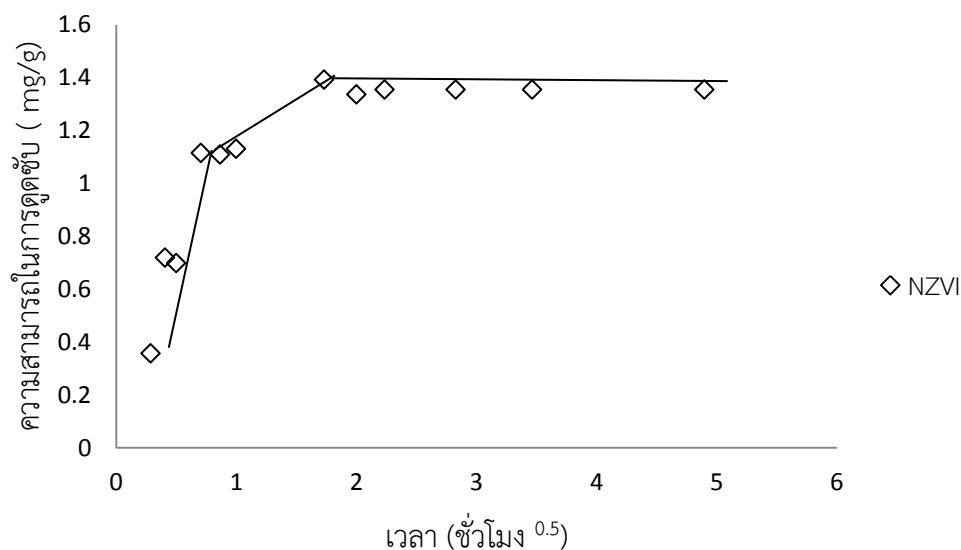
ภาพที่ 4.42 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC



ภาพที่ 4.43 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ PAC/NZVI



ภาพที่ 4.44 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC/NZVI



ภาพที่ 4.45 กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาคของ GAC/NZVI

ตารางที่ 4-8 ค่าคงที่กลไกการดูดซับ DCAN โดยแบบจำลองการแพร่ภายในอนุภาค

ตัวกลางดูดซับ	Region 1		Region 2	
	K_{ip1}	C	K_{ip2}	C
PAC	22.16	2.71	5.24	5.18
GAC	5.96	2.72	-	-
PAC/NZVI	2.77	3.49	-	-
GAC/NZVI	2.26	1.46	0.59	3.69
NZVI	1.70	0.31	0.24	0.90

4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์

ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ 5 ชนิด ด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ และเปรียบเทียบผลการดูดซับกับผลการศึกษาสมบัติของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ สารฮาโลอะซีโตไนไตรล์เป็นสารที่ไม่แตกตัวและมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ แต่สารกลุ่มนี้ยังคงมีความสามารถในการละลายน้ำอันเนื่องมาจากสภาพความเป็นขั้วของโครงสร้างโมเลกุล จากการคำนวณสภาพขั้วของโครงสร้างโมเลกุล (Dipole Charges) (ดังตารางที่ 4-9) และคุณสมบัติทาง

ประจุของพื้นผิวตัวกลางดูดซับแต่ละชนิด (แสดงดังตารางที่ 4-3) คาดว่ากลไกการดูดซับที่อาจเกิดขึ้นระหว่างมลสารกับตัวกลางดูดซับมี 2 แบบ คือ แรงทางประจุไฟฟ้าระหว่างไอออนและคู่ขั้ว (ion - dipole electrostatic force) เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับสามารถแตกตัว (+/-) ที่ค่าพีเอชต่างกัน ทำให้สามารถเกิดแรงระหว่างไอออนนั้นกับประจุตรงข้าม (Dipole Charges) ที่อยู่ในโมเลกุลของมลสาร และอีกกลไกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ยกตัวอย่างในกรณีการดูดซับที่พีเอช 7 พื้นผิวตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิดมีแนวโน้มเป็นประจุบวก (+) ทำให้คาดการณ์ได้ว่าการดูดซับน่าจะเกิดขึ้นจากส่วน C(1), C(2) และ N(3) ของสารกลุ่ม HANs ซึ่งมีค่า Dipole Charges เป็นลบ

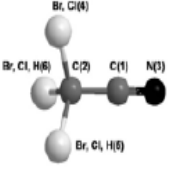
ไอโซเทอร์มของการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด แบบเดียว โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 4.46-4.51 พบว่า การดูดซับ DCAN บน ตัวกลางชนิด ถ่านกัมมันต์ชนิดผง PAC ดูดได้ดีที่สุด ตามด้วย GAC , GAC/NZVI , Pac/NZVI และ NZVI ตามลำดับ เช่นเดียวกับ ผลการดูดซับของ TCAN และ MCAN ส่วน ผลการดูดซับของ MBAN ของตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดผง PAC ดูดซับได้ดีที่สุด ตามด้วย GAC , PAC/NZVI , NZVI และ GAC/NZVI ตามลำดับ ในส่วนของผลการดูดซับ DBAN ของตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดผง PAC ดูดซับได้ดีที่สุด ตามด้วย GAC , PAC/NZVI GAC/NZVI ตามลำดับ

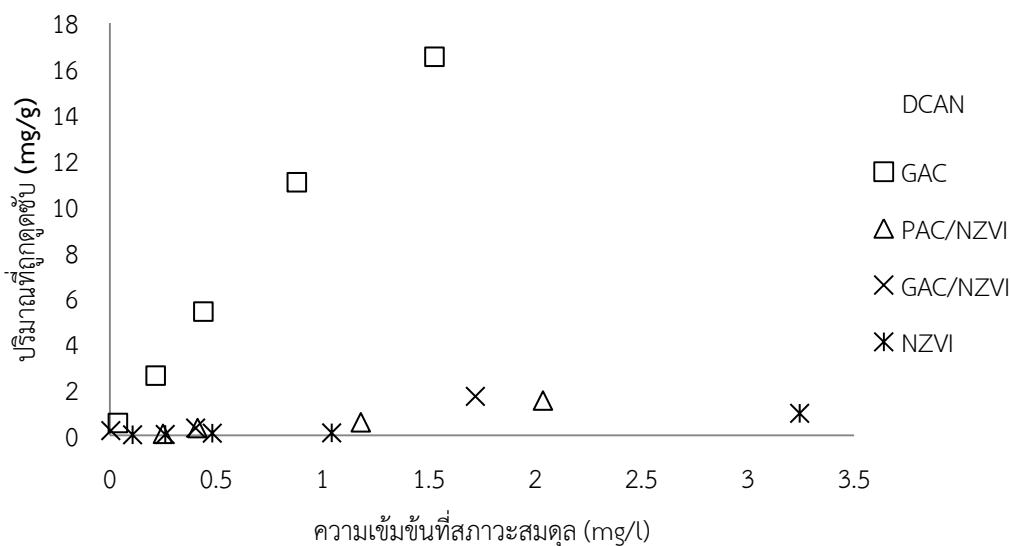
จากผลการดูดซับสามารถกล่าวได้ว่า PAC ซึ่งมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงสุดสามารถดูดซับ HANs ทุกชนิดได้สูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบกับ GAC ซึ่งเป็นวัสดุพื้นฐานเช่นเดียวกันแต่ก็มีความสามารถในการดูดซับ HANs ทุกชนิดน้อยกว่า PAC ซึ่งมีสาเหตุมาจากพื้นที่ผิวในการดูดซับที่น้อยกว่า (จากสภาพการเป็นเม็ดหรือเกล็ด) ส่วนการดูดซับ NZVI นั้นกลับทำให้พื้นที่ผิวภายในถ่านกัมมันต์ทั้งชนิด PAC และ GAC ลดน้อยลงอย่างมาก (มากกว่าร้อยละ 95) ซึ่งถึงแม้ว่า NZVI อาจมีประสิทธิภาพในการกำจัด HANs ได้เช่นเดียวกัน แต่บทบาทของพื้นที่ผิวการดูดซับเห็นได้ชัดว่ามีสูงกว่า NZVI อย่างแน่นอน

ในการศึกษาเปรียบเทียบลำดับความสามารถการดูดซับบนตัวกลางทั้ง 5 ชนิดได้แก่ PAC , GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI ในการดูดซับสารไตรคลอโรมีเทนจากภาพที่ 4.52 พบว่า ความสามารถบนตัวกลางดูดซับเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองสารกลุ่ม ฮาโลอะซิโตไนไตรล์ โดย PAC จะมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือ GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI ตามลำดับ ทั้งนี้นอกจากปัจจัยของพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแล้ว ในกรณีของการดูดซับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (NZVI) เข้าไปยังพบว่ามีความจำกัดในเรื่องของการเกิดปฏิกิริยากันระหว่าง NZVI กับ ออกซิเจนในอากาศจะทำให้จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของ NZVI ถูกจับกับวาเลนซ์วงนอกของ ธาตุออกซิเจนไปเป็นในรูป Fe_3O_4 , Fe_2O_3 หรือ $FeOOH$ ทำให้เกิดการ

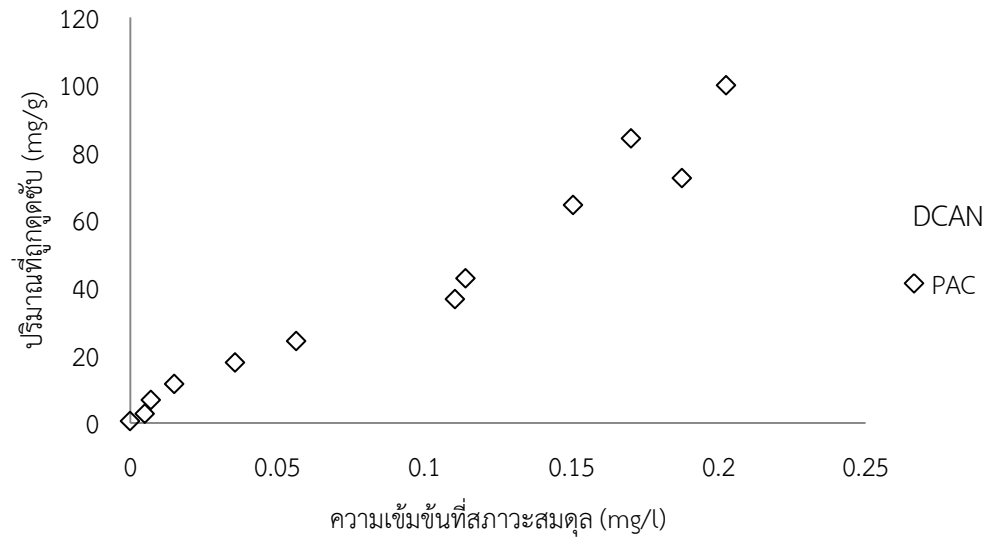
เสถียรของพันธะ จึงไม่สามารถจับกับสารแขวนวงนอกของสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ได้ จึงไม่เกิดการลดลงของกลุ่มสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ได้นั่นเอง

ตารางที่ 4-9 ค่าการกระจายตัวของประจุ (Dipole Charges) ในโมเลกุลของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ (พนิดา ปรารัตน์ ,2554)

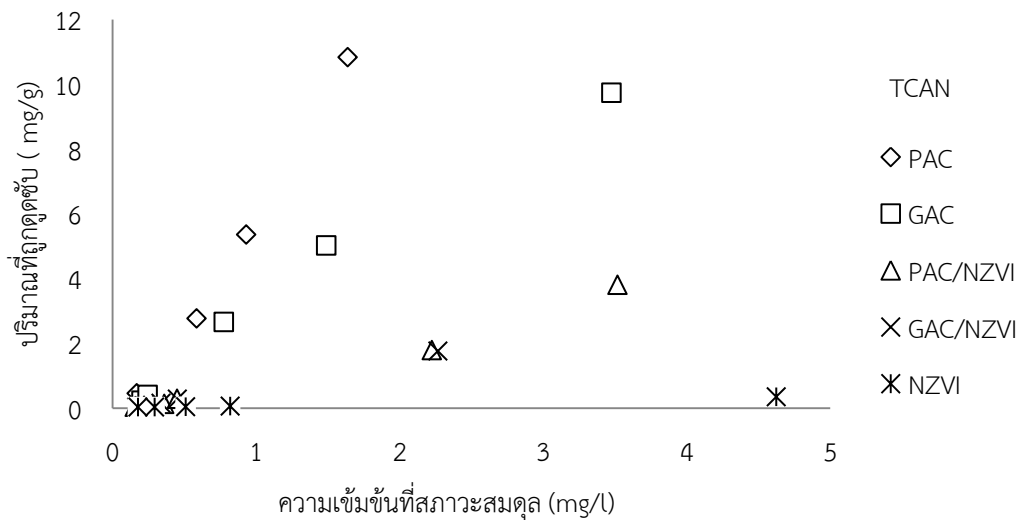
Molecular structure	Charge ^a									
	MCAN		MBAN		DCAN		DBAN		TCAN	
	C(1)	-0.1304	C(1)	-0.1205	C(1)	-0.1254	C(1)	-0.1089	C(1)	+0.1136
	C(2)	-0.1323	C(2)	-0.2513	C(2)	-0.0239	C(2)	-0.2460	C(2)	-0.1298
	N(3)	-0.0537	N(3)	-0.0542	N(3)	-0.0177	N(3)	-0.0219	N(3)	-0.0027
	Cl(4)	+0.0838	Cl(4)	+0.0094	Cl(4)	-0.0362	Cl(4)	+0.0633	Cl(4)	+0.0044
	H(5)	+0.2002	H(5)	+0.2083	H(5)	-0.0364	H(5)	+0.0632	H(5)	+0.0044
	H(6)	+0.2002	H(6)	+0.2083	H(6)	+0.2399	H(6)	+0.2504	H(6)	+0.0048
Water solubility (mg/ml)	100		50-100		10-50		50		<1	



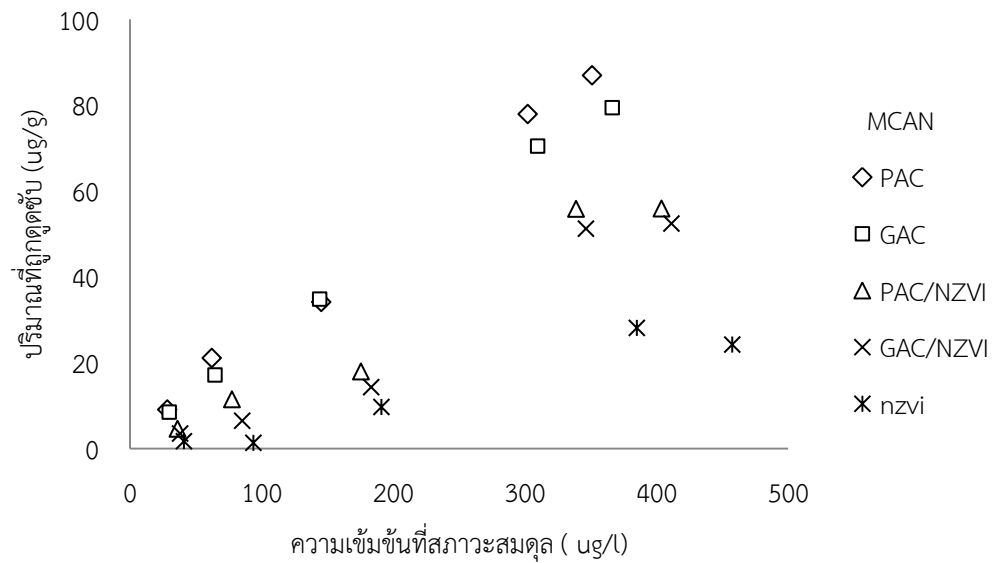
ภาพที่ 4.46 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับ 4 ชนิด (ไม่รวม PAC) โดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



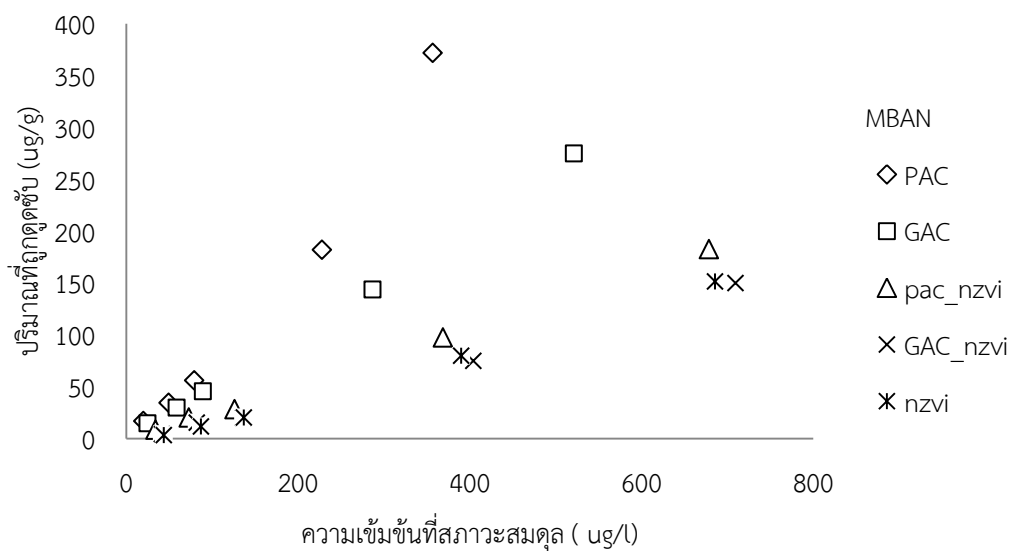
ภาพที่ 4.47 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของ PAC โดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



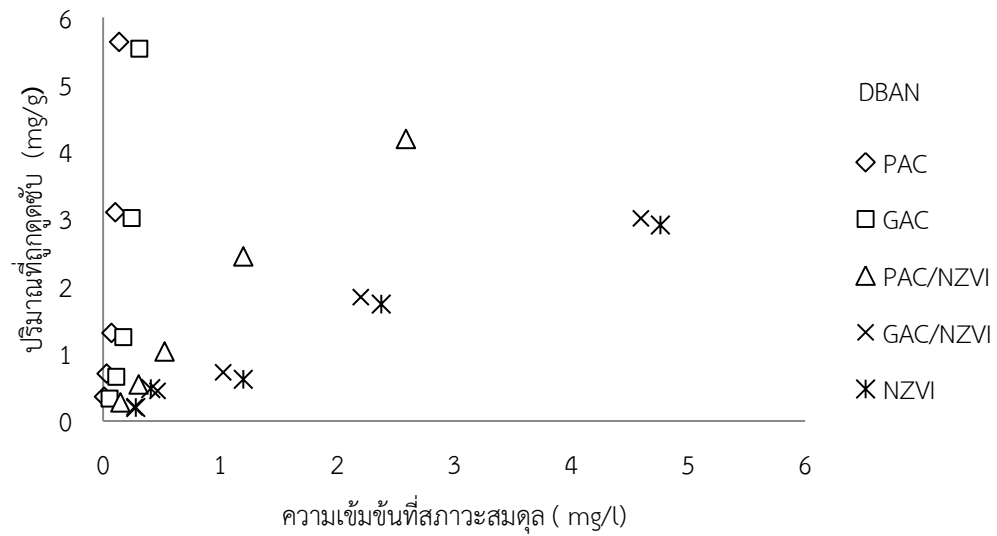
ภาพที่ 4.48 ไอโซเทอมการดูดซับ TCAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



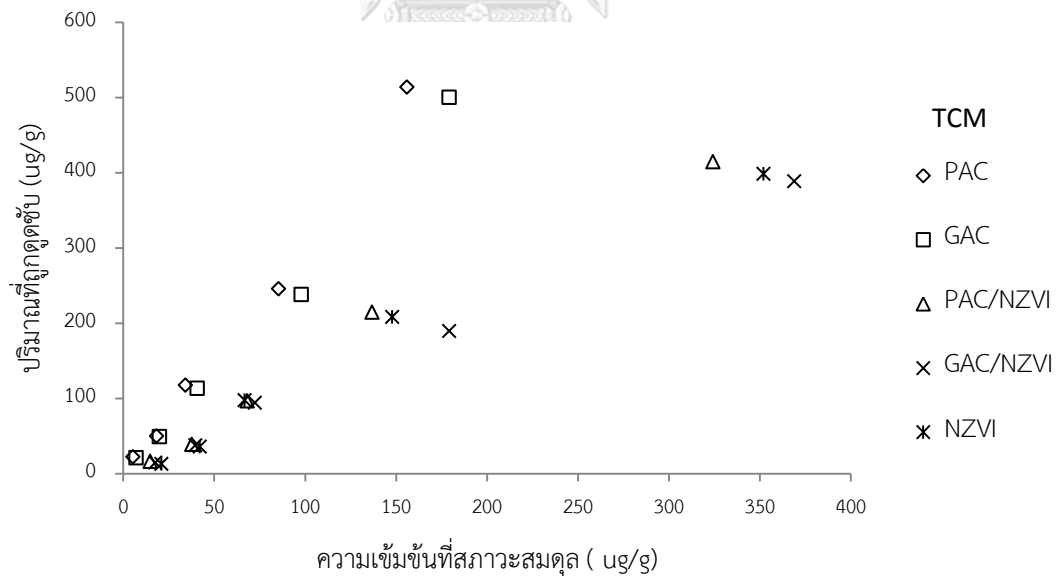
ภาพที่ 4.49 ไอโซเทอมการดูดซับ MCAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.50 ไอโซเทอมการดูดซับ MBAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.51 ไอโซเทอมการดูดซับ DBAN ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.52 ไอโซเทอมการดูดซับ ไตรคลอโรมีเทน (TCM) ของตัวกลางดูดซับ 5 ชนิดโดย ควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

4.4 ผลของโครงสร้างฮาโลอะซิโตไนไตรล์ต่อความสามารถในการดูดซับ

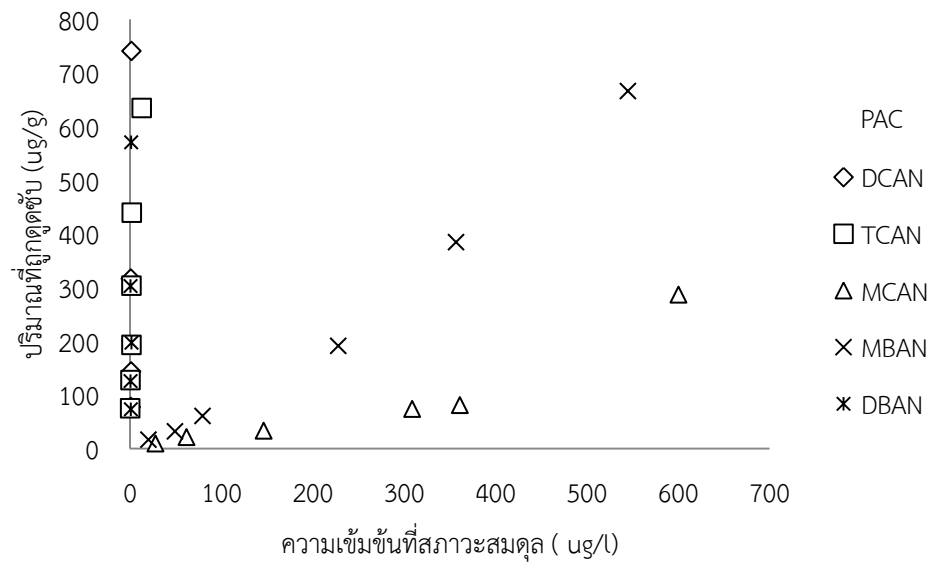
จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของตัวกลางถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆและอนุภาคเหล็กขนาดนาโน โดยพิจารณาจากความแตกต่างของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด แสดงผลดังภาพที่ 4.53-4.57

ความสามารถในการดูดซับอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องทำให้ความสามารถในการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ของตัวดูดซับแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคือความแตกต่างของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด และจำนวนอะตอมของธาตุฮาโลเจนในโมเลกุลไม่เท่ากัน จึงนำไปสู่การศึกษาผลของความแตกต่างของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ เช่นความสามารถในการละลายน้ำ ความเป็นขี้ และอื่นๆ จากการทดลองพบว่า PAC, GAC, GAC/NZVI สามารถดูดซับ DCAN ,TCAN และDBAN ได้ดีสุดตามด้วย MBAN และ MCAN ขณะที่ PAC/NZVI สามารถดูดซับ DBAN ได้ดีที่ สุด ตามด้วย TCAN , DCAN , MCANและ MBAN ตามลำดับ ส่วน NZVI สามารถดูดซับ DBAN ได้สูงที่สุด รองลงมา คือ MCAN , MBAN , TCAN และ DCAN ตามลำดับ

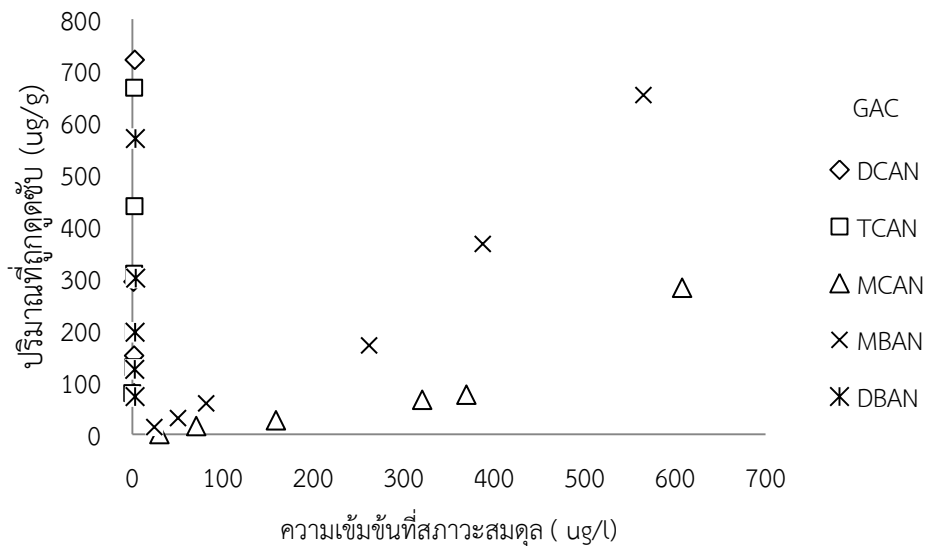
ในกรณี PAC และ GAC (ภาพที่ 4.53 และ 4.54) พบว่า MCAN และ MBAN สามารถดูดซับได้น้อย ซึ่งน่าจะมีผลมาจากความสามารถในการละลายน้ำของ MCAN และ MBAN ซึ่งมีความชอบน้ำสูงที่สุดในกลุ่ม HANs ทั้ง 5 ชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง MCAN ทั้งนี้พื้นที่ผิวของ PAC มีสภาพความไม่ชอบน้ำสูงอันเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายเช่นหมู่ฟีนอลิกประเภทต่างๆ

ในกรณี PAC/NZVI (ภาพที่ 4.55) พบว่านอกจากความชอบน้ำของ MCAN และ MBAN จะขัดขวางการดูดซับเช่นเดียวกับ PAC และ GAC แล้ว ความสามารถในการดูดซับ HANs โดยรวมก็ลดลงอย่างมากซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการอุดตันรูพรุนของอนุภาคเหล็กนาโน แต่เป็นที่น่าสังเกต ในกรณี GAC และ GAC/NZVI เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับเพียงไม่มาก ซึ่งอาจเป็นเพราะพื้นที่ผิวภายในของ GAC สามารถเข้าถึงได้ยากอยู่แล้ว ทำให้การอุดตันเนื่องจากการต่อดิต NZVI ส่งผลกระทบบ้างเล็กน้อย

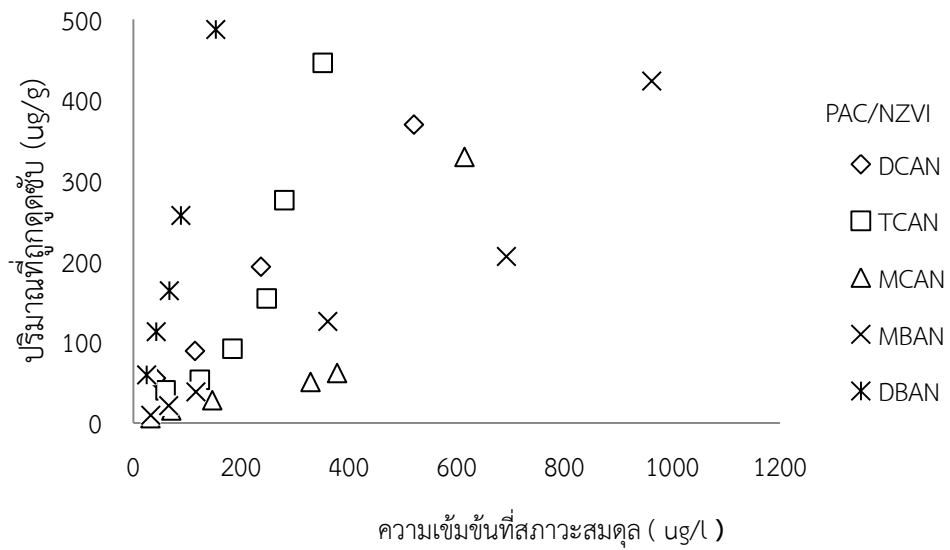
ในกรณี NZVI (ภาพที่ 4.57) ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการละลายน้ำกับประสิทธิภาพการดูดซับเด่นชัด และตารางที่ 4-10 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ของไอโซเทอมการดูดซับชนิดแลงเมียร์ ฟรุนดริช และเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับ HANs บนตัวกลางทั้ง 5 ชนิด

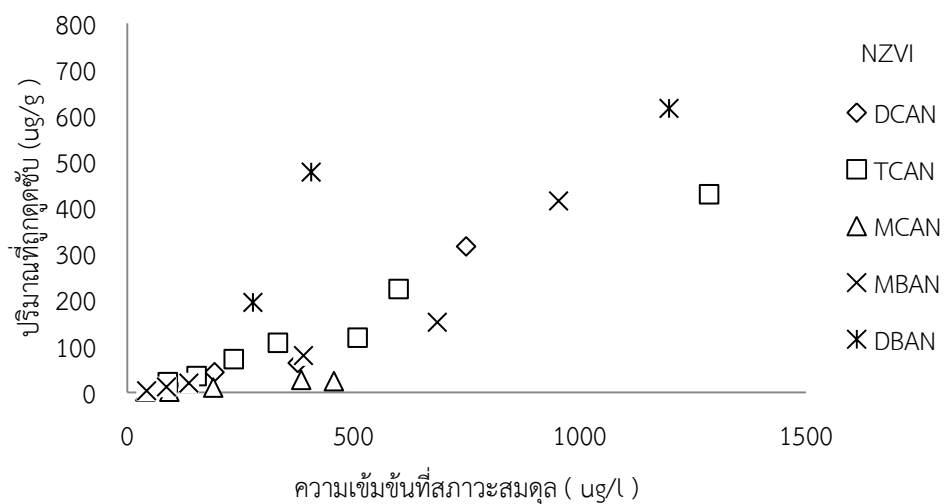


ภาพที่ 4.53 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ต่อความสามารถในการดูดซับของ PAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.54 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซิโตไนไตรล์ต่อความสามารถในการดูดซับของ GAC โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง





ภาพที่ 4.57 เปรียบเทียบผลของโครงสร้างของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ต่อความสามารถในการดูดซับของ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7, ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-10 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฮาโลอะซีโตไนไตรล์โดยตัวกลางดูดซับทั้ง 5 ชนิด

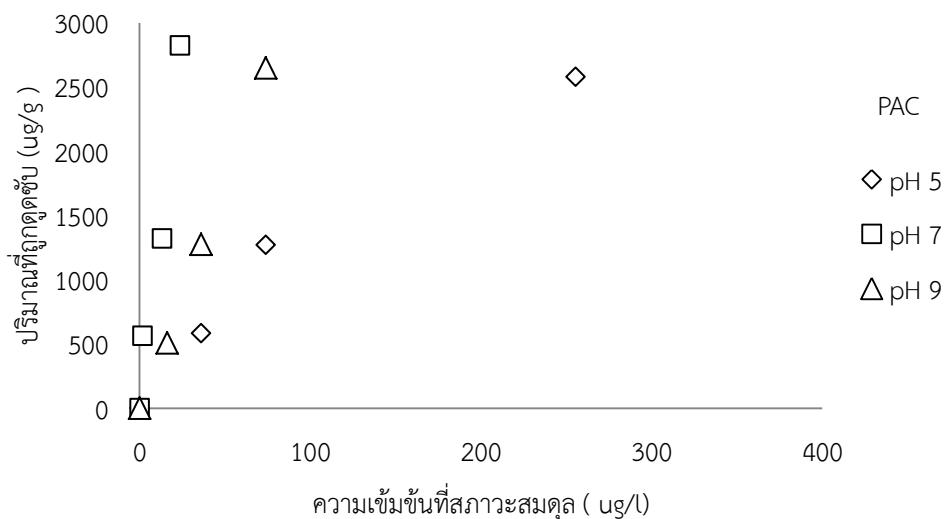
ตัวกลางดูดซับ	linear			langmuir			Freudlich		
	kp	C	R ²	K _L	q _m	R ²	K _f	1/n	R ²
PAC									
DCAN	499.7	1.149	0.873	1.218	-	0.091	300.6	0.870	0.828
TCAN	6.896	0.110	0.983	1.267	13.174	0.451	6.203	0.433	0.933
MCAN	0.241	0.003	0.994	0.91	0.35	0.504	0.214	0.878	0.989
MBAN	0.778	-	0.999	0.1	7.962	0.014	0.694	0.947	0.987
DBAN	17.24	0.149	0.999	2.051	12.95	0.466	11.62	0.763	0.979
GAC									
DCAN	10.891	0.457	0.991	0.121	107.95	0.661	11.621	0.954	0.999
TCAN	2.883	0.133	0.984	0.115	-	0.254	2.752	1.214	0.976
MCAN	0.212	0.003	0.998	0.825	0.341	0.941	0.198	0.896	1.000
MBAN	0.524	-	0.999	0.063	8.432	0.051	0.495	0.974	0.998
DBAN	6.913	0.1487	0.9965	0.577	16.65	0.397	6.140	0.823	0.983
PAC/NZVI									

DCAN	677.249	0.048	0.999	45.20	16.97	0.938	545.8	0.958	1.000
TCAN	0.867	0.070	0.998	0.343	4.371	0.508	0.953	0.774	0.973
MCAN	0.144	0.000	0.947	0.737	0.233	0.099	0.103	0.785	0.907
MBAN	0.271	-	0.999	-	-	0.157	0.266	1.022	0.996
DBAN	1.573	0.125	0.999	0.129	16.23	0.810	3.690	2.060	0.999
GAC/NZVI									
DCAN	0.404	0.056	0.998	0.074	-	0.656	0.497	0.792	0.979
TCAN	0.804	0.015	0.995	0.147	6.765	0.072	0.662	0.602	0.797
MCAN	0.137	-	0.928	0.217	-	0.007	0.088	0.818	0.777
MBAN	0.212	-	0.993	0.164	-	0.086	0.186	0.997	0.983
DBAN	0.624	0.083	0.996	0.096	9.029	0.597	0.530	1.959	0.993
NZVI									
DCAN	0.106	0.016	0.991	0.213	0.881	0.364	0.135	1.446	0.953
TCAN	0.073	0.105	0.999	1.275	0.499	0.917	0.214	0.272	0.757
MCAN	0.045	0.007	0.878	6.138	0.035	0.955	0.044	0.556	0.972
MBAN	0.217	-	0.978	0.004	54.79	0.000	0.009	1.586	0.720
DBAN	0.556	0.152	0.986	0.194	5.309	0.654	0.800	0.745	0.983

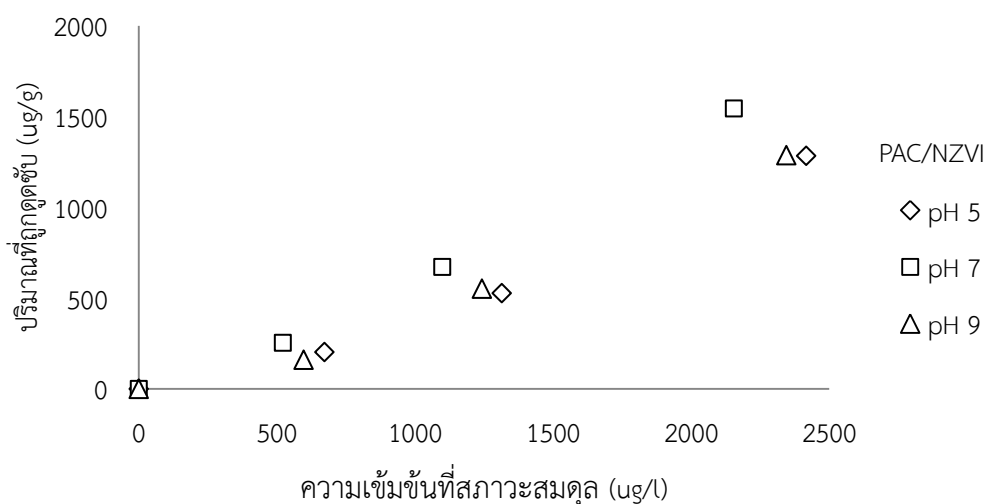
4.4.1 ผลพีเอช

จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ DCAN โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5, 7 และ 9 ด้วยตัวกลางดูดซับ PAC, PAC/NZVI และ NZVI แสดงดังภาพที่ 4.55-4.57 พบว่าการดูดซับ DCAN จะถูกดูดได้ดีที่พีเอช 7 เนื่องจากที่พีเอช 7 พื้นผิวของ PAC, PAC/NZVI, NZVI แตกตัวเป็นบวก (+) และการมีธาตุฮาโลเจนอยู่โมเลกุลของสารนั้นจะทำให้ขั้วลบ (-) ของอะตอมที่ C(1) C(2) และ N(3) มีบทบาทในการดูดซับสูงขึ้น (ตารางที่ 4.9) แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีพีเอช 5 ซึ่งพื้นผิวดูดซับมีแนวโน้มเป็นประจุ + เช่นเดียวกันกับมีความสามารถในการดูดซับลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อพีเอชของน้ำลดลงทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของ DCAN สูงขึ้นเนื่องจากการมี Hydronium ion (H^+) สูงขึ้น และเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของ DCAN สูงขึ้นย่อมทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวกลางดูดซับที่ไม่ชอบน้ำ เช่น PAC และ PAC/NZVI ลดลง ส่วนในกรณี NZVI ซึ่งมีพื้นผิวที่มีความชอบน้ำสูงพบการลดลงของการดูดซับ

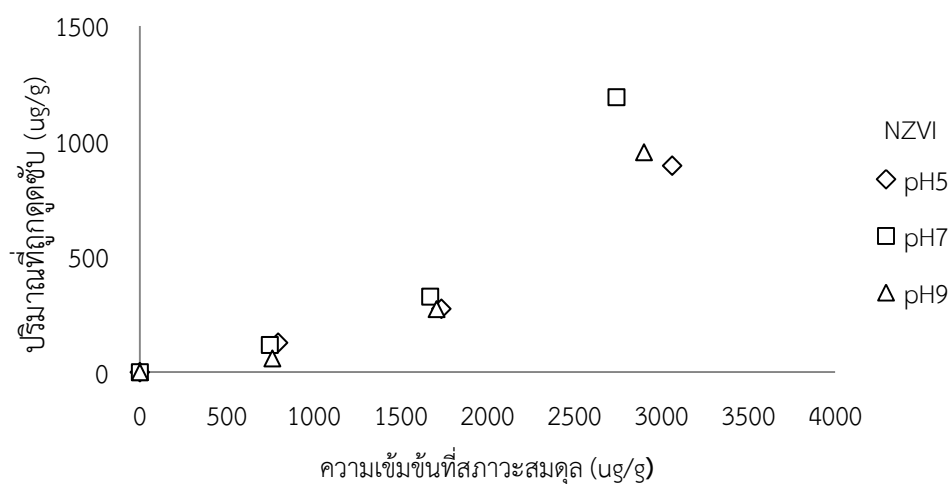
DCAN ที่พีเอช 5 ไม่มากนัก นอกจากนี้ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของฮาโลอะซีไตโนไตรัลด้วยตัวกลางดูดซับ PAC , PAC/NZVI และ NZVI แสดงดังตารางที่ 4-11



ภาพที่ 4.58 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ PAC ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.59 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ PAC/NZVI ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.60 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ DCAN ของ NZVI ที่ pH เท่ากับ 5,7 และ 9 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-11 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของไดครอโรอะซิโตนไตรัลด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอช 5,7 และ 9

ตัวกลาง	Liner isotherm								
	pH 5			pH 7			pH 9		
DCAN	kp	C	R ²	kp	C	R ²	kp	C	R ²
PAC	12.61	0.166	0.998	35.51	2.342	0.819	20.51	0.870	0.982
PAC/NZVI	0.290	0.225	0.983	0.534	0.196	0.996	0.213	0.437	0.976
NZVI	0.178	0.239	0.963	0.343	0.104	0.999	0.241	0.020	0.990

4.5 การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์

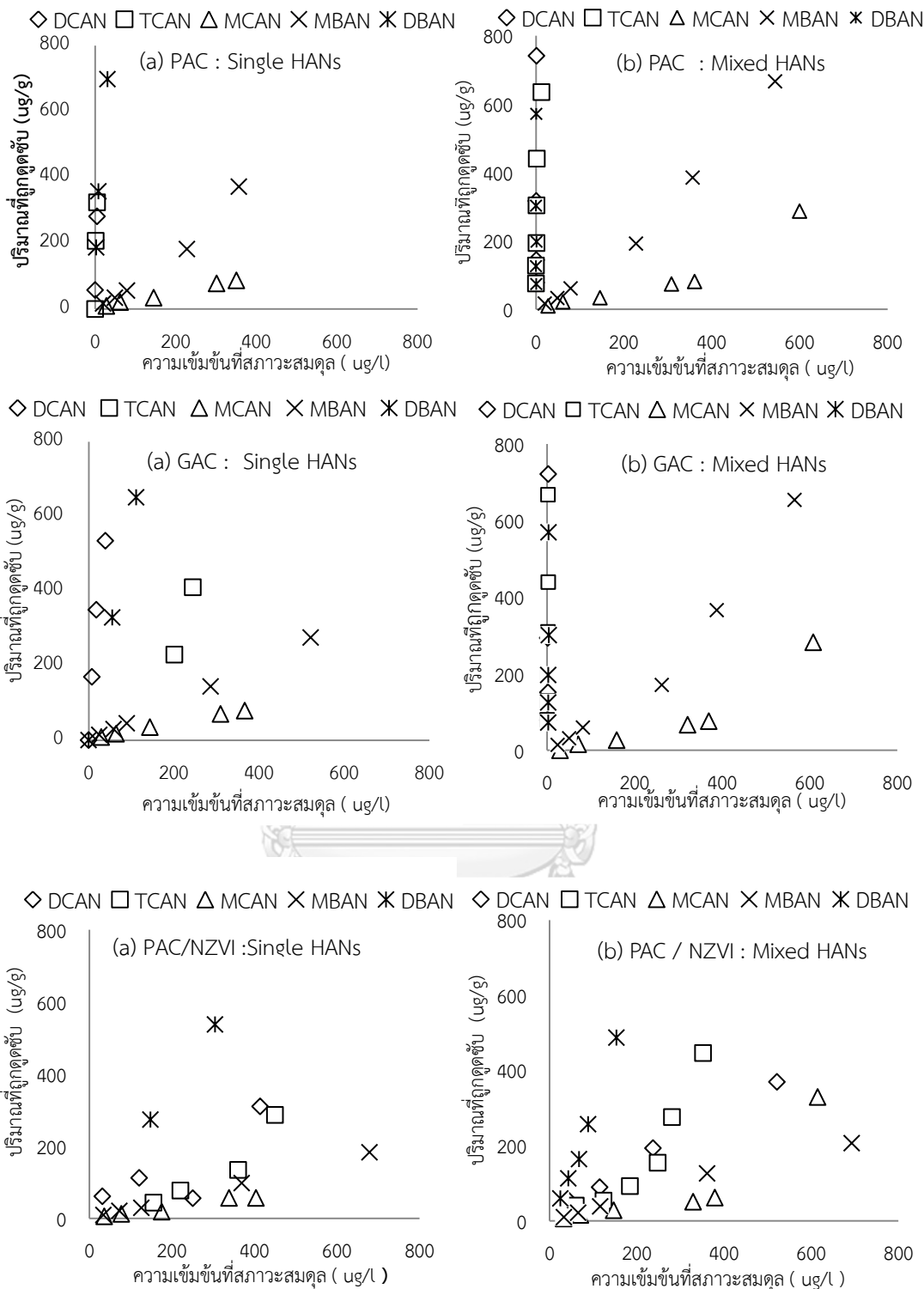
การศึกษาสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับโดยใช้สารละลายผสมของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด (HANs) ดูดซับด้วยตัวกลางชนิดต่างๆ โดยจะทำการศึกษาในกรณี 2 กรณีคือ ควบคุมพีเอช เท่ากับ 7 ในน้ำกลั่นและน้ำประปาจริง

4.5.1 กรณีการดูดซับแบบคัดเลือกในน้ำกลั่นโดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 7

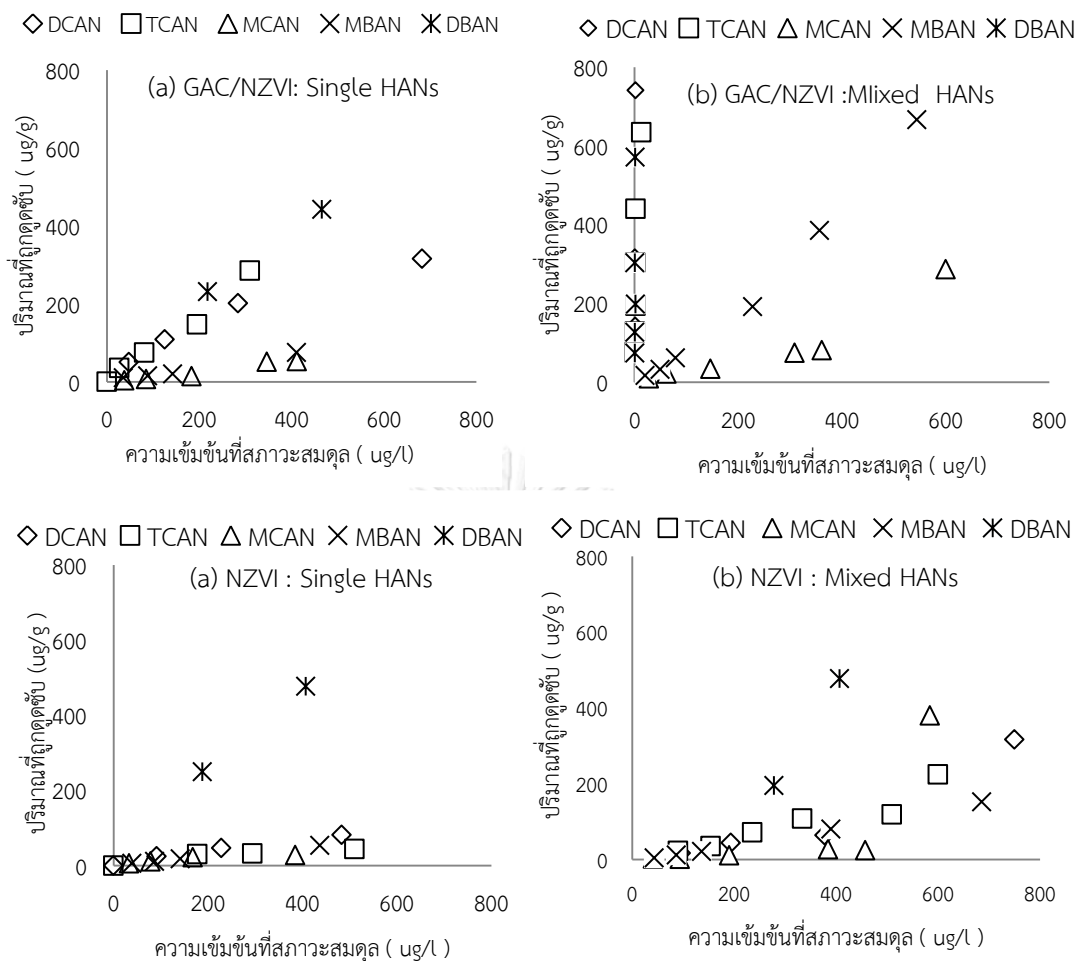
ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.61-4.62 และค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงดัง ตารางที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่าตัวกลาง PAC , GAC และ GAC/NZVI ให้ผลการทดลองใน กรณีแบบผสมเช่นเดียวกับกรณีแบบเดี่ยว คือสามารถดูด DCAN ,TCAN และ MBAN มากที่สุด ตามลำดับ รองลงมาคือ MBAN และ MCAN ตามลำดับ ส่วน PAC/NZVI ให้ผลการทดลองคือดูดซับ สาร DBAN ได้มากที่สุด รองลงมาคือ TCAN , DCAN , MCAN และ MBAN ตามลำดับ ขณะที่ NZVI มีการดูดซับที่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั้ง 5 สาร

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฮาโลอะซีโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิดแบบผสม (HANs) กับ ฮาโลอะซีโตไนไตรล์แบบเดี่ยวซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.61-4.62 พบว่าปริมาณ การดูดซับ (q_e) ของ HANs บนพื้นผิวของ PAC , GAC และ GAC/NZVI ลดลงเล็กน้อยเมื่อ เปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบเดี่ยว แสดงให้เห็นว่า HANs เกิดการแย่งชิงพื้นที่ในการดูดซับทำให้ ความสามารถของตัวกลางดูดซับทั้ง 3 ชนิดลดลง ในขณะที่ปริมาณการดูดซับ (q_e) ของ HANs บน พื้นผิวของตัวกลาง PAC/NZVI มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองแบบเดี่ยว อาจเป็นเพราะหมู่ฟังก์ชัน บนพื้นผิวของ PAC มีความจำเพาะกับฮาโลอะซีโตไนไตรล์รวมถึงความเข้มข้นที่ทำการศึกษาคอนข้าง ต่ำ ซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ PAC ยังคงมี ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงอยู่ จึงทำให้ความสามารถใน การดูดซับในแบบเดี่ยวและแบบผสมไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการคัดเลือกการดูดซับของตัวกลางดูดซับระหว่างแบบผสมกับ แบบเดี่ยว พบว่า ลำดับของความสามารถในการดูดซับ (adsorption order) HANs ในแบบผสมมี ลำดับเช่นเดียวกันกับในแบบเดี่ยว กล่าวคือ DCAN , TCAN และ DBAN ถูกดูดซับได้มากที่สุดบน PAC และ GAC ซึ่งสมบัติการคัดเลือกสัมพันธ์กับปริมาณของโบรโมและคลอโรอะตอมของฮาโลอะซี โตไนไตรล์ ขณะที่ DBAN ถูกดูดซับได้ดีที่สุดบนตัวดูดซับ PAC/NZVI และ NZVI ซึ่งสมบัติการ คัดเลือกสัมพันธ์กับปริมาณของโบรโมอะตอมของฮาโลอะซีโตไนไตรล์



ภาพที่ 4.61 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ HANs ในกรณีสารละลายเดี่ยว (a) และ สารละลายผสม (b) ของ GAC/NZVI ที่ pH 7 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.62 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ HANs ในกรณีสารละลายเดี่ยว (a) และ สารละลายผสม (b) ของ GAC/NZVI ที่ pH 7 โดยควบคุม ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

4.5.2 กรณีใช้น้ำประปา

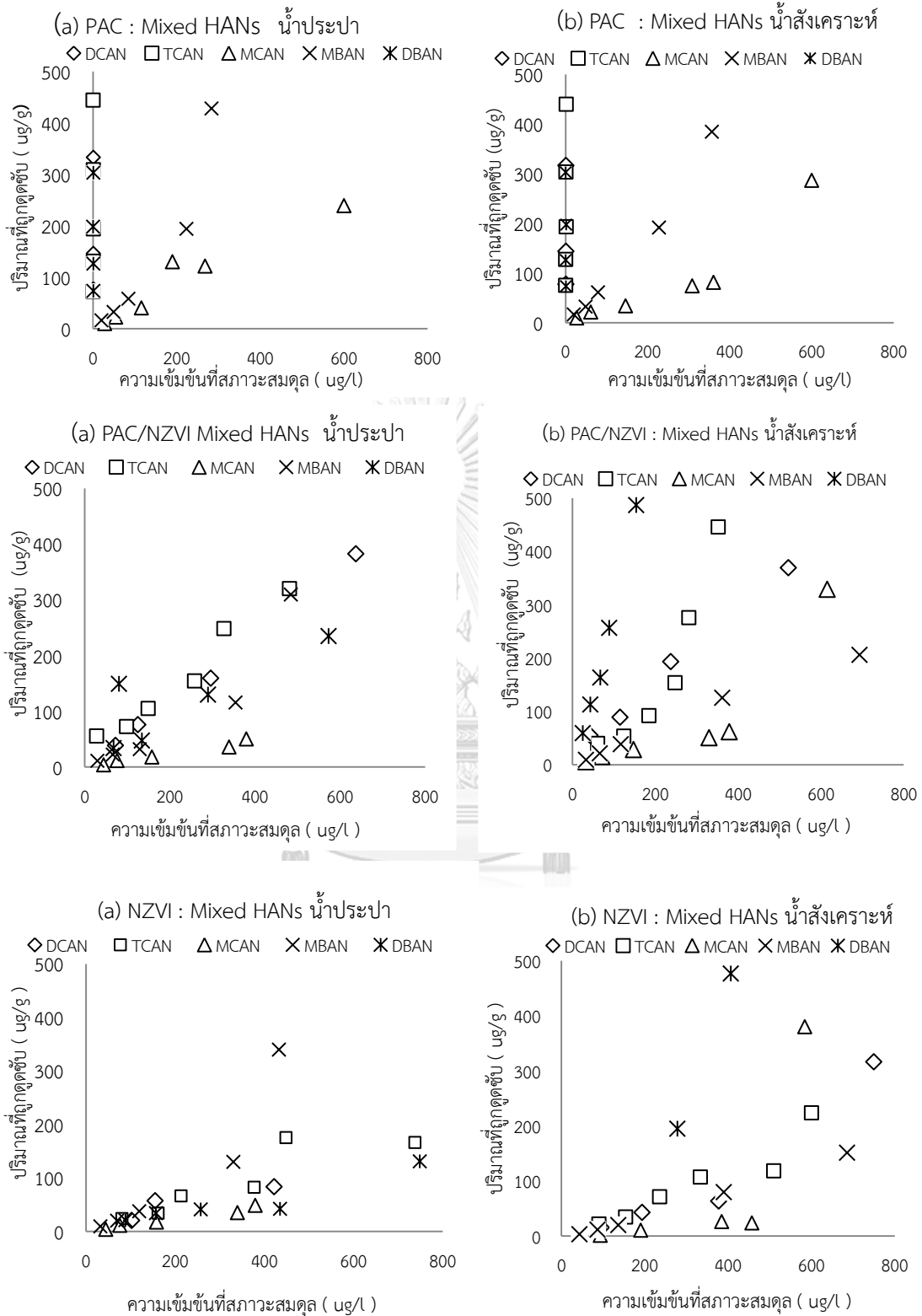
ผลการทดลองสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ HANs ในสารละลายผสมของ PAC, PAC/NZVI และ NZVI ในน้ำประปาจริง แสดงดังภาพที่ 4.63 และค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงดังตารางที่ 4.13 พบว่าความสามารถในการดูดซับ HANs แบบผสมในน้ำประปาเปรียบเทียบกับในน้ำกลั่นของ PAC, PAC/NZVI และ NZVI ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จากผลการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของไอออน (IS) ในน้ำประปาพบว่าค่า IS ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบ IS ในกรณีน้ำประปามีค่าน้อยกว่าประมาณ 2 เท่า ตารางที่ 4.12 ซึ่งโดยทั่วไป IS ส่งผลกระทบต่อกลไกการดูด

ซับด้วยแรงทางประจุไฟฟ้า (electrostatic force) (Bjelopavlic และคณะ, 1999) ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่สมดุล(q_e) ลดลง อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนเอกสารพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับ (q_e) ไม่แตกต่างกันมากนักที่ค่า IS ต่ำในช่วง (0-50 mM) (Yu และคณะ, 2008) ดังนั้นอาจสรุปได้ว่า การมีอยู่ของไอออนในน้ำประปากระทบต่อสมบัติการคัดเลือกของ PAC , PAC/NZVI และ NZVI ไม่มากนัก แต่หากพิจารณาอย่างละเอียดพบว่า PAC มีความสามารถในการดูดซับ DCAN , DBAN และ TCAN มีค่าเพิ่มเล็กน้อยในกรณีของน้ำประปา (Bjelopavlic และคณะ, 1999)

ตารางที่ 4-12 สมบัติของน้ำประปาและความเข้มข้นของอิเล็คโตรไลต์ในน้ำประปา (พนิดา ปรา - รัตน์ , 2554)

Parameters	น้ำประปา									
pH	7.16									
Conductivity ($\mu\text{mol cm}^{-1}$)	323									
TDS (mg L^{-1})	202									
Ionic strength (mM)	4.6									
Electrolytes (mg L^{-1})	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Br ⁻	Cl ⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
	23.57	1.34	32.06	1.73	ND	23.31	0.21	1.98	33.38	
Background HANs ($\mu\text{g L}^{-1}$)	DCAN	TCAN	MCAN	MBAN	DBAN					
	13	ND	0.3	ND	ND					

ND * ไม่พบค่าการตรวจวัด



ภาพที่ 4.63 ความสามารถในการดูดซับ HANs ในน้ำประปาจริงของ NZVI โดยควบคุม pH เท่ากับ 7 , ionic strength เท่ากับ 0.01 โมล/ลิตร และ อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-13 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงของฮาโลอะซีโตไนไตรล์ โดยเปรียบเทียบ
ในกรณีแบบเดี่ยว แบบผสมในน้ำกลั่นและแบบผสมในน้ำประปา

ตัวกลาง/ มลสาร	Linear isotherm								
	แบบเดี่ยว			ผสม (ในน้ำกลั่น)			ผสม (ในน้ำประปา)		
	kp	C	R ²	kp	C	R ²	kp	C	R ²
PAC									
DCAN	499.7	1.148	0.872	334.1	-	0.910	202.69	0.079	0.811
TCAN	6.895	0.110	0.983	0.163	0.027	0.752	140.86	0.149	0.030
MCAN	0.241	0.0029	0.993	0.215	0.004	0.993	0.398	-	0.971
MBAN	0.7782	-	0.9987	38.06	0.216	0.007	0.518	0.041	0.888
DBAN	17.235	0.148	0.999	0.378	0.031	0.858	18.58	0.100	0.925
GAC									
DCAN	10.89	0.457	0.990	61.58	0.120	0.948			
TCAN	2.882	0.132	0.984	144.1	-	0.875			
MCAN	0.212	0.003	0.998	0.485	-	0.860			
MBAN	0.524	-	0.999	0.646	0.080	0.999			
DBAN	6.913	0.148	0.996	260.1	-	0.480			
PAC/NZVI									
DCAN	677.2	0.047	0.999	0.771	0.006	0.994	0.588	-	0.998
TCAN	0.867	0.070	0.998	0.547	0.029	0.994	0.544	35.28	0.988
MCAN	0.144	0.003	0.946	0.155	4.715	0.993	0.125	-	0.991
MBAN	0.271	-	0.998	0.331	0.001	0.989	0.523	-	0.945
DBAN	1.572	0.124	0.999	3.362	0.039	0.991	0.315	46.40	0.664
GAC/NZVI									
DCAN	0.404	0.056	0.997	0.433	0.033	0.995			
TCAN	0.803	0.015	0.995	0.482	0.051	0.770			
MCAN	0.136	0.002	0.928	0.175	0.002	0.900			
MBAN	0.211	0.004	0.992	0.222	0.002	0.921			
DBAN	0.623	0.083	0.996	1.754	0.027	0.993			
NZVI									
DCAN	0.105	0.016	0.990	0.155	0.006	0.993	0.206	15.44	0.950
TCAN	0.073	0.105	0.998	0.219	0.016	0.894	0.244	9.304	0.953
MCAN	0.045	0.007	0.878	0.042	0.007	0.854	0.123	-	0.991
MBAN	0.217	-0.001	0.978	0.223	-0.004	0.990	0.439	11.56	0.841
DBAN	0.556	0.151	0.986	0.601	100.14	0.978	0.155	1.381	0.870

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการปรับแต่งตัวกลางดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ด้วยการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโน (AC/NZVI) โดยแบ่งเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC/NZVI) และถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC/NZVI) เพื่อศึกษาผลของการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโนบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดต่อประสิทธิภาพและกลไกการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ (haloacetonitriles , HANs) จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์และประสิทธิภาพในการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ โมโนคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (MCAN) , โมโนโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (MBAN) , ไดคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (DCAN) , ไตรโบรโมอะซิโตไนไตรล์ (DBAN) และ ไตรคลอโรอะซิโตไนไตรล์ (TCAN) ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ (0-500 ไมโครกรัมต่อลิตร) ที่พีเอช 7 และค่าความแรงประจุ 0.01 โมลาร์ และทำศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของ HANs ที่แตกต่างกันต่อสมบัติการดูดซับแบบคัดเลือกของตัวกลางดูดซับในสารละลายทั้งแบบเดี่ยวและแบบผสม

5.1.1 ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด บนพื้นผิวดูดซับชนิดถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโน

- จากการทดสอบจลนพลศาสตร์พบว่าอัตราการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ ใน 1 ชั่วโมงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลาประมาณ 3 ถึง 4 ชั่วโมง ส่วนการดูดซับโดย PAC จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในระยะเวลาเพียง 1 ถึง 2 ชั่วโมง การต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโนไม่สามารถทำให้อัตราการดูดซับของ PAC และ GAC เร็วขึ้น
- จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิดแบบเดี่ยวพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแบบเดี่ยวของตัวกลางดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับความสามารถในการละลายน้ำของ HANs โดย สาร MCAN และ MBAN มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำสุด
- จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับฮาโลอะซิโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ของ PAC , PAC/NZVI และ NZVI พบว่า DCAN จะถูกดูดซับได้ดีที่สุดที่พีเอช 7 เนื่องจาก แรงดึงดูดทางประจุและสภาพขั้ว

- ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ HANs ระหว่างแบบผสมและแบบเดี่ยว พบว่าปริมาณการดูดซับของ HANs แบบผสมบนพื้นผิวของ PAC , GAC และ PAC/NZVI ลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแบบเดี่ยว และอนุภาคเหล็ก NZVI มีความสามารถในการดูดซับ HANs ในแบบเดี่ยวและแบบผสมไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากความเข้มข้นที่ทำการศึกษาค่อนข้างต่ำซึ่งเป็นช่วงความเข้มข้นที่ PAC , GAC และ NZVI ยังคงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงเพียงพอในการดูดซับ HANs ทั้งหมด แต่พบว่า GAC/NZVI มีความสามารถในการดูดซับ HANs ทั้ง 5 ชนิดสูงขึ้นในกรณีสารละลายผสม

5.1.2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งต่อความสามารถในการดูดซับสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ทั้ง 5 ชนิด ของถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดอนุภาคเหล็กขนาดนาโน

- การต่อติด NZVI บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (GAC) และชนิดผง (PAC) ส่งผลทำให้รูพรุนของถ่านกัมมันต์เกิดการอุดตัน พื้นผิวภายในตัวกลางดูดซับและปริมาตรรูพรุนของตัวกลางดูดซับลดลงอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ลดลง

- การใช้ อนุภาคเหล็กขนาดนาโน (NZVI) นั้นจะให้ประสิทธิภาพอายุการใช้งานของอนุภาคต่อการสัมผัสกับอากาศ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) ไปอยู่ในรูป Fe_3O_4 , Fe_2O_3 และ $FeOOH$ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลง จากการศึกษากลไกการกำจัดสารฮาโลอะซีโตไนไตรล์ จากการทดลองพบว่าในการตรวจสอบกลไกในการกำจัดจาก การกระทำของ PAC , GAC , PAC/NZVI , GAC/NZVI และ NZVI ในการกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ จากการทดลองข้างต้น PAC มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด ยังพบอีกว่าการที่อนุภาคเหล็กขนาดนาโนบนพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้น จะลดการเร่งการเกิดออกไซด์และไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวของเหล็ก แต่เนื่องจากการรักษาสภาพอายุการใช้งานที่ค่อนข้างต่ำและการนำมาใช้งานอยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับอากาศที่มีออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอนุภาคเหล็กประจุศูนย์ (Fe^0) ไปอยู่ในรูป Fe_3O_4 , Fe_2O_3 และ $FeOOH$ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลง เมื่อทำการศึกษาการชะละลายพบว่า ปริมาณเหล็กมีการหายไปเมื่อทำการเพิ่มการสัมผัสระหว่างมลสาร HANs และ ตัวกลางดูดซับที่มีอนุภาคเหล็กขนาดนาโนเป็นองค์ประกอบ

5.1.3 ศึกษาการคัดเลือกการดูดซับของสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนโตรล์ทั้ง 5 ชนิด ของ ถ่านกัมมันต์ที่ต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน

- ผลการทดลองสมบัติการคัดเลือกในการดูดซับ HANs ในน้ำประปาจริง พบว่า การมีอยู่ของ ไอออนในน้ำประปาไม่กระทบต่อสมบัติการคัดเลือกของ PAC ,PAC/NZVI และ NZVI มากนัก และ พบว่าอันดับการดูดซับในน้ำประปามีลักษณะเดียวกับในน้ำกลั่น อย่างไรก็ตามความสามารถการดูดซับของ PAC มีค่าลดลงเล็กน้อยสำหรับกรณีในน้ำประปา

- ผลการทดลองพบว่าตัวกลาง PAC , GAC และ GAC/NZVI ให้ผลการทดลองในกรณีแบบ ผสมเช่นเดียวกันกับกรณีแบบเดี่ยว คือสามารถดูด DCAN ,TCAN และ MBAN มากที่สุดตามลำดับ รองลงมาคือ MBAN และ MCAN ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติความชอบน้ำของแต่ละสารที่ แตกต่าง ๆ และ ตำแหน่ง C ที่ทำอันตรกิริยากันกับหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางบนดูดซับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาศักยภาพในการย่อยสลาย HANs ของ NZVI ที่สภาวะใกล้เคียงกับกรณีน้ำประปาเพื่อ ระบุบทบาทของการย่อยสลายและการดูดซับ
- 2) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตัวกลางดูดซับถ่านกัมมันต์ชนิดผงและชนิดเกล็ด และ/หรือ อนุภาคเหล็กขนาดนาโนเพื่อกำจัดสาร DBPs กลุ่มอื่นๆร่วมด้วย
- 3) ควรศึกษาพารามิเตอร์ในน้ำประปาที่มีผลต่อการลดลงของสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนโตรล์ของ อนุภาคเหล็กขนาดนาโน เช่น การมีอยู่ของไอออนในน้ำประปา เป็นต้น
- 4) ควรศึกษาวิธีการลด/ป้องกันการชะละลายของอนุภาคเหล็กขนาดนาโนออกสู่น้ำที่สัมผัสกับ ตัวกลางดูดซับ

รายการอ้างอิง

- US.EPA 551.1, E. M. (1990). *Determination of Chlorination Disinfection Byproducts, chlorinated solvents, and Halogenated Pesticides/Herbicides in Drinking Water by Liquid-Liquid Extraction and Gas Chromatography with Electron-capture Detection*. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OHIO.
- Bardos, P., Brian Bone, Daniel W. Elliott, Paul Nathanail. (2011). Risk/benefit approach to the application of iron nanoparticles for the remediation of contaminated sites in the environment. Research gate.
- Bjelopavlic, M., Newcombe, G., & Hayes, R. (1999). Adsorption of NOM onto Activated Carbon: Effect of Surface Charge, Ionic Strength, and Pore Volume Distribution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 210(2), 271-280. doi: <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5975>
- Busch, J., Meißner, T., Potthoff, A., Bleyl, S., Georgi, A., Mackenzie, K., . . . Oswald, S. E. (2015). A field investigation on transport of carbon-supported nanoscale zero-valent iron (nZVI) in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 181, 59-68. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2015.03.009>
- Chen, H., Cao, Y., Wei, E., Gong, T., & Xian, Q. (2016). Facile synthesis of graphene nano zero-valent iron composites and their efficient removal of trichloronitromethane from drinking water. *Chemosphere*, 146, 32-39. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.095>
- Cheng, K.-m., Hung, Y.-w., Chen, C.-c., Liu, C.-c., & Young, J.-j. (2014). Green synthesis of chondroitin sulfate-capped silver nanoparticles: Characterization and surface modification. *Carbohydrate Polymers*, 110, 195-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.053>
- Cheng, W., Dastgheib, S. A., & Karanfil, T. (2005). Adsorption of dissolved natural organic matter by modified activated carbons. *Water Research*, 39(11), 2281-2290. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.01.031>

- Dai, Y., Hu, Y., Jiang, B., Zou, J., Tian, G., & Fu, H. (2016). Carbothermal synthesis of ordered mesoporous carbon-supported nano zero-valent iron with enhanced stability and activity for hexavalent chromium reduction. *Journal of Hazardous Materials*, *309*, 249-258. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.013>
- Daniel, F. B., Schenck, K. M., Mattox, J. K., Lin, E. L. C., Haas, D. L., & Pereira, M. A. (1986). Genotoxic properties of haloacetonitriles: Drinking water by-products of chlorine disinfection. *Fundamental and Applied Toxicology*, *6*(3), 447-453. doi: [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(86\)90218-6](https://doi.org/10.1016/0272-0590(86)90218-6)
- Derbyshire, F., Andrews, R., Jacques, D., Jagtoyen, M., Kimber, G., & Rantell, T. (2001). Synthesis of isotropic carbon fibers and activated carbon fibers from pitch precursors. *Fuel*, *80*(3), 345-356. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00099-5)
- Fan, D., O'Brien Johnson, G., Tratnyek, P. G., & Johnson, R. L. (2016). Sulfidation of Nano Zerovalent Iron (nZVI) for Improved Selectivity During In-Situ Chemical Reduction (ISCR). *Environmental Science & Technology*, *50*(17), 9558-9565. doi: [10.1021/acs.est.6b02170](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02170)
- Golfonopoulos, S. K., Nikolaou, A. D., & Lekkas, T. D. (2003). The occurrence of disinfection by-products in the drinking water of Athens, Greece. *Environmental Science and Pollution Research*, *10*(6), 368-372. doi: [10.1065/espr2002.06.124](https://doi.org/10.1065/espr2002.06.124)
- Jamei, M. R., Khosravi, M. R., & Anvaripour, B. (2014). A novel ultrasound assisted method in synthesis of NZVI particles. *Ultrasonics Sonochemistry*, *21*(1), 226-233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.04.015>
- Jankowska, H., Neffe, S. a., & Swiatkowski, A. (1981). Investigations of the electrochemical properties of activated carbon and carbon black. *Electrochimica Acta*, *26*(12), 1861-1866. doi: [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(81\)85176-6](https://doi.org/10.1016/0013-4686(81)85176-6)
- Karanfil, T. (2006). Chapter 7 Activated carbon adsorption in drinking water treatment. In J. B. Teresa (Ed.), *Interface Science and Technology* (Vol. Volume 7, pp. 345-373): Elsevier.

- Kiattisaksiri, P. K., E. Punyapalakul, P. Ratpukdi, T. (2016). Photodegradation of haloacetonitriles in water by vacuum ultraviolet irradiation: Mechanisms and intermediate formation. *Water Research*, 98 : 160-167.
- Kim, J., & Kang, B. (2008). DBPs removal in GAC filter-adsorber. *Water Research*, 42(1–2), 145-152. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.040>
- Kuang, Y., Wang, Q., Chen, Z., Megharaj, M., & Naidu, R. (2013). Heterogeneous Fenton-like oxidation of monochlorobenzene using green synthesis of iron nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 410, 67-73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.08.020>
- Lefevre, E., Bossa, N., Wiesner, M. R., & Gunsch, C. K. A review of the environmental implications of in situ remediation by nanoscale zero valent iron (nZVI): Behavior, transport and impacts on microbial communities. *Science of The Total Environment*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.003>
- Li, S., Wang, W., Liu, Y., & Zhang, W.-x. (2014). Zero-valent iron nanoparticles (nZVI) for the treatment of smelting wastewater: A pilot-scale demonstration. *Chemical Engineering Journal*, 254, 115123. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.111>
- Li, X.-F., & Mitch, W. A. (2018). Drinking Water Disinfection Byproducts (DBPs) and Human Health Effects: Multidisciplinary Challenges and Opportunities. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 1681-1689. doi: 10.1021/acs.est.7b05440
- Lipscomb, J., El-Demerdash, E., & Ahmed, A. (2009). *Haloacetonitriles: Metabolism and Toxicity* (Vol. 198).
- Liu, F. Y., J. Zuo, J. Ma, D. Gan, L. Xie, B. et al. . Graphene-supported nanoscale zero-valent iron: removal of phosphorus from aqueous solution and mechanistic study., 26(J. Environ. Sci), 1751–1762.
- Liu, Y., & Lowry, G. V. (2006). Effect of Particle Age (Fe⁰ Content) and Solution pH On NZVI Reactivity: H₂ Evolution and TCE Dechlorination. *Environmental Science & Technology*, 40(19), 6085-6090. doi: 10.1021/es060685o
- Lv, X., Xue, X., Jiang, G., Wu, D., Sheng, T., Zhou, H., & Xu, X. (2014). Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI) assembled on magnetic Fe₃O₄/graphene for Chromium (VI)

- removal from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 417, 51-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.11.044>
- Marhaba, T. F., and Washington, M.B. (1998). Drinking Water Disinfection By-products: History and Current Practice. *Adv. Env. Res.* 2 (1). 103-115.
- Matsui, Y., Colas, F., & Yuasa, A. (2001). Removal of a synthetic organic chemical by PAC-UF systems. II: model application. *Water Research*, 35(2), 464-470. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00308-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00308-0)
- Morawski, A. W., & Inagaki, M. (1997). Application of modified synthetic carbon for adsorption of trihalomethanes (THMs) from water. *Desalination*, 114(1), 23-27. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00150-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00150-1)
- Organization, W. H. (2012). rinking Water Disinfection Byproducts (DBPs) and Human Health Effects: Multidisciplinary Challenges and Opportunities.
- Plewa, M. J., Wagner, E. D., & Richardson, S. D. (2017). TIC-Tox: A preliminary discussion on identifying the forcing agents of DBP-mediated toxicity of disinfected water. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 208-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.014>
- Prarat, P., Ngamcharussrivichai, C., Khaodhiar, S., & Punyapalakul, P. (2011). Adsorption characteristics of haloacetonitriles on functionalized silica-based porous materials in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1210-1218. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.032>
- Prarat, P., Ngamcharussrivichai, C., Khaodhiar, S., & Punyapalakul, P. (2013). Removal of haloacetonitriles in aqueous solution through adsolubilization process by polymerizable surfactant-modified mesoporous silica. *Journal of Hazardous Materials*, 244-245, 151-159. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.012>
- Przepiórski, J. (2006). Chapter 9 Activated carbon filters and their industrial applications. In J. B. Teresa (Ed.), *Interface Science and Technology* (Vol. Volume 7, pp. 421-474): Elsevier.
- Qu, X., Alvarez, P. J. J., & Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 47(12), 3931-3946. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058>

- Richardson, S. D. (2011). Disinfection By-Products: Formation and Occurrence in Drinking Water★★This article has been reviewed in accordance with the US EPA's peer and administrative review policies and approved for publication. Mention of trade names or commercial products does not constitute endorsement or recommendation for use by the US EPA. In J. O. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 110-136). Burlington: Elsevier.
- Sari, M. A., & Chellam, S. (2017). Relative contributions of organic and inorganic fouling during nanofiltration of inland brackish surface water. *Journal of Membrane Science*, 523, 68-76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.005>
- Schöftner, P., Waldner, G., Lottermoser, W., Stöger-Pollach, M., Freitag, P., & Reichenauer, T. G. (2015). Electron efficiency of nZVI does not change with variation of environmental parameters. *Science of The Total Environment*, 535, 69-78. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.033>
- Shan, G. Y., S. Tyagi, R. Surampalli, R. Zhang, T. . (2009). Applications of nanomaterials in environmental science and engineering. *review, Pract. Period. Hazard. Toxic Radioact. Waste Manage*, 13, 110–119.
- Siddiqui, M., Zhai, W., Amy, G., & Mysore, C. (1996). Bromate ion removal by activated carbon. *Water Research*, 30(7), 1651-1660. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(96\)00070-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(96)00070-X)
- Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., & Ok, Y. S. (2016). Review on nano zerovalent iron (nZVI): From synthesis to environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 287, 618-632. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.046>
- Uyak, V., Yavuz, S., Toroz, I., Ozaydin, S., & Genceli, E. A. (2007). Disinfection by-products precursors removal by enhanced coagulation and PAC adsorption. *Desalination*, 216(1–3), 334-344. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2006.11.026>
- Wang, Y., Liu, W., Liu, W., He, P., Fan, Z., Wang, X., . . . Shen, H. (2017). Synthesis of SnAgCu nanoparticles with low melting point by the chemical reduction method. *Microelectronics Reliability*, 78, 17-24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.07.069>
- Xiao, J., Gao, B., Yue, Q., Gao, Y., & Li, Q. (2015). Removal of trihalomethanes from reclaimed-water by original and modified nanoscale zero-valent iron:

- Characterization, kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 262, 1226-1236. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.080>
- Xiao, J., Gao, B., Yue, Q., Sun, Y., Kong, J., Gao, Y., & Li, Q. (2015). Characterization of nanoscale zero-valent iron supported on granular activated carbon and its application in removal of acrylonitrile from aqueous solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 152-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2015.04.010>
- Xiao, J., Yue, Q., Gao, B., Sun, Y., Kong, J., Gao, Y., . . . Wang, Y. (2014). Performance of activated carbon/nanoscale zero-valent iron for removal of trihalomethanes (THMs) at infinitesimal concentration in drinking water. *Chemical Engineering Journal*, 253, 63-72. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.05.030>
- Yang, Y.-F., Chen, P.-J., & Liao, V. H.-C. (2016). Nanoscale zerovalent iron (nZVI) at environmentally relevant concentrations induced multigenerational reproductive toxicity in *Caenorhabditis elegans*. *Chemosphere*, 150, 615-623. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.068>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์(MSDS). from แหล่งที่มา: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=451#อันตรายต่อสุขภาพอนามัย> (Health Effect) [10 เม.ย. 2559]
- การประปานครหลวง. (2550). ฝ่ายคุณภาพน้ำการประปานครหลวง. Retrieved 2559 , มีนาคม 20, from การประปานครหลวง <http://www.mwa.co.th/quality.html>
- การประปานครหลวง. (2557). การฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มด้วยคลอรีน
- พนิดา พรารัตน์. (2554). การกำจัดสารฮาโลเอซีไนด์ไนไตรล์โดยการดูดซับบนวัสดุที่มีรูพรุนอินทรีย์ที่ดัดแปร.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมประปา. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธราพงษ์ วิทิตสานต์. (2553). ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. กรุงเทพมหานคร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ก.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ MBAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (น้ำกลั่น / IS
0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร, น้ำหนักตัวกลางดูดซับ = 0.05 กรัม)

PAC			GAC			PAC- NZVI			GAC- NZVI			NZVI		
T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)
0	0	531	0	0	531	0	0	531	0	0	531	0	0	531
1	21.41	495	1	21.41	495	1	14.36	507	1	14.36	507	1	14.36	507
3	21.14	496	3	21.14	496	3	21.14	496	3	21.14	496	3	21.14	496
5	37.08	469	5	22.98	493	5	30.03	481	5	30.03	481	5	30.03	481
10	32.72	476	10	32.72	476	10	32.72	476	10	32.72	476	10	32.72	476
15	42.44	460	15	41.03	463	15	42.44	460	15	42.44	460	15	28.34	484
30	73.78	408	30	73.78	408	30	59.67	432	30	59.67	432	30	31.47	479
45	116.9	336	45	88.70	383	45	88.70	383	45	88.70	383	45	32.29	477
60	146.6	287	60	104.3	357	60	104.3	357	60	104.3	357	60	32.38	477
120	163.7	258	120	121.4	329	120	107.3	352	120	107.3	352	120	39.62	465
180	178.1	234	180	135.8	305	180	110.4	347	180	110.4	347	180	42.61	460
240	182.2	227	240	148.3	284	240	112.6	343	240	108.4	350	240	44.95	456
300	169.3	249	300	141.1	296	300	120.4	330	300	110.6	347	300	50.75	446

ตารางที่ ก.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับ DBAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ (น้ำกลั่น / IS
0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร, น้ำหนักตัวกลางดูดซับ = 0.05 กรัม)

PAC			GAC			PAC- NZVI			GAC- NZVI			NZVI		
T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)	T (min)	Q _t (ug/g)	C _t (ug/l)
0	0.16	1,016	0	0.16	1,016	0	0.16	1,016	0	0.16	1,016	0	0.16	1,016
1	167	736	1	111	830	1	111	830	1	55	923	1	37	954
3	279	551	3	168	736	3	168	736	3	111	830	3	43	944
5	455	258	5	247	603	5	247	603	5	204	675	5	50	932
10	511	164	10	280	548	10	251	597	10	228	635	10	60	915
15	527	136	15	341	447	15	257	587	15	257	587	15	85	873
30	554	91	30	405	341	30	292	528	30	264	575	30	87	870
45	563	77	45	455	258	45	312	496	45	269	566	45	106	839
60	565	73	60	480	215	60	324	475	60	274	559	60	129	801
120	569	67	120	499	184	120	330	465	120	280	549	120	135	790
180	573	60	180	504	174	180	336	455	180	291	530	180	143	777
240	573	60	240	517	154	240	342	445	240	303	510	240	150	765
300	568	69	300	523	143	300	340	448	300	310	499	300	156	756



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการดูดซับสำหรับไอโซเทอม
ของสารกลุ่มฮาโลอะซิโตไนไตรล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ HANs ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ ข.1 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7

PAC				GAC				NZVI			
C ₀	Q _e	C _e	นน	C ₀	Q _e	C _e	นน	C ₀	Q _e	C _e	นน
(mg/L)	(mg/g)	(ug/l)	(g)	(mg/L)	(mg/g)	(ug/l)	(g)	(mg/L)	(mg/g)	(mg/L)	(g)
0.93	0.560	0	0.052	0.930	0.530	0.039	0.05	0.13	0.010	0.108	0.051
4.55	2.730	0.005	0.051	4.553	2.600	0.217	0.05	0.306	0.030	0.261	0.052
11.31	6.780	0.007	0.049	9.437	5.400	0.440	0.05	0.619	0.080	0.483	0.050
19.29	11.56	0.015	0.047	19.28	11.050	0.880	0.05	1.208	0.100	1.044	0.052
29.85	17.89	0.036	0.050	29.05	16.520	1.528	0.05	4.831	0.950	3.245	0.048
40.41	24.21	0.056	0.051								
61.15	36.63	0.110	0.055								
71.32	42.72	0.114	0.056								
107.5	64.45	0.151	0.052								
120.7	72.36	0.188	0.048								
140.3	84.11	0.170	0.050								
PAC - NZVI				GAC - NZVI							
C ₀	Q _e	C _e	นน	C ₀	Q _e	C _e	นน				
(mg/L)	(mg/g)	(mg/l)	(g)	(mg/L)	(mg/g)	(mg/l)	(g)				
0.146	0.110	0.031	0.05	0.146	0.050	0.230	0.05				
0.029	-0.060	0.121	0.05	0.029	0.110	0.152	0.05				
0.342	0.050	0.251	0.05	0.342	0.200	0.006	0.05				
0.930	0.310	0.414	0.05	0.930	0.320	0.405	0.05				
2.126	0.570	1.182	0.04	4.553	1.700	1.721	0.05				
4.553	1.510	2.038	0.05								

ตารางที่ ข.2 ไอโซเทอมการดูดซับ MCAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7 (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

PAC				GAC				NZVI			
C ₀ (ug/l)	Qe (ug/g)	Ce (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Qe (ug/g)	Ce (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Qe (ug/g)	Ce (ug/l)	นน (g)
44.03	28.33	9.06	0.052	44.03	8.49	29.87	0.05	44.03	1.73	41.0	0.052
95.89	62.19	21.06	0.048	95.89	17.12	64.49	0.055	95.89	1.35	93.7	0.048
209	145.29	34.13	0.056	209	34.79	144.06	0.056	209	9.69	190	0.056
431.8	302.03	77.89	0.05	431.84	70.45	309.72	0.052	431.8	28.12	384	0.05
498.7	351.04	86.86	0.051	498.71	79.36	366.43	0.05	498.7	24.22	457	0.051
PAC - NZVI				GAC - NZVI							
C ₀ (ug/l)	Qe (ug/g)	Ce (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Qe (ug/g)	Ce (ug/l)	นน (g)				
44.03	4.62	36.02	0.052	44.03	3.51	37.95	0.052				
95.89	11.45	77.58	0.048	95.89	6.50	85.27	0.049				
209.0	17.93	175.53	0.056	209	14.32	183.22	0.054				
431.8	55.82	338.81	0.05	431.84	51.20	346.50	0.05				
498.7	55.9	403.68	0.051	498.71	52.4	411.37	0.05				

ตารางที่ ข.4 ไอโซเทอมการดูดซับ MBAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7
(น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

PAC				GAC				NZVI			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
49.19	16.72	20.20	0.052	49.19	14.5	25.02	0.05	49.19	3.07	43.76	0.05
106.4	34.26	49.30	0.05	106.40	29.81	58.71	0.048	106.40	11.45	87.31	0.05
174.2	55.79	79.39	0.051	174.23	45.44	89.40	0.056	174.23	19.98	136.93	0.05
531.2	181.9	228.08	0.05	531.25	143.77	286.85	0.051	531.25	79.8	390.27	0.05
988.9	371.74	356.96	0.051	988.92	274.95	521.50	0.051	988.92	151.48	685.96	0.06
PAC - NZVI				GAC - NZVI							
C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
49.1	8.42	34.31	0.053	49.19	3.92	41.48	0.059				
106.4	20.15	72.81	0.05	106.40	15.12	82.21	0.048				
174.2	28.14	126.40	0.051	174.23	19.91	136.41	0.057				
531.25	97.28	369.11	0.05	531.25	74.64	404.37	0.051				
988.92	182.5	678.65	0.051	988.92	149.67	709.54	0.056				

ตารางที่ ข.5 ไอโซเทอมการดูดซับ DBAN ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7
(น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

PAC				GAC				NZVI			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
603.4	357.0	8.32	0.05	603	328.77	55.53	0.05	603.48	278.7	194.2	0.05
1217	697.8	31.02	0.051	1217	650.56	111.37	0.051	1217.3	407.1	476.5	0.051
2203	1306	69.99	0.049	2203	1242.62	173.83	0.049	2203.4	1198	615.1	0.049
5267	3098	103.53	0.05	5267	3014.07	244.14	0.05	5267.5	2377	1734	0.05
9707	5629	138.08	0.051	9707	5528.84	308.81	0.051	9707.8	4764	2907	0.051
PAC - NZVI				GAC -NZVI							
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
603	273.1	148.22	0.05	603.48	200.84	268.74	0.05				
121	536.8	304.59	0.051	1217.3	442.37	465.28	0.051				
220	1027.4	525.34	0.049	2203.4	719.97	1027.56	0.049				
526	2441.6	1198.2	0.05	5267.5	1839.0	2202.5	0.05				
970	4187.3	2589.4	0.051	9707.8	3005.7	4598.0	0.051				

ตารางที่ ข.6 ไอโซเทอมการดูดซับ TCM ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 7
(น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

PAC				GAC				NZVI			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
42.16	22.11	5.310	0.05	42.16	21.03	7.118	0.05	42.16	20.87	12.77	0.05
103.3	49.98	18.36	0.051	103.3	49.09	19.87	0.051	103.3	42.16	35.98	0.051
226.0	117.5	34.13	0.049	226.0	113.4	40.76	0.049	226.0	66.67	97.58	0.049
494.7	245.5	85.45	0.05	494.7	238.0	97.90	0.05	494.7	147.9	208.0	0.05
1029	513.7	155.9	0.051	1029.	500.1	179.1	0.051	1029	351.9	398.4	0.051
PAC - NZVI				GAC -NZVI							
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
42.16	14.85	16.39	0.05	42.16	17.56	14.76	0.05				
103.3	37.64	38.64	0.051	103.3	39.65	37.45	0.051				
226.0	68.18	96.66	0.049	226.0	72.29	94.14	0.049				
494.7	136.7	214.7	0.05	494.7	179.1	189.3	0.05				
1029	324.2	414.7	0.051	1029.	368.8	388.5	0.051				

3.การศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ HANs ของตัวดูดซับ

ตารางที่ ข.7 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับ PAC ที่พีเอช 5,7,9 (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

pH 5			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
1010	584.7	35.97	0.051
2192	1270	73.87	0.052
4554	2579	255.4	0.053
11865	6806	521.3	0.051
23762	13618	1065	0.05
pH 7			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
943.8	565.2	1.828	0.051
2216	1322	13.17	0.056
4728	2822	23.73	0.053
12794	7655	35.97	0.052
23396	13930	179.4	0.052
pH 9			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
862.8	508	16.25	0.053
2163	1276	35.97	0.054
4488	2649	73.95	0.053
9983	5875	190.85	0.052
23274	13583	635.22	0.051

ตารางที่ ข.8 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับ PAC/NZVI ที่พีเอช 5,7,9 (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

pH 5			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
1010	203	673	0.053
2192	526	1315	0.052
4554	1283	2417	0.054
11865	2294	8043	0.051
23762	4870	15645	0.052
pH 7			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
944	253	521	0.053
2217	670	1099	0.052
4728	1544	2155	0.054
12795	3604	6789	0.053
23397	6770	12114	0.051
pH 9			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
863	159	597	0.051
2163	552	1243	0.055
4489	1287	2344	0.052
9983	1917	6789	0.051
23274	5584	13967	0.054

ตารางที่ ข.9 ไอโซเทอมการดูดซับ DCAN ของตัวกลางดูดซับ NZVI ที่พีเอช 5,7,9 (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

pH 5			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
1010	128	797	0.052
2192	274	1735	0.051
4555	895	3064	0.053
11865	2124	8325	0.050
23762	3321	18227	0.052
pH 7			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
944	117	748	0.056
2217	327	1671	0.052
4728	1192	2742	0.056
12795	3681	6660	0.050
23397	5164	14790	0.051
pH 9			
C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	น้ำหนักตัวกลางดูดซับ (g)
863	60	763	0.051
2163	273	1708	0.051
4489	953	2901	0.052
9983	1684	7177	0.053
23274	3983	16636	0.055

4.การศึกษาสมบัติในการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ของตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ
 ตารางที่ ข.10 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ
 PAC (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
129	77.26	0.934	0.05	44.02	9.37	27.79	0.052	125.04	74.89	0.228	0.05
240	143.57	1.105	0.05	95.88	21.21	61.95	0.048	213.09	127.50	0.592	0.05
528	316.52	0.934	0.05	209.00	33.51	146.44	0.056	323.85	193.27	1.733	0.05
1236	740.59	1.720	0.05	431.83	73.78	308.87	0.05	507.27	303.45	1.527	0.05
2466	1477.0	4.865	0.05	498.70	80.98	361.04	0.051	734.79	439.66	2.029	0.05
				1097.3	286.69	600.42	0.052	1069.9	634.24	12.93	0.05
								2134.3	1253.3	45.31	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
48.6	16.44	20.20	0.05	123.41	73.52	0.891	0.05				
102.	32.21	49.30	0.05	214.91	126.01	0.690	0.051				
182	60.91	79.38	0.05	324.27	197.50	1.695	0.049				
546.	191.3	228.08	0.05	505.25	302.80	0.590	0.05				
1010	384.4	356.9	0.05	971.45	570.80	1.090	0.051				
1654	665.7	544.9	0.05								

ตารางที่ ข.11 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ GAC (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
133.0	78.45	2.336	0.05	44.02	7.90	30.33	0.051	132.5	79.34	0.34	0.05
254.6	151.2	2.54	0.05	95.88	15.44	71.18	0.050	216.1	128.9	1.36	0.05
490.9	293.4	1.78	0.05	209.00	26.63	159.29	0.056	332.5	198.3	1.86	0.05
1204	721.0	3.22	0.05	431.83	66.48	321.03	0.05	517.1	308.9	2.28	0.05
2401	1437	4.86	0.05	498.70	75.95	369.58	0.051	734.7	439.1	2.80	0.05
				1097.3	282.25	608.12	0.053	1115.	667.6	2.48	0.05
								2134.	1248	53.43	0.05
								3116.	1830	65.58	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
48.69	13.85	24.69	0.052	123.41	72.07	3.30	0.051				
102.9	31.31	50.80	0.05	214.91	124.71	2.90	0.051				
182.9	59.32	82.09	0.051	324.27	196.52	3.30	0.049				
546.9	170.82	262.30	0.05	505.25	300.63	4.20	0.052				
1010	366.28	387.65	0.051	971.45	569.15	3.90	0.054				
1654	653.56	565.31	0.05								

ตารางที่ ข.12 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ PAC-Nzvi (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/L)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)
134.7	55.19	42.73	0.05	42.18	5.46	32.71	0.052	127.0	39.89	60.52	0.05
263.0	88.87	114.8	0.05	95.11	14.96	71.18	0.048	212.6	53.26	123.8	0.05
559.2	193.2	237.2	0.05	199.4	27.95	147.2	0.056	337.2	91.71	184.4	0.05
1136	369.1	521.3	0.05	413.3	50.28	329.5	0.05	504.4	153.8	248.0	0.05
2466	843.1	1061	0.05	483.4	61.47	378.9	0.051	740.6	275.8	280.9	0.05
								1094	445.5	351.9	0.05
								2095	830.0	712.2	0.05
								3066	1248	985.9	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)	C ₀ (ug/l)	Q _e (ug/g)	C _e (ug/l)	นน (g)				
48.92	9.19	32.99	0.05	123.4	58.93	25.19	0.05				
100.8	20.84	66.15	0.05	234.9	112.7	43.37	0.051				
181.3	38.06	116.6	0.05	334.5	163.4	67.57	0.049				
570.4	125.3	361.5	0.05	516.4	256.5	88.76	0.05				
1043	205.8	693.2	0.05	981.4	486.9	153.7	0.051				
1667	422.9	963.0	0.05								

ตารางที่ ข.13 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ GAC-NZVI (น้ำกลั่น / IS 0.01 M / pH=7 , ปริมาตร 30 มิลลิลิตร)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)
0.13	0.048	0.050	0.05	0.044	0.009	0.028	0.052	0.132	0.037	0.070	0.05
0.25	0.080	0.126	0.05	0.097	0.020	0.065	0.048	0.216	0.049	0.134	0.05
0.52	0.166	0.245	0.05	0.191	0.021	0.155	0.056	0.355	0.097	0.193	0.05
1.06	0.279	0.597	0.05	0.399	0.049	0.312	0.05	0.540	0.206	0.197	0.05
2.41	0.772	1.129	0.05	0.492	0.076	0.362	0.051	0.733	0.210	0.382	0.05
				1.268	0.387	0.584	0.052	1.019	0.400	0.352	0.05
								2.073	0.816	0.712	0.05
								3.026	1.163	1.087	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/L)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)				
0.05	0.010	0.035	0.052	0.113	0.051	0.029	0.05				
0.09	0.014	0.070	0.05	0.244	0.110	0.056	0.051				
0.17	0.036	0.114	0.051	0.345	0.163	0.079	0.049				
0.51	0.063	0.409	0.05	0.494	0.234	0.103	0.05				
0.96	0.167	0.667	0.051	1.186	0.599	0.168	0.051				

ตารางที่ ข.14 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำกลั่น ที่พีเอช 7 ของ Nzvi (ปริมาตร 30 มิลลิลิตร , พีเอช 7 , IS = 0.01 โมลาร์ , น้ำหนักตัวกลางดูดซับ 0.05กรัม)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)
0.122	0.016	0.096	0.05	0.044	0.044	0.041	0.052	0.127	0.022	0.090	0.05
0.266	0.043	0.194	0.05	0.096	0.096	0.094	0.05	0.212	0.035	0.154	0.05
0.483	0.063	0.378	0.05	0.209	0.209	0.191	0.052	0.355	0.071	0.236	0.05
1.277	0.316	0.750	0.05	0.432	0.432	0.385	0.053	0.513	0.107	0.334	0.05
2.230	0.287	1.752	0.05	0.499	0.499	0.458	0.052	0.707	0.119	0.510	0.05
				1.268	1.268	0.584	0.054	0.973	0.224	0.600	0.05
								2.003	0.429	1.287	0.05
								2.986	1.139	1.087	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	C _e (mg/l)	นน (g)				
0.049	0.049	0.044	0.053	0.603	0.195	0.279	0.05				
0.106	0.106	0.087	0.05	1.217	0.477	0.407	0.051				
0.174	0.174	0.137	0.056	2.203	0.615	1.199	0.049				
0.531	0.531	0.390	0.053	5.268	1.734	2.377	0.05				
0.989	0.989	0.686	0.06	9.708	2.908	4.764	0.051				
1.660	1.660	0.954	0.051								

ตารางที่ ข.15 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำประปา ของ PAC
(ปริมาตร 30 มิลลิลิตร , พีเอช 7 , IS = 0.01 โมลาร์ , น้ำหนักตัวกลางดูดซับ 0.05 กรัม)

DCAN				MCAN				TCAN			
C_0 (mg/l)	Q_e (mg/g)	C_e (mg/l)	นน (g)	C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	นน (g)	C_0 (mg/l)	Q_e (mg/g)	C_e (ug/l)	นน (g)
0.130	0.077	0.001	0.05	45.26	10.08	27.79	0.052	0.120	0.072	0.319	0.05
0.245	0.146	0.001	0.05	90.04	22.46	54.10	0.048	0.219	0.131	0.615	0.05
0.556	0.333	0.001	0.05	190.9	40.36	115.6	0.056	0.324	0.194	0.729	0.05
1.270	0.761	0.002	0.05	406.4	129.7	190.1	0.05	0.515	0.309	0.752	0.05
2.074	1.241	0.006	0.05	474.9	121.8	267.8	0.051	0.741	0.444	0.456	0.05
							0.052	1.015	0.609	0.250	0.05
								2.159	1.295	0.364	0.05
MBAN				DBAN							
C_0 (mg/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	นน (g)	C_0 (ug/l)	Q_e (ug/g)	C_e (ug/l)	นน (g)				
0.049	16.44	20.2	0.05	123.4	73.46	0.992	0.05				
0.103	32.21	49.3	0.05	214.9	126	0.591	0.051				
0.183	57.93	84.44	0.05	324.3	198.3	0.389	0.049				
0.547	194.1	223.3	0.05	505.3	302.8	0.491	0.05				
1.010	427.7	283.2	0.05	971.5	571.8	0.691	0.051				
1.655	637.5	591.9	0.05								

ตารางที่ ข.17 สมบัติการคัดเลือกการดูดซับสารละลายผสม HANs ในน้ำประปา ของ NZVI
(ปริมาตร 30 มิลลิลิตร , พีเอช 7 , IS = 0.01 โมลาร์ , น้ำหนักตัวกลางดูดซับ 0.05 กรัม)

DCAN				MCAN				TCAN			
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	Ce (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	Ce (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	Ce (mg/l)	นน (g)
0.13	0.020	0.102	0.051	0.051	0.004	0.045	0.052	0.120	0.024	0.081	0.05
0.25	0.058	0.155	0.052	0.094	0.011	0.076	0.048	0.219	0.034	0.162	0.05
0.56	0.084	0.422	0.05	0.191	0.018	0.158	0.056	0.324	0.066	0.213	0.05
1.27	0.241	0.872	0.052	0.399	0.035	0.339	0.05	0.515	0.083	0.377	0.05
2.07	0.316	1.550	0.05	0.465	0.049	0.380	0.051	0.741	0.175	0.449	0.05
				0.984	0.099	0.809	0.052	1.015	0.166	0.738	0.05
								2.159	0.382	1.523	0.05
MBAN				DBAN							
C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	Ce (mg/l)	นน (g)	C ₀ (mg/l)	Q _e (mg/g)	Ce (mg/l)	นน (g)				
0.04	0.009	0.032	0.052	0.123	0.021	0.089	0.05				
0.10	0.020	0.070	0.05	0.215	0.034	0.157	0.051				
0.18	0.037	0.119	0.051	0.324	0.041	0.257	0.049				
0.54	0.130	0.331	0.05	0.505	0.042	0.435	0.05				
1.01	0.340	0.433	0.051	0.971	0.131	0.748	0.051				
1.65	0.400	0.989	0.05								



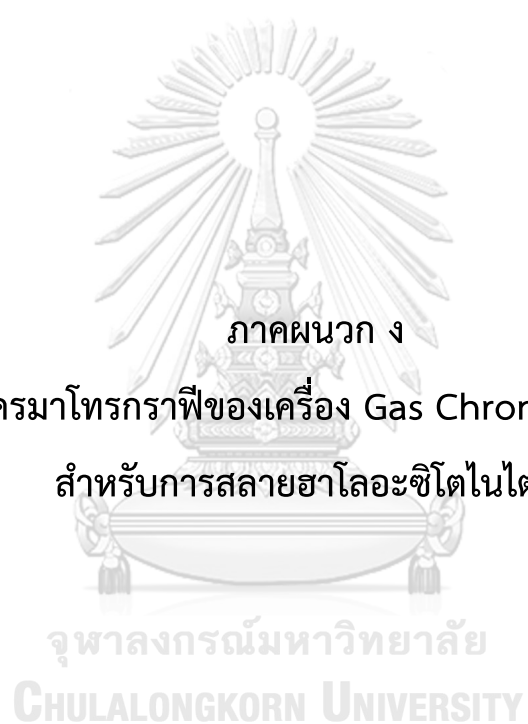
ภาคผนวก ค

ข้อมูลการชะละลายของปริมาณเหล็กในน้ำสังเคราะห์โดยวิเคราะห์เครื่อง
เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ด้วยเทคนิค Atomic
Absorption Spectroscopy

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค.1 ปริมาณเหล็ก ใน DCAN ในน้ำกลั่น ของ PAC-NZVI , GAC- NZVI และ NZVI ด้วยเครื่อง AAS (ปริมาตร 30 มิลลิลิตร , พีเอช 7 , IS = 0.01 โมลาร์ , น้ำหนักตัวกลางดูดซับ 0.05 กรัม)

PAC-NZVI		GAC-NZVI		NZVI	
เวลา (นาที)	ปริมาณ ธาตุ Fe (mg/l)	เวลา (นาที)	ปริมาณ ธาตุ Fe (mg/l)	เวลา (นาที)	ปริมาณ ธาตุ Fe (mg/l)
1	0.264	1	0.187	1	1.279
5	0.250	5	0.522	5	1.283
10	0.670	10	0.501	10	1.787
30	0.688	30	0.657	30	1.182



ภาคผนวก ง

ผลโครมาโทกราฟีของเครื่อง Gas Chromatograph

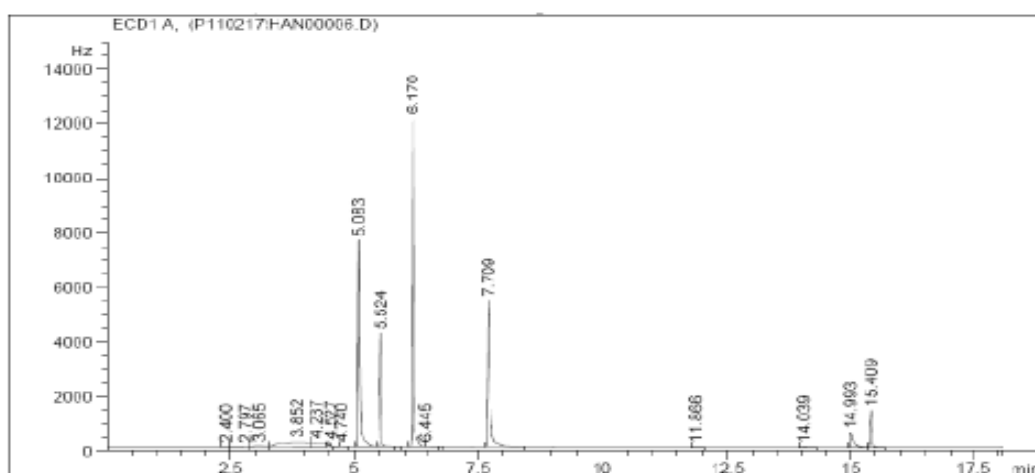
สำหรับการสลายฮาโลอะซีโตไนไตรล์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

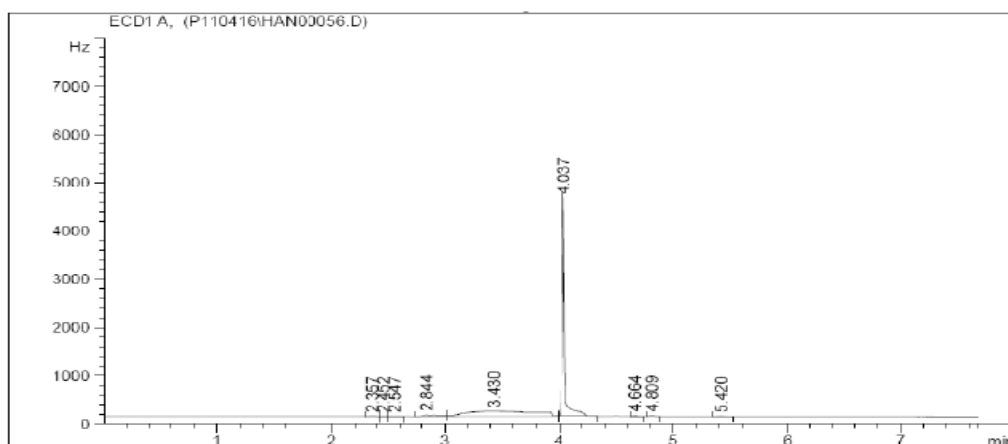
ตารางที่ ง.1 การวิเคราะห์สารฮาโลอะซีไธไนโตรล (HANs) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/ECD ตามวิธี EPA method 551.1(551.1, 1990) (Column HP-1,GC/ECD)

Retention time (นาที)	5.08	5.52	6.17	7.71	15.41
HANs	MCAN	TCAN	DCAN	MBAN	DBAN
Detection Limit	0.15-0.20 ug/L or ppb				



ภาพแสดง โครมาโตแกรม ของสารฮาโลอะซีไธไนโตรลทั้ง 5 ชนิด

ตารางที่ ง.2 การวิเคราะห์สารไตรคลอโรมีเทน (TCM) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/ECD ตามวิธี EPA method 551.1(551.1, 1990) (Column HP-1,GC/ECD)



ภาพแสดง โครมาโตแกรม ของสารไตรคลอโรมีเทน : Retention time 4.02 นาที

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายต่อศักดิ์ นวนิล เกิดเมื่อวันที่ 27 เมษายน พ.ศ. 2535 ที่โรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม และทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงาน การประชุมวิชาการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 วันที่ 17-18 พฤษภาคม 2560 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รong เมือง กรุงเทพฯ และ นำเสนอผลงานในหัวข้อ “การกำจัดสารกลุ่มฮาโลอะซีโตไนไตรล์ใน น้ำประปา ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ทำการต่อติดกับอนุภาคเหล็กขนาดนาโน”





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY