

การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยแมงกานีสออกไซด์และโครมชายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบน
วัสดุรองรับ



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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Removal of arsenic contaminated in water using manganese oxide and iron-based metal-organic framework coated on support material



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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยแมงกานีสออกไซด์ และโครมช่วยเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับ
โดย	นางสาวนิชาภา สุพรรณฝ้าย
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.วิษณุ แทนบุญช่วย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ ดร.วิษณุ แทนบุญช่วย)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธรัตน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พงษ์ชนวัฒน์ เข้มทอง)

นิชากา สุพรรณผ่าย : การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำด้วยแมงกานีสออกไซด์และ
 โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนวัสดุรองรับ (Removal of arsenic contaminated in
 water using manganese oxide and iron-based metal-organic framework
 coated on support material) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์,
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร.วิษณุ แทนบุญช่วย, 150 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการกำจัดสารหนูด้วยกระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยา
 ออกซิเดชันและการดูดซับภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS2) เป็นตัว
 ออกซิไดซ์ As(III) เป็น As(V) แล้วดูดซับ As(V) ที่เปลี่ยนรูปจาก As(III) ด้วยโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์
 (Fe-BTC) K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ใช้งานในคอลัมน์จะถูกฟื้นฟูรูปด้วยการเคลือบบนผิวเม็ดเซรามิก
 โดยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล ในอัตราส่วน K-OMS2 และ Fe-BTC ต่อเม็ดเซรามิก 1:10 1:50
 และ 1:100 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีด้วยเทคนิค SEM-EDS และ Micro-
 XRF พบว่าอัตราส่วนการเคลือบ 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด การหาประจุที่ผิว พบว่าสารทั้ง
 สองชนิดมีประจุที่ผิวเป็นลบที่ pH 6-8 โดยมีค่า $pH_{pzc} = 5$ ผลการทดสอบการออกซิเดชันของ As(III)
 ด้วย K-OMS2 และการดูดซับ As(V) แบบกะ โดย Fe-BTC ที่ pH 5 6 7 และ 8 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด
 ที่ pH 5 และ 8 ตามลำดับ โดยมีจลนพลศาสตร์เป็นแบบ Pseudo second order และ Pseudo
 first order ตามลำดับ ส่วนการทดสอบภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง พบว่าภาวะทดสอบเหมาะสมใน
 ทั้งสองคอลัมน์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 5 mg/L ความยาวเขต 15 cm และอัตราการไหล 5
 mL/min โดยเมื่อทำการศึกษาที่ละคอลัมน์ K-OMS2 ยังคงมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ As(III)
 สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ 3 รอบ และมีการชะละลายของไอออน Mn และ K ที่ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำ
 ใต้ดิน ส่วนคอลัมน์ Fe-BTC มีจลนพลศาสตร์การดูดซับเข้ากับแบบจำลองของ Yoon-Nelson มี
 q_0 สูงสุดเท่ากับ 52.60 mg/g และมีการชะละลายของไอออน Fe ไม่เกิน 0.23 mg/L เมื่อ
 ทำการศึกษาโดยการต่อทั้งสองคอลัมน์เข้าด้วยกัน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 2,200 นาที ระบบยัง
 สามารถบำบัดสารหนูได้มากกว่า 60%

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5987253020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: ADSORPTION / ARSENIC / OXIDATION / GROUNDWATER / CONTINUOUS FLOW SYSTEM

NICHAPA SUPANNAFAI: Removal of arsenic contaminated in water using manganese oxide and iron-based metal-organic framework coated on support material. ADVISOR: PUMMARIN KHAMDAHSAG, Ph.D., CO-ADVISOR: VISANU TANBOONCHUY, Ph.D., 150 pp.

This study aimed to remove arsenic via co-processes of oxidation and adsorption in continuous flow system using manganese oxide octahedral molecular sieve (K-OMS2), an oxidizing agent for transforming As(III) to As(V), and iron-based metal-organic framework (Fe-BTC), an adsorbent of the transformed As(V). K-OMS2 and Fe-BTC used in column were immobilized on ceramic ball through mechanical orbital shaking technique. K-OMS2 and Fe-BTC: ceramic ball ratios were 1:10, 1:50, and 1:100. Physicochemical analysis using SEM-EDS and Micro-XRF techniques revealed the proper coating ratio at 1:50. Surface charge test found that K-OMS2 and Fe-BTC presented negative charge on their surface at pH 6-8 and $pH_{pzc} = 5$. The oxidation of As(III) by K-OMS2 and adsorption of As(V) by Fe-BTC in a batch system at pH 5, 6, 7, and 8 provided the highest efficiency at pH 5 and 8, respectively. Kinetics of As(III) oxidation and As(V) adsorption also followed pseudo second order and pseudo first order, respectively. For the continuous flow system experiment, suitable running conditions for both K-OMS2 and Fe-BTC columns included As(V) initial concentration of 5 mg/L, bed length of 15 cm, and flow rate of 5 mL/min. In a single column test, K-OMS2 maintained the good efficiency to oxidize As(III) for 3-round reuse cycle with lower than groundwater standard of Mn and K. In Fe-BTC column test, adsorption kinetics fit well with Yoon-Nelson model having the highest q_0 of 52.60 mg/g and Fe leaching of 0.23 mg/L. With two columns combined, the system enabled to remove As_{total} for more than 60% at 2,200 min.

Field of Study: Environmental Science Student's Signature

Academic Year: 2017 Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สว.) และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย ขอขอบคุณ บริษัท ซินเทค อินโนเวชั่น จำกัด และ Bruker Singapore Pte. Ltd. สำหรับความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง Micro-XRF ใน การศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.ภุมรินทร์ คำเดชศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.วิษณุ แทนบุญช่วย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดต่างๆ ในการทำ วิจัย รวมถึง ดร.มงคลชัย อัครดิษฐเลิศ และนายจักภพ พันธศรี ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่เป็น ประโยชน์ในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ที่สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม และภาควิชาสห สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย นี้ จนทำให้งานวิจัยดำเนินมาจนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฑ
สารบัญตาราง.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 การจำแนกสาร (Identification).....	6
2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical properties)	6
2.1.3 ชนิดของสารหนูในธรรมชาติ.....	6
2.1.4 การใช้ประโยชน์.....	8
2.1.4.1 ทางด้านเกษตร.....	8
2.1.4.2 ทางด้านอุตสาหกรรม	9
2.1.4.3 ทางการแพทย์.....	10
2.1.4.4 ทางด้านทหาร	10

2.1.5 ความเป็นพิษ	10
2.1.5.1 ความเป็นพิษต่อสัตว์.....	10
2.1.5.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์	10
2.1.6 มาตรฐานสารหนูในน้ำใต้ดิน	11
2.1.7 มาตรฐานสารหนูในน้ำใต้ดินเพื่อการบริโภค.....	11
2.1.8 แหล่งกำเนิดสารหนูในสิ่งแวดล้อม	11
2.1.8.1 แหล่งธรรมชาติ.....	11
2.1.8.2 การใช้สารพิษป้องกันกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร.....	12
2.1.8.3 กิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม.....	12
2.1.9 การปนเปื้อนสารหนูของประเทศไทย.....	13
2.1.9.1 จังหวัดนครศรีธรรมราช.....	13
2.1.9.2 จังหวัดพิจิตร และจังหวัดเพชรบูรณ์	14
2.1.9.3 จังหวัดเลย.....	15
2.1.10 เทคโนโลยีการกำจัดสารหนู	16
2.1.10.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process).....	18
2.1.10.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	18
2.1.11 แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide octahedral molecular sieve ชนิด K-OMS2): ลักษณะและสมบัติ.....	20
2.1.12 โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron-based metal-organic framework ชนิด Fe-BTC): ลักษณะและสมบัติ.....	21
2.1.13 การขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ.....	22
2.1.13.1 การอัดเม็ด (Tableting).....	23
2.1.13.2 การอัดแท่ง (Extrusion).....	23
2.1.13.3 การเคลือบ (Coating).....	24

2.1.14 การออกแบบคอลัมน์.....	25
2.1.15 การวิเคราะห์กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันและดูดซับที่ใช้ในการศึกษา แบบกะ (Batch system).....	26
2.1.15.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity).....	26
2.1.15.2 จลนพลศาสตร์ (Kinetics models).....	26
2.1.16 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง	28
2.1.16.1 ความจุทะลุ (Breakthrough capacity)	28
2.1.16.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Sorption kinetics).....	30
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.2.1 การประยุกต์ใช้ K-OMS ₂	31
2.2.2 การประยุกต์ใช้ Fe-BTC	34
2.2.3 การประยุกต์ใช้ K-OMS ₂ และ Fe-BTC ในการกำจัดสารหนู.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	38
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	38
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.3 การสังเคราะห์วัสดุ.....	38
3.3.1 การสังเคราะห์แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS ₂).....	38
3.3.2 การสังเคราะห์โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC)	39
3.4 การเคลือบ K-OMS ₂ และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก.....	39
3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของ K-OMS ₂ (coated) และ Fe-BTC (coated).....	40
3.5.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วย เทคนิค Scanning electron microscopy with Energy dispersive x-ray spectrometry (SEM-EDS).....	40

3.5.2 การศึกษาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Micro-X-ray fluorescence (Micro-XRF)	40
3.5.3 การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD).....	40
3.5.4 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของตัวดูดซับโดยเทคนิค Nitrogen adsorption desorption isotherm.....	41
3.5.5 การศึกษาประจุที่ผิวและ pH of point of zero charge (pH_{pzc}).....	41
3.6 การทดสอบความเป็นไปได้ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในการกำจัด As(III) และ As(V) แบบกะ (Batch system).....	41
3.6.1 การทดสอบเรซิน	41
3.6.2 K-OMS2 (coated) กับการเปลี่ยน As(III) ให้เป็น As(V).....	42
3.6.3 Fe-BTC (coated) กับการดูดซับ As(V).....	42
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง	42
3.7.1 การบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์	42
3.7.2 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated).....	44
3.7.3 การทดสอบประสิทธิภาพ Fe-BTC (coated)	44
3.7.4 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) พร้อมกัน ในระบบการไหลต่อเนื่อง.....	44
3.7.5 ปัจจัยที่ใช้ศึกษา.....	44
3.8 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของ As(III) และ As(V) ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma optical emission spectrometer (ICP-OES).....	46
3.9 การวิเคราะห์การชะละลายของ Mn K และ Fe ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS).....	46
3.10 การวิเคราะห์กลไกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันและการดูดซับในระบบการทดสอบแบบกะ.....	47
3.10.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ดังในสมการที่ 3.1	47

3.10.2 จลนพลศาสตร์ (Kinetics models).....	47
3.10.2.1 Pseudo first order kinetics ดังในสมการ 3.2.....	47
3.10.2.2 Pseudo second order kinetics	47
3.10.2.3 การแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion model)	48
3.11 การวิเคราะห์กลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันและดูดซับระบบการไหลต่อเนื่อง ...	48
3.11.1 ความจุทะลุ (Breakthrough capacity).....	48
3.11.2 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Sorption kinetics).....	49
3.12 การวิเคราะห์ข้อมูล	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	51
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated).....	51
4.1.1 ลักษณะของ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่สังเคราะห์ได้.....	51
4.1.2 การเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก	52
4.1.3 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectrometry (SEM-EDS).....	53
4.1.3.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว K-OMS2 และ Fe-BTC ด้วยเทคนิค SEM	53
4.1.3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค SEM-EDS.....	54
4.1.4 การศึกษาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Micro-X-ray fluorescence (Micro-XRF).....	58
4.1.5 การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD).....	62
4.1.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen adsorption-desorption isotherm	65
4.1.6.1 Nitrogen adsorption-desorption isotherm	65

4.1.6.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) และการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution)....	69
4.1.7 การศึกษาประจุที่ผิวของ K-OMS2 Fe-BTC K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)	70
4.1.7.1 K-OMS2 และ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออน.....	70
4.1.7.2 K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 5 mg/L	73
4.2. การทดสอบเรซิน.....	75
4.3 การทดสอบความเป็นไปได้ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในการกำจัด As(III) และ As(V) แบบกะ (Batch system)	76
4.3.1 K-OMS2 (coated) กับปฏิกิริยาออกซิเดชัน As(III) ให้เป็น As(V)	76
4.3.2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-ดูดซับของ As(III) โดย K-OMS2 (coated)..	78
4.3.3 Fe-BTC (coated) กับการดูดซับ As(V).....	80
4.3.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated).....	82
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง	84
4.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated).....	84
4.4.1.1 การศึกษาเบื้องต้น (Preliminary test).....	84
4.4.1.2 การศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated)	86
4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพ Fe-BTC (coated)	88
4.4.2.1 การศึกษาเบื้องต้น	88
4.4.2.2 การศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated).....	90
4.4.2.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Sorption kinetics).....	92
4.4.2.4 ความจุทะลุ	95
4.4.3 จำนวนรอบของการใช้ซ้ำ (Reuse cycle number).....	96

4.4.4 การชะละลายของ Mn K และ Fe	98
4.4.4.1 การชะละลายของ Mn และ K ในคอลลัมน์ K-OMS2 (coated).....	98
4.4.4.2 การชะละลายของ Fe ในคอลลัมน์ Fe-BTC (coated).....	99
4.4.5 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) พร้อมกัน ในระบบการไหลต่อเนื่อง	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	104
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก.....	116
ภาคผนวก ก ข้อมูลกราฟมาตรฐาน.....	117
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองแบบบะ.....	122
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลองในคอลลัมน์.....	133
ภาคผนวก ง ผลงานทางวิชาการ.....	148
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	150

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	ขอบเขตงานวิจัย.....	5
รูปที่ 2.1	Eh-pH stability ของสารหนู ที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 1 bar (Lu and Zhu, 2010).....	7
รูปที่ 2.2	การกระจายของ (ก) As(III) และ (ข) As(V) ที่ค่า pH ต่างๆ(Sharma and Sohn, 2009).....	8
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของ K-OMS2 (Iyer et al., 2010).....	21
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC) (อะตอมสี่เทา เป็นของคาร์บอน, อะตอมสี่แดง เป็นของออกซิเจน และอะตอมสี่ฟ้าเป็นเหล็ก) (Shahid and Nijmeijer, 2014).....	22
รูปที่ 2.5	การขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับแบบต่างๆ (Akhtar et al., 2014).....	22
รูปที่ 2.6	กระบวนการอัดแท่งของซีโอไลต์ (Zeolites) ให้เป็นแท่งรังผึ้ง (Honeycombs).....	24
รูปที่ 2.7	รูปแบบของกราฟเบรคทรูของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อดูการเคลื่อนที่บริเวณโซนถ่ายโอนมวล (Mass transfer zone; MTZ) (Taty-Costodes et al., 2005).....	29
รูปที่ 2.8	แบบจำลองการดูดซับ As (V) ของ Fe-BTC, Fe ₂ O ₃ nanoparticle และ Fe ₂ O ₃ powder (Zhu et al., 2012).....	36
รูปที่ 2.9	การกำจัด As(III) โดยใช้ K-OMS2 ร่วมกับ Fe-BTC (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) = 5 mg/L K-OMS2:Fe-BTC = 0.5:0.5 g pH เริ่มต้น = 8.46) (Phanthasri et al., 2018).....	37
รูปที่ 3.1	การทดสอบประสิทธิภาพเรซินที่ปริมาณ 0.5 1 และ 2 g.....	42
รูปที่ 3.2	แผนผังวิธีการบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์.....	43
รูปที่ 3.3	ระบบการไหลต่อเนื่องของ (ก) K-OMS2 (coated) และ (ข) Fe-BTC (coated) แบบแยกทดสอบทีละคอลัมน์.....	45
รูปที่ 3.4	ระบบการไหลต่อเนื่องของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่ทดสอบพร้อมกันทั้ง 2 คอลัมน์.....	46

รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะสารผสมสีน้ำตาลเข้มขณะสังเคราะห์ K-OMS2 และ (ข) ลักษณะสารผสมสี ส้มขณะสังเคราะห์ Fe-BTC หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและล้างด้วยน้ำปราศจาก ไอออน.....	51
รูปที่ 4.2 (ก) ลักษณะของ K-OMS2 และ (ข) Fe-BTC ที่สังเคราะห์ได้.....	51
รูปที่ 4.3 ลักษณะที่ปรากฏของ (ก) เม็ดเซรามิกเปล่าที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ (ข) K-OMS2 (coated) และ (ค) Fe-BTC (coated).....	52
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของ (ก) K-OMS2 และ (ข) Fe-BTC.....	54
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM (SEM images) กำลังขยาย 20 เท่า ของ K-OMS2 (coated) อัตราส่วน (ก) 1:10 (ข) 1:50 (ค) 1:100 Fe-BTC (coated) อัตราส่วน (ง) 1:10 (จ) 1:50 (ฉ) 1:100 (ช) เม็ด เซรามิก และกำลังขยาย 15,000 เท่า ของ (ซ) K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:10 และ (ฌ) Fe-BTC (coated).....	55
รูปที่ 4.6 สภาวะของเครื่อง Micro-XRF ที่ใช้วิเคราะห์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated).....	59
รูปที่ 4.7 ลักษณะ K-OMS2 (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (ก) 1:10 (ข) 1:50 และ (ค) 1:100 และ Fe-BTC (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (ง) 1:10 (จ) 1:50 และ (ฉ) 1:100 ที่วาง บนแผ่นรองรับชนิดดินน้ำมันสังเคราะห์ก่อนนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ (ช) เม็ดเซรามิก	60
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของธาตุ Mn (สีแดง) Fe (สีเขียว) และ Al (สีน้ำเงิน) บน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) (ก) ธาตุทั้งสามชนิด (ข) เฉพาะธาตุ Mn (ค) เฉพาะธาตุ Fe และ (ง) เฉพาะธาตุ Al.....	62
รูปที่ 4.9 การเตรียมตัวอย่างในแท่นใส่ตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ XRD ของ (ก) K-OMS2 (coated) และ (ข) Fe-BTC (coated).....	64
รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของ K-OMS2 และ K-OMS2 (coated).....	64
รูปที่ 4.11 รูปแบบ XRD ของ Fe-BTC และ Fe-BTC (coated).....	65
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2.....	66
รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2 (coated)	67
รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดซับของ Fe-BTC	68
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับของ Fe-BTC (coated).....	68

รูปที่ 4.16 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 72 ชั่วโมง.....	71
รูปที่ 4.17 ประจุที่ผิวของ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 72 ชั่วโมง.....	71
รูปที่ 4.18 pH_{pzc} ของ K-OMS2 และ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ณ เวลา 72 ชั่วโมง.....	72
รูปที่ 4.19 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 (coated) ในสารละลาย $NaAsO_3$ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที.....	74
รูปที่ 4.20 ประจุที่ผิวของ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที.....	74
รูปที่ 4.21 pH_{pzc} ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $NaAsO_3$ และ $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ตามลำดับ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ณ เวลา 180 นาที.....	75
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ As(III) และ As(V) 5 mg/L ปริมาตร 5 mL ที่ใช้ปริมาณเรซิน 0.5 1 และ 2 g.....	76
รูปที่ 4.23 C/C_0 ของ As(III) ที่เหลือในระบบจากกระบวนการออกซิเดชันโดย K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L K-OMS2 0.05 g/100 mL และ อุณหภูมิ 24.5°C).....	77
รูปที่ 4.24 ความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับของ K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L K-OMS2 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 24.5°C).....	78
รูปที่ 4.25 จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชัน-ดูดซับ As(III) ที่ pH 5 6 7 8 โดย K-OMS2 (coated) ด้วยแบบจำลอง (ก) Pseudo first order kinetics (ข) Pseudo second order kinetics และ (ค) Intra-particle diffusion.....	79
รูปที่ 4.26 การดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated)) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 5 mg/L Fe-BTC 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 25°C).....	81
รูปที่ 4.27 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ของ Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 5 mg/L Fe-BTC 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 25°C).....	81

รูปที่ 4.28 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ As(V) ที่ pH 5-8 โดย Fe-BTC (coated) ด้วย แบบจำลอง (ก) Pseudo first order kinetics (ข) Pseudo second order kinetics และ (ค) Intra-particle diffusion.....	83
รูปที่ 4.29 กราฟเบรคทรูในหน่วย C/C_0 ของ As(III) ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) (ความ เข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 5 cm และเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm).....	85
รูปที่ 4.30 กราฟเบรคทรูของ As(III) ที่คงเหลืออยู่ในระบบจากการออกซิเดชัน-ดูดซับโดย K- OMS2 (coated) และปริมาณ As(V) ที่เกิดขึ้น ที่ภาวะทดสอบ (ก) ความยาวเบด 10 cm อัตรา การไหล 10 mL/min (ข) ความยาวเบด 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min (ค) ความยาวเบด 20 cm อัตราการไหล 5 mL/min.....	87
รูปที่ 4.31 กราฟเบรคทรูในหน่วย C/C_0 ของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) (ความ เข้มข้นเริ่มต้น As(V) 3 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 5 cm และเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm).....	88
รูปที่ 4.32 กราฟเบรคทรูของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ภาวะทดสอบ I II และ III (ก) ผลการทดสอบ และ (ข) ผลการทดสอบพร้อมเส้นแนวโน้มจากการคาดการณ์	91
รูปที่ 4.33 กราฟเบรคทรูของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ที่ภาวะทดสอบ IV และ V.....	92
รูปที่ 4.34 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ I (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L).....	93
รูปที่ 4.35 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะ ทดสอบ I (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L)....	93
รูปที่ 4.36 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ I เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และ แบบจำลอง Yoon-Nelson ที่จำลองสถานการณ์ย้อนกลับ	94
รูปที่ 4.37 ความจุทะลุของ (ก) ภาวะทดสอบ I (ข) ภาวะทดสอบ II และ (ค) ภาวะทดสอบ III	95
รูปที่ 4.38 ลักษณะคอลัมน์ K-OMS2 (coated) เมื่อ (ก) ยังไม่ผ่านการใช้งาน (ข) ผ่านการใช้ซ้ำ 1 รอบ (ค) ผ่านการใช้ซ้ำ 2 รอบ และ (ง) ผ่านการใช้ซ้ำ 3 รอบ.....	97
รูปที่ 4.39 C/C_0 ของคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ภายใต้ภาวะทดสอบ II ที่มีการใช้งานซ้ำ จำนวน 3 รอบ.....	97

รูปที่ 4.40 การชะละลายของ (ก) Mn และ (ข) K จากการใช้คอลัมน์ K-OMS2 (coated) ใน
 ภาวะทดสอบ II..... 98

รูปที่ 4.41 การชะละลายของ Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ในภาวะการทดสอบ II..... 99

รูปที่ 4.42 ลักษณะการต่อคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เข้าด้วยกันเพื่อ
 ใช้ในภาวะทดสอบ II..... 101

รูปที่ 4.43 กราฟเบรคทรูของ As(III) As(V) และ Astotal เมื่อต่อคอลัมน์ K-OMS2 (coated)
 และ Fe-BTC (coated) เข้าด้วยกันภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องในภาวะทดสอบ II 101

รูปที่ 4.44 การชะละลายของ (ก) Mn และ K ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และการชะละลาย
 ของ (ข) Mn K Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) จากการใช้คอลัมน์ทั้งสองเข้าด้วยกันภายใต้
 ระบบการไหลต่อเนื่องในภาวะทดสอบ II 102



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำที่จกจากกิจกรรมประเภทต่างๆ.....	12
ตารางที่ 2.2 การปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทย.....	16
ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารหนู (Mohan and Pittman, 2007)	17
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด As(III) และ As(V) ด้วยเทคนิคการเคลือบบนวัสดุที่แตกต่างกัน	25
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสาร As(III) และ As(V) โดยสารดูดซับชนิดต่างๆ.....	34
ตารางที่ 4.1 ลักษณะที่ปรากฏ ปริมาณผงที่ใช้ และเปอร์เซ็นต์การเคลือบของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated).....	53
ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของธาตุบน K-OMS2 (coated) อัตราส่วน (ก-ง) 1:10 (จ-ช) 1:50 และ (ฉ-ฎ) 1:100	57
ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของธาตุบน Fe-BTC (coated) อัตราส่วน (ก-จ) 1:10 (ฉ-ญ) 1:50 และ(ฎ-ต) 1:100	57
ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุของ K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก	58
ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน K-OMS2 K-OMS2 (coated) Fe-BTC และ Fe-BTC (coated).....	70
ตารางที่ 4.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซเดชัน-ดูดซับโดย K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8.....	80
ตารางที่ 4.7 จลนพลศาสตร์ของ As(V) ที่ถูกดูดซับโดย Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8....	84
ตารางที่ 4.8 ภาวะทดสอบของคอลัมน์ K-OMS2 (coated).....	86
ตารางที่ 4.9 ภาวะทดสอบของคอลัมน์ Fe-BTC (coated).....	89
ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่อัตราและปริมาณ As(V) ที่ถูกดูดซับโดย Fe-BTC (coated) จากการใช้แบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson.....	94

ตารางที่ 4.11 ความจุหลังจากการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) ในภาวะทดสอบ I II
 และ III..... 96



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สารหนูเป็นสารที่มีคุณสมบัติทั้งโลหะและอโลหะ สามารถพบในสิ่งแวดล้อมในรูปของสารประกอบออกไซด์หรือซัลไฟด์ เช่น As_2S_3 H_3AsO_3 As_2O_3 เป็นต้น ซึ่งสารหนูสามารถเกิดได้จากทั้งกระบวนการทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องด้วยมีการใช้สารหนูมากขึ้นทั้งในด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การแพทย์ และทางด้านทหาร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2541, World Health Organization, 2017) จึงก่อให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ อากาศ น้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดินเป็นจำนวนมากในหลายแห่งทั่วโลก เช่น ทวีปอเมริกา ทวีปยุโรป และทวีปเอเชีย เป็นต้น (Sharma and Sohn, 2009) ในประเทศไทยพบการปนเปื้อนสารหนูครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2530 อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา ทำให้เกิดการปนเปื้อนสารหนูในบ่อน้ำใช้บริโภค โดยสารหนูที่พบปนเปื้อนในดิน 21-16,000 mg/kg (Visoottiviseth, Francesconi and Sridokchan, 2002) และน้ำใต้ดินสูงถึง 5 mg/L (Williams et al., 1996) อีกทั้งในปี พ.ศ. 2552-2555 พบการปนเปื้อนสารหนูเกินมาตรฐานทั้งในน้ำผิวดิน (0.02-0.12 mg/L) และน้ำใต้ดิน (0.11-0.17 mg/L) ในพื้นที่ ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย (สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ปัญหาการปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทยมีมาตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน และยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตประชาชนเรื่อยมา โดยสามารถเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง ทางเดินหายใจ และทางการรับประทานอาหารที่มีการปนเปื้อนสารหนู ความเป็นพิษของสารหนูสามารถเกิดได้ทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่างๆ ท้องร่วง อาการช็อก ทำลายระบบต่างๆ ภายในร่างกายและเสียชีวิตในที่สุด อีกทั้งสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนูเป็นสารก่อมะเร็ง ปอด มะเร็งกระเพาะปัสสาวะ และมะเร็งผิวหนังในมนุษย์ และยังถูกจัดอันดับให้เป็นสารที่อันตรายที่สุดจากองค์กร Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2017)

ดังนั้นการหาวิธีกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะน้ำใต้ดินมีความสำคัญ เนื่องจากการปนเปื้อนสารหนูในแหล่งน้ำใต้ดินอาจส่งผลกระทบต่อประชาชนในการใช้น้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคบริโภค โดยความเข้มข้นสารหนูในน้ำใต้ดินเพื่อการอุปโภคตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน พ.ศ. 2543 กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.01 mg/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543) และน้ำใต้ดินเพื่อการบริโภคตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการ

สำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 กำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.05 mg/L (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551) วิธีการกำจัดสารหนูอาศัยเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันดำเนินการได้ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียและประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การบำบัดทางเคมีร่วมกับวิธีทางกายภาพโดยใช้ตัวออกซิไดซ์ร่วมกับตัวดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้เวลาไม่นานและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูสูง (Phanthasri et al., 2018) สารหนูในน้ำใต้ดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปอนินทรีย์ ได้แก่ อาร์เซนิต (As(III): H_3AsO_3 , $\text{H}_2\text{AsO}_3^{1-}$ และ HAsO_3^{2-}) และอาร์เซนเนต (As(V): H_3AsO_4 , $\text{H}_2\text{AsO}_4^{1-}$ และ HAsO_4^{2-}) (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007) การกำจัด As(III) ในน้ำใต้ดินทำได้ค่อนข้างยากด้วยวิธีบำบัดทั่วไปโดยเฉพาะวิธีการดูดซับ เมื่อเทียบกับการกำจัด As(V) เนื่องจาก As(III) มีความเป็นพิษสูงและเคลื่อนที่ได้ดี ซึ่งเกิดจากการที่ As(III) อยู่ในรูป HAsO_3^0 เปรียบเทียบกับ As(V) ซึ่งอยู่ในรูป H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} ในช่วง pH ของน้ำใต้ดิน 5-8 (Smedley and Kinniburgh, 2001, สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559)

การกำจัดสารหนูด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันร่วมกับการดูดซับ โดยใช้วัสดุแมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide octahedral molecular sieve ชนิด K-OMS2) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยน As(III) เป็น As(V) ต่อเนื่องด้วยการใช้โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron-based metal-organic framework ชนิด Fe-BTC) ในการดูดซับ As(V) ที่เปลี่ยนรูปจาก As(III) โดย K-OMS2 ซึ่ง Fe-BTC เป็นโครงข่ายที่มีแรงยึดเกาะ As(V) สูง และไม่มีการเปลี่ยนรูปของ As(V) (Phanthasri et al., 2018) ดังนั้นวิธีการดังกล่าวจึงเป็นแนวทางในการกำจัด As(III) ที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ดีวิธีหนึ่ง อย่างไรก็ตามการนำ K-OMS2 และ Fe-BTC มาใช้ร่วมกันในการบำบัดสารหนูเป็นงานที่ค่อนข้างใหม่ และมีประเด็นที่จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอยู่อีกมากเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานได้จริงมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยของ Phanthasri et al. (2018) ที่ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาร As(III) โดยใช้ K-OMS2 เป็นตัวออกซิไดซ์ และ Fe-BTC เป็นตัวดูดซับในรูปแบบผง โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูแบบกะ (Batch experiment) และสามารถลดเวลาการบำบัดสารหนูจากการใช้ K-OMS2 และ Fe-BTC ร่วมกัน

ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จะนำวัสดุรูปทรงสังเคราะห์ K-OMS2 และ Fe-BTC มาบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะเป็นการจำลองการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำใต้ดินจากพื้นที่ที่มีการปนเปื้อน โดยปรับปรุงรูปแบบการใช้งาน K-OMS2 และ Fe-BTC ในลักษณะผงมาเป็นการขึ้นรูปแบบเม็ด เพื่อให้สามารถนำไปบรรจุลงในคอลัมน์ชั้นอัดบรรจุ (Pack-bed column) แล้วนำข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมจากการวิจัยก่อนหน้า (จักรภพ พันธศรี, 2560, Phanthasri et al.,

2018) มาประกอบในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในระบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow system) ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมวัสดุรูพรุน K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ขึ้นรูปบนเม็ดเซรามิก
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในการบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง

1.3 สมมติฐานการวิจัย

วัสดุรูพรุนสังเคราะห์ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยวิธีการเคลือบโดยใช้เทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกลมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูในระบบการไหลต่อเนื่อง (Continuous flow system)

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้อง 309 ชั้น 3 อาคารสถาบัน 2 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1. สังเคราะห์วัสดุรูพรุน 2 ชนิด ได้แก่ K-OMS2 และ Fe-BTC ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal treatment process)
2. ศึกษาการขึ้นรูปของ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก ด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล (Mechanical orbital shaking technique) ด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ที่ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค
 - X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกของวัสดุ
 - Nitrogen adsorption-desorption isotherm เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่าง
 - Scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray spectrometry (SEM-EDS) เพื่อศึกษาสัญญาณทางจุลภาคของวัสดุ
 - Micro x-ray fluorescence (Micro-XRF) เพื่อศึกษาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุ
 - pH of point of zero charge (pH_{pzc}) เพื่อศึกษาประจุที่ผิว

4. ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด As(III) และ As(V) ที่ปนเปื้อนในน้ำแบบกะ (Batch system) โดยศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics models) ได้แก่ Pseudo first order kinetics Pseudo second order kinetics และ Intra-particle diffusion

5. การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัด As(III) และ As(V) ที่ปนเปื้อนในน้ำในระบบการไหลต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิห้อง

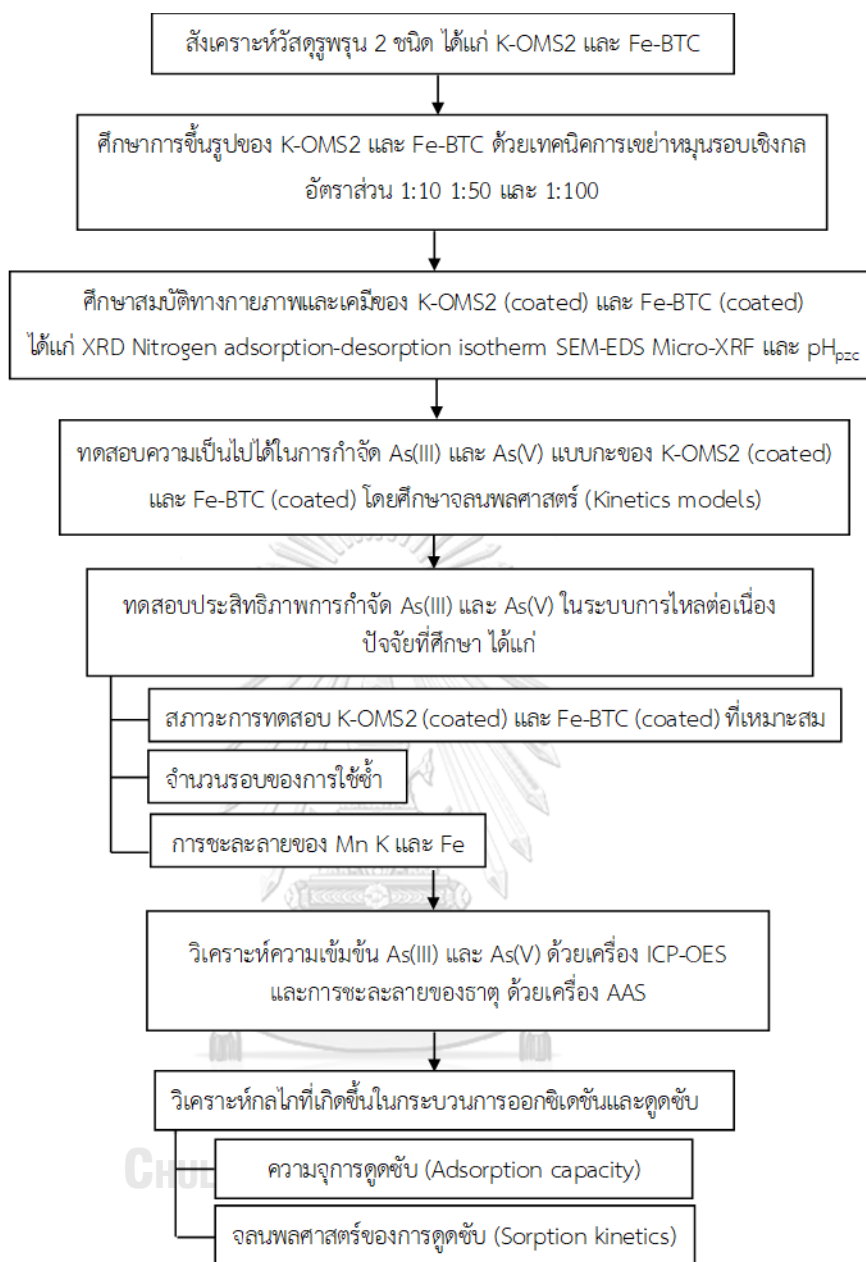
6. ปัจจัยที่ใช้ศึกษาในระบบการไหลต่อเนื่อง ได้แก่ สภาวะการทดสอบ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่เหมาะสม จำนวนรอบของการใช้ซ้ำ และการชะละลายของธาตุ Mn K และ Fe

7. สารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำ ที่ใช้ในการวิจัยมาจากการเตรียมสารละลาย Sodium arsenite (NaAsO_2) ความเข้มข้นในช่วง 1-5 mg/L ด้วยน้ำปราศจากไอออนในห้องปฏิบัติการ และปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 5-8 ซึ่งเป็นค่าที่อ้างอิงจาก pH ของน้ำใต้ดิน

8. วิเคราะห์ความเข้มข้น As(III) และ As(V) ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) และวิเคราะห์การชะละลายของธาตุ ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)

9. วิเคราะห์กระบวนการดูดซับ โดยศึกษาการดูดซับจากความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ด้วยความจุทะลุ (Breakthrough capacity) และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (Sorption kinetics) โดยใช้แบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson

ขอบเขตการวิจัยทั้งหมด แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ขอบเขตงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้การขึ้นรูป K-OMS2 และ Fe-BTC และสถานะการบำบัดที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในระบบการไหลต่อเนื่อง
2. ผลการวิจัยที่เป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดิน มีการปนเปื้อนของสารหนู

บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การจำแนกสาร (Identification)

สารหนูมีคุณสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ พบในรูปธาตุหรือโลหะ (Element or metallic arsenic) และในรูปของสารประกอบ (Arsenic compounds) ซึ่งแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic) สารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic) และก๊าซอาร์ซีน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007)

2.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี (Physical and chemical properties)

สารหนูเป็นธาตุหมู่ 5 ในตารางธาตุ จัดเป็นกลุ่ม transition มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33 ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิ 100°C และระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450°C สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิ 615°C ไม่ละลายน้ำ มีลักษณะเป็นผลึกโลหะมันเงามีสีเงินแกมเทาหรือสีดำได้ สารหนูจัดอยู่ใน Class 6.1 คือเป็นสารพิษตามระบบ United Nations Classification System (UN Class)

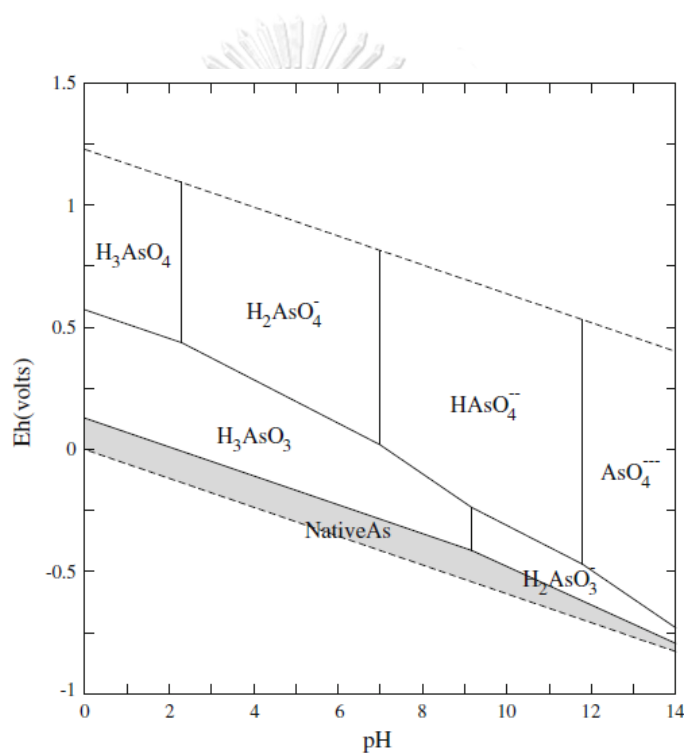
สารหนูในรูปอิสระเป็นสารที่พบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบเห็นส่วนประกอบของแร่ต่างๆ ในรูป Arsenide ของโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น และพบในรูป Arsenic sulfide ได้แก่ Realgar (Tetraarsenic tetrasulfide, As_4S_4) และ Orpiment (Arsenic trisulfide; As_2S_3) หรืออาจพบในรูปออกไซด์ สำหรับในน้ำมันพบในรูป Arsenate หรือ Arsenite ส่วนสารประกอบ Methylated arsenic ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาตินั้นเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางชีวและสารประกอบของสารหนูที่สำคัญทางอุตสาหกรรม คือ Arsenic trioxide ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากการถลุงแร่ทองแดงและตะกั่ว

2.1.3 ชนิดของสารหนูในธรรมชาติ

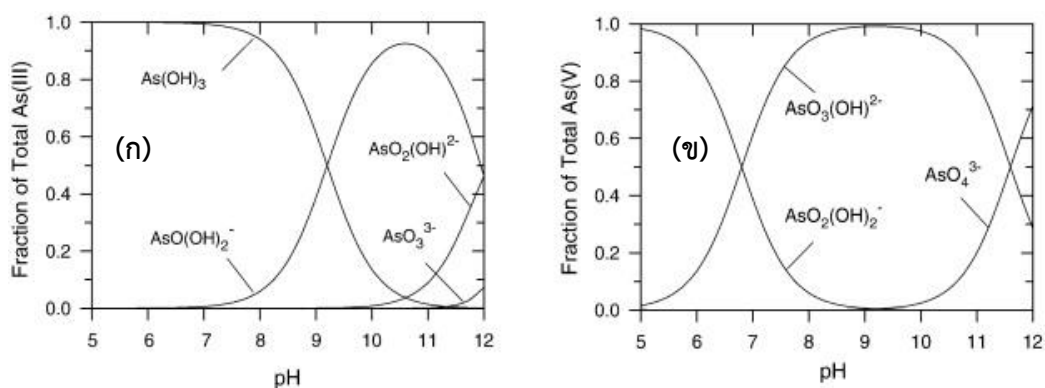
สารหนูพบได้ทั้งในรูปธาตุอิสระและสารประกอบ มีเลขออกซิเดชัน -3 0 $+3$ และ $+5$ (Begerow, Dunemann and Sur, 2012) ทั้งในสถานะของแข็ง สารละลาย และก๊าซ ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เลขออกซิเดชันและสปีชีส์ของสารหนูขึ้นอยู่กับค่าศักย์รีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox Potential; Eh) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยโลหะอาร์เซนิกที่มีเลขออกซิเดชัน 0 (As^0) พบได้ยากตามธรรมชาติและเสถียรเมื่อมีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox potential; Eh) ต่ำ อาร์เซนิกที่มีเลขออกซิเดชัน -3 สามารถพบได้ในสภาพที่รีดิวซ์รุนแรงในสถานะก๊าซ คือ Arsine (AsH_3) ในธรรมชาติพบสารหนูที่มีเลขออกซิเดชัน $+3$ และ $+5$ โดยเลขออกซิเดชัน $+3$ ได้แก่ H_3AsO_3 $H_2AsO_3^-$ และ $HAsO_3^{2-}$ เป็นต้น และ As(V) มีเลขออกซิเดชัน $+5$ ได้แก่ H_3AsO_4

H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} เป็นต้น As(III) ส่วนใหญ่จะคงรูปอยู่ในสภาวะรีดิวซ์หรือในสภาวะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจนพบได้ในแหล่งน้ำใต้ดิน ในขณะที่ As(V) จะคงรูปอยู่ได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจนอยู่อย่างสมบูรณ์พบได้ในแหล่งน้ำผิวดิน

As(III) และ As(V) พบอยู่ในรูปของออกซิแอนไอออน (Oxyanion) ที่แตกตัวได้หลายไอออน ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดย As(III) เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ต่ำพบไอออนของ H_3AsO_3 หรือ H_2AsO_3^- ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ในช่วง pH 5-9 และ As(V) ปรากฏในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี พบ H_2AsO_4^- หรือ HAsO_4^{2-} ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นๆ ในช่วง pH 7-11 ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.1 Eh-pH stability ของสารหนู ที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 1 bar (Lu and Zhu, 2010)



รูปที่ 2.2 การกระจายของ (ก) As(III) และ (ข) As(V) ที่ค่า pH ต่างๆ (Sharma and Sohn, 2009)

2.1.4 การใช้ประโยชน์

สารประกอบสารหนูส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ทางด้านเกษตรกรรม นอกจากนั้นใช้ในอุตสาหกรรม แก้วและเซรามิก ยารักษาโรค และเติมในอาหารสัตว์ จากรายงานของอุตสาหกรรมพบว่ามีการนำไปใช้ในการผลิตสารเคมีทางเกษตร (Pesticides) 82% อุตสาหกรรมแก้ว 8% และอุตสาหกรรมเคมีโลหะผสมทองแดงตะกั่วและอุตสาหกรรมยาประมาณ 10% (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2541) สารประกอบสารหนูที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ คือ

2.1.4.1 ทางด้านเกษตร

1. สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) ที่สำคัญ คือ

- Paris green (Copper acetoarsenite) แต่เดิมเคยใช้กันแพร่หลายเป็นสารเคมีป้องกันและกำจัดแมลงในสวนผลไม้ แต่ปัจจุบันใช้น้อยเช่นเดียวกับ Lead arsenate และ Calcium arsenate ซึ่งเคยใช้กันแพร่หลายเพื่อทำลายแมลงศัตรูของผลไม้ ยาสูบ ฝ้าย และผักบางชนิด

- Lead arsenate เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกประมาณปี ค.ศ. 1892 เป็นสารเคมีป้องกันและกำจัดแมลงชนิดกินตาย (Stomach poison) สำหรับทำลายด้วง ตั๊กแตน แมลงปีกแข็ง หนอนผีเสื้อ หนอนกินใบ เป็นต้น ยาฆ่าแมลงที่จัดอยู่ในประเภทเดียวกับ Lead arsenate คือ Lead arsenite ซึ่งเป็นทั้งยาฆ่าแมลงและสารกำจัดเชื้อรา (Fungicide)

- Magnesium arsenate นำมาใช้ครั้งแรกประมาณปี ค.ศ. 1920-1930 เป็นยาฆ่าแมลงชนิดกินตาย แต่ปัจจุบันมีการใช้น้อยลง

- Zinc arsenate ใช้เป็นยาฆ่าแมลง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 เพื่อทำลายแมลงศัตรูพืชต่างๆ เช่นเดียวกับ Lead arsenate และใช้แทน Lead arsenate เพื่อไม่ให้มีปัญหาตะกั่วตกค้างอยู่

- Sodium arsenite นำมาใช้เป็นยาฆ่าแมลง ระหว่างปี ค.ศ. 1920-1930 ส่วนใหญ่ใช้เป็นเหยื่อล่อและใช้กำจัดหมีด เห็บ ไร และเหาของปศุสัตว์ ถ้าใช้เป็นสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช ต้องใช้อย่าง ระมัดระวัง เนื่องจากเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อพืชมาก

- Calcium arsenate นำมาใช้ในไร่อ้อย สวนผลไม้ สวนผัก

2. สารกำจัดวัชพืช (Herbicides) สารประกอบอินทรีย์สารหนูที่ใช้เป็นสารกำจัดวัชพืช ในระยะเริ่มแรกคือ Sodium arsenite ซึ่งใช้กันแพร่หลายมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1890 เพื่อเป็นสารกำจัดเชื้อโรคในดินไม่จำกัดชนิด ส่วนการนำไปใช้เป็นสารกำจัดวัชพืชนั้น เพื่อกำจัดหญ้าตีนนก (Crabgrass)

สารประกอบอินทรีย์สารหนูที่ใช้เป็นสารกำจัดวัชพืช ได้แก่ Monosodium methanearsonate (MSMA) Disodium methanearsonate (DSMA) และ Cacodylic acid

3. สาร Desiccants สารที่ใช้กันแพร่หลาย คือ Arsenic acid เป็น Cotton desiccant ก่อนการเก็บฝ้ายเพื่อให้ใบฝ้ายร่วง ง่ายต่อการเก็บ และป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของฝ้ายจากการที่มีใบฝ้ายปนอยู่ด้วย

4. น้ำยารักษาสภาพเนื้อไม้ (Wood preservatives) ใช้ป้องกันเชื้อราและแมลงที่มาทำลายเนื้อไม้ สารที่นำมาใช้ได้แก่ Chromate copper arsenate และ Pentavalent arsenic compounds ซึ่งใช้เดี่ยวๆ หรือผสมกับสารอื่นได้ และสารที่นำมาใช้มีชื่อทางการค้าต่างๆ เช่น Wolman salts Osmosalts และ Bolidensalt BIS

5. ผสมในอาหารสัตว์ (Feed additives) สารประกอบอินทรีย์ของสารหนูที่ใช้อยู่มี 4 ชนิด คือ 4-Aminophenyl arsenic acid 3-Nitro-4-hydroxyphenyl- arsonic acid 4-Nitrophenyl-arsonic acid และ 4-Ureidophenylarsonic acid

2.1.4.2 ทางด้านอุตสาหกรรม UNIVERSITY

1. ใช้ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์หรือโลหะผสมเพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน สารหนูที่ใช้คือ Metallic arsenic

2. ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semi-conductor) ในเครื่องมือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ ดีเทคเตอร์ โซลาร์แบตเตอรี่ และไดโอด สารหนูที่ใช้คือ Gallium และ Indium arsenides

3. ใช้เป็นสารให้สีแดงหรือไม่มีสีในผลิตภัณฑ์แก้ว และทำให้แก้วหลอมละลาย

4. ใช้เป็น Silver reducer ในอุตสาหกรรมกระจกเงา ได้แก่ Potassiumarsenite

5. ใช้ Heterocyclic arsenic compounds เป็น Antifouling paints สำหรับทาใต้ท้องเรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำจับ ได้นานประมาณ 2 ปี

6. ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง สำหรับรักษาสภาพหนังสัตว์

7. ใช้ Phenildichlorarsine Phenilarsinoxide และ Heterocyclic arsenic compounds ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจาก Polyvinylchloride Polybenzimidazole และสารประกอบอินทรีย์สารหนูยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตพลาสติก

2.1.4.3 ทางกรแพทย์

ใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ สำหรับใช้รักษาโรคที่เกิดจาก โปรโตซัว ได้แก่ Tripanosomosis Amebiasis โรคที่เกิดจากพยาธิบางชนิด ได้แก่ Schistosomiasis Filariasis และ Frambesis รวมทั้งโรคที่เกิดจากพวกสไปโรซิด

2.1.4.4 ทางด้านทหาร

ใช้สารประกอบสารหนูเป็นสารพิษในการทำสงคราม หรือยับยั้งการก่อจลาจล สารพิษพวกนี้จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อเมือก สารพิษที่นำมาใช้ทางด้านนี้ ได้แก่ Ethyldichloroarsine (ED) Lewisite (ML) Phenylidichloroarsine (PD) Diphenylchloroarsine (DA) Phenylarsazine chloride (DM) Diphenylcyanoarsine (DC) และ Diphenylaminocycanoarsine

2.1.5 ความเป็นพิษ

2.1.5.1 ความเป็นพิษต่อสัตว์

จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า Trivalent inorganic arsenic มีความเป็นพิษมากกว่า Pentavalent และสารประกอบที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ จะมีความเป็นพิษมากกว่า สารประกอบที่ไม่ละลาย ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดการดูดซึมเข้าไปในร่างกายได้ดี

การเกิดพิษเกิดขึ้นเนื่องจากสารหนูไปยับยั้งการทำงานของ SH-group ในเอนไซม์ เช่น Pyruvate dehydrogenase ปริมาณต่ำสุดของสารหนูที่ทำให้หนู (Rat) ตายเมื่อฉีดเข้ากล้ามเนื้อคือ 25 mg/kg และปริมาณต่ำสุด ของสารหนูที่ทำให้กระต่ายตายเมื่อฉีดเข้าใต้ผิวหนังคือ 300 mg/kg

2.1.5.2 ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะการเกิดพิษเนื่องจากสารหนูส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษแบบเรื้อรังจากการสัมผัสสารหนูเข้าสู่ ร่างกายนานติดต่อกัน ซึ่งอาการที่แสดงออกทางระบบต่างๆ อาจแยกเป็น

1. บริเวณผิวหนัง ผิวหนังส่วนที่สัมผัสกับสารหนูจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็นโรคผิวหนัง โดยเฉพาะ ผิวหนังที่อยู่ตามซอกมุมต่างๆ เช่น รักแร้ ซอกคอ หู หนังสตา มุมปาก ซึ่งบางทีจะเป็นตุ่มแข็งใสพองหรือผิวหนัง แข็งด้าน โดยเฉพาะที่ฝ่าเท้า ฝ่ามือ ผิวหนังอาจหลุดออกมามากคล้ายกับใบไม้ผลัดใบหรือ บริเวณที่สัมผัสจะเป็นจุด สีๆ คล้ายกับเม็ดฝนเกิดเป็นหูด และต่อไปอาจจะเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนัง

2. บริเวณเยื่อเมือก เมื่อสัมผัสกับฝุ่นผงหรือก๊าซ จะทำให้เกิดการระคายเคืองส่วนนั้น และฝุ่นผงบางส่วนจะลงไปปอด มีอาการคล้ายกับเป็นหวัดคัดจมูก
3. บริเวณตาจะเกิดอาการตาแดง ตาอักเสบ
4. ระบบหายใจ สารหนูจะไปสะสมที่ปอด ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบอาจมีผลทำให้เกิดมะเร็งปอด
5. ระบบประสาท สารหนูเมื่อเข้าสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิต ทำให้มีผลต่อน้ำย่อยที่ช่วยในกระบวนการเมตาบอลิซึม ทำให้หน้าที่ในการทำงานเสียไป เกิดการเบื่ออาหาร ปลายประสาทอักเสบ
6. บริเวณสมอง ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม
7. อื่นๆ เช่น โลหิตจาง อาการทางตับ ไต

2.1.6 มาตรฐานสารหนูในน้ำใต้ดิน

ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน พ.ศ. 2535 ได้กำหนดมาตรฐานสารหนูไม่เกิน 0.01 mg/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543)

2.1.7 มาตรฐานสารหนูในน้ำใต้ดินเพื่อการบริโภค

ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกัน ด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ พ.ศ. 2551 ได้กำหนดมาตรฐานสารหนูไม่เกิน 0.05 mg/L (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551)

2.1.8 แหล่งกำเนิดสารหนูในสิ่งแวดล้อม

2.1.8.1 แหล่งธรรมชาติ

1. หิน ดิน และตะกอน สารหนูจะพบกระจายในแร่ธาตุต่างๆ ที่พบมาคือ รูป Arsenides ของทองแดง ตะกั่ว เงิน หรือทอง หรือในรูปซิลไฟด์ สีนแร่ที่มีสารหนูอยู่ได้แก่ Arsenopyrite (FeAsS) Realgar (As_4S_4) หรือ Orpiment (As_2S_3)

นอกจากนี้ สารหนูยังพบอยู่ในดิน ถ่านหิน ตะกอน และพบปริมาณมากขึ้นในเขตแหล่งของสินแร่ซิลไฟด์ แม้ในดินที่ไม่มีการปนเปื้อนด้วยสารหนูมาก่อนก็จะพบได้ในปริมาณ 0.2-40 mg/kg ในขณะที่ดินที่เคยมีการใช้สารหนูจะพบความเข้มข้นสารหนูสูงถึง 550 mg/kg สำหรับในตะกอนตามธรรมชาติจะน้อยกว่า 10 mg/kg (น้ำหนักแห้ง)

2. อากาศและน้ำ ฝุ่นละอองในอากาศและน้ำจะมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และอินทรีย์ สารหนูในน้ำจะพบในรูปอินทรีย์ ได้แก่ Methyl arsenic acid และ Dimethyl arsenic acid

3. พืชและสัตว์ เหล็กออลูมิเนียมในดินจะจับกับ Arsenate ion ซึ่งจะมีผลต่อการดูดสารหนูของต้นพืช โดยทั่วไปจะพบสารหนูประมาณ 0.1-5 mg/kg (น้ำหนักแห้ง) ในพืชที่ไม่เคยได้รับสารหนูเลย นอกจากนี้ยังพบสารหนูในสาหร่ายทะเลด้วยเช่นกัน

2.1.8.2 การใช้สารพิษป้องกันกำจัดศัตรูพืชทางการเกษตร

การใช้ปุ๋ยซุเปอร์ฟอสเฟต ซึ่งในปุ๋ยจะมีสารประกอบสารหนูประมาณ 0.1% ส่วนการใช้ยาฆ่าแมลงที่สำคัญคือ Lead arsenate และสารประกอบสารหนูชนิดอื่นๆ ทำให้สารหนูเข้าไปปนเปื้อนในดินโดยเฉพาะดินสวนผลไม้ที่มีการใช้ Lead arsenate มาก นอกจากนั้นสารหนูบางส่วนจะถูกพุดูดซับเข้าไป บางส่วนเข้าไปปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน และในสัตว์ที่อาศัยอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ได้รับการปนเปื้อนจากสารหนู

2.1.8.3 กิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม

การปล่อยน้ำทิ้งที่มีการปนเปื้อนสารหนูจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การเผาถ่านหิน โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานถลุงโลหะต่างๆ เป็นต้น ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณความเข้มข้นของสารหนูในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่างๆ

ประเภทกิจกรรม	ความเข้มข้นสารหนู (mg/L)	ที่มา
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3000	National Academy of Science (1977)
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1-0.8	
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22	
โรงงานโลหะผสมทั้งสแตน-โมลิบดีนัม	0.9	
โรงงานนิเกิล	0.04-1.4	
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06	
โรงงานถลุง	2.3-430	BalaSubramanian and Madhavan (2001)
โรงงานถลุงทองแดง	0.04-0.1	Dziubek (2017)

2.1.9 การปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทย

การปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทย มีการรายงานจากผลการศึกษาในพื้นที่หลายจังหวัด ได้แก่ จังหวัดนครศรีธรรมราช พิจิตร เพชรบูรณ์ และเลย ผลการตรวจวัดสรุปไว้ดังตารางที่ 2.2

2.1.9.1 จังหวัดนครศรีธรรมราช

Williams et al. (1996) ศึกษาการปนเปื้อนสารหนูพื้นที่ในอำเภอรัตนพิบูลย์จังหวัด นครศรีธรรมราช บริเวณน้ำใต้ดินที่ระยะการเก็บตัวอย่าง 2-5 เมตร pH 6.04-7.41 จำนวน 23 ตัวอย่าง พบการปนเปื้อนสารหนู 0.00125-5.114 mg/L ที่ระยะการเก็บตัวอย่างน้ำใต้ดิน 10-45 เมตร pH 6.44-7.11 จำนวน 13 ตัวอย่าง พบสารหนู 0.00125-1.032 mg/L และบริเวณน้ำผิวดิน พบสารหนู 0.00048-0.583 mg/L ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินเพื่อการบริโภคกำหนดให้ไม่เกิน 0.05 mg/L (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2551)

กรมควบคุมมลพิษ (2541) ศึกษาโครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช พ.ศ. 2531 ทำการสำรวจความเข้มข้นสารหนูในบริเวณต่างๆ ได้แก่ บ่อน้ำตื้น น้ำผิวดิน ตะกอนท้องน้ำของลำน้ำ และดิน โดยในบ่อน้ำตื้นพบร้อยละ การปนเปื้อนของสารหนู 27.8% ของบ่อน้ำตื้นทั้งหมด หรือมากกว่า 0.05 mg/L โดยคิดเป็น 13.5% เป็นบ่อน้ำบาดาลเพื่อการบริโภค พบสารหนูเกินมาตรฐานเฉลี่ยสูงสุด 1.167 mg/L ในแหล่งน้ำผิวดิน ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2535-2540 จำนวน 560 ตัวอย่าง กรมทรัพยากรธรณีเก็บตัวอย่างน้ำ พบการปนเปื้อนสารหนูมีค่าอยู่ระหว่าง 0.002-1.005 mg/L โดย 82% พบค่าสารหนูเกินค่ามาตรฐานน้ำผิวดิน นอกจากนี้ในตะกอนท้องน้ำของลำน้ำในเขตพื้นที่ตำบลรัตนพิบูลย์ ปีพ.ศ. 2537-2538 มีการเก็บตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 44 ตัวอย่าง โดยกรมทรัพยากรธรณี ตำบลที่มีการปนเปื้อนสูงสุดเท่ากับ 1,000 mg/kg ส่วนการปนเปื้อนสารหนูในดิน พบความเข้มข้นสารหนูในดินมีค่าตั้งแต่ 0.0-466.7 mg/kg โดย 72% ของตัวอย่างที่สำรวจทั้งหมดมีการปนเปื้อนของสารหนูเกินค่ามาตรฐานในดินซึ่งได้กำหนดไว้ไม่เกิน 3.9 mg/kg (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

Visoottiviseth, Francesconi and Sridokchan (2002) ศึกษาปริมาณสารหนูใน อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช และ จังหวัดยะลา พบว่าในตัวอย่างดินมีการปนเปื้อนสาร หนู 810-1,400 µg/g และ 200-3,000 µg/g ตามลำดับ และบริเวณทางแร่ พบสาร หนู 9,780-14,200 µg/g และจากการตรวจวัดสารหนูบริเวณผิวน้ำดินและลึกลงไป 20-25 cm บริเวณที่มีการ กักเก็บดินในเขตร้อนพิบูลย์พบสารหนู 7,510-8,800 และ 2,560-3,710 µg/g ตามลำดับ และบริเวณ ทางแร่ในเขตบ้นังस्ता พบสารหนู 3,530-4,810 และ 8,800-1,560 µg/g ตามลำดับ

Chintakovid et al. (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ดอกดาวเรืองพันธุ์ผสมใน การบำบัดสารหนูที่ปนเปื้อนในพื้นที่อำเภอรัตนพิบูลย์ โดยทำการสุ่มตัวอย่างดิน 5 ตัวอย่าง พบค่า สารหนูเท่ากับ 500 470 390 367 และ 362 µg/g

2.1.9.2 จังหวัดพิจิตร และจังหวัดเพชรบูรณ์

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (2554) โครงการศึกษาการปนเปื้อนและการวางเครือข่ายเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่อำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และ อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์ บริเวณสำรวจ ได้แก่ ดิน น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน โดยพบว่าในตัวอย่างดินตัวอย่าง 50 ตัวอย่าง พบว่ามีตัวอย่างจำนวน 12 ตัวอย่าง ที่มีค่าสารหนูเกินมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งได้กำหนดไว้ไม่เกิน 3.9 mg/kg โดยมีค่าตั้งแต่ 4.6-73 mg/kg บริเวณน้ำผิวดิน พบว่าความเข้มข้นสารหนูมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานทุกสถานี ยกเว้นสถานีอ่างเก็บน้ำเขาหม้อ ในช่วงปลายฤดูฝน (ตุลาคม พ.ศ. 2553) มีการปนเปื้อนสารหนูในน้ำผิวดินสูงสุดเท่ากับ 0.0190 mg/L ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน ประเภทที่ 3 และกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดมาตรฐานคุณภาพผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคให้มีความเข้มข้นสารหนูสูงสุด 0.01 mg/L และบริเวณน้ำใต้ดิน ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำใต้ดินครั้งที่ 1 2 และ 3 ค่า pH 5.80-7.39 พบปริมาณสารหนูเกินค่ามาตรฐานในสถานีเก็บตัวอย่างที่อยู่นอกพื้นที่เหมืองสูงสุดเท่ากับ 0.0136 0.038 และ 0.039 mg/L ตามลำดับ ซึ่งเกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้เพื่อการบริโภค 0.01 mg/L แต่ไม่เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคเกณฑ์อนุโลมสูงสุด 0.05 mg/L

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2559) ติดตามปริมาณสารหนูในตัวอย่างดิน ตะกอนท้องน้ำ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน พื้นที่ในจังหวัดพิจิตร จังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดพิษณุโลก พบว่าตัวอย่างดินมีสารหนู 1.66-49.00 mg/kg โดยเกินค่ามาตรฐาน 6 สถานี ตัวอย่างตะกอนดินมีสารหนูเกินมาตรฐานในช่วง 7.64-30.1 mg/kg ตัวอย่างน้ำผิวดินทั้ง 2 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูแล้ง และฤดูฝน พบว่า น้ำผิวดินครั้งที่ 1 (ฤดูแล้ง) น้อยกว่า 0.0001-0.004 mg/L ในขณะที่ตัวอย่างน้ำผิวดินครั้งที่ 2 (ฤดูฝน) มีค่าอยู่ในช่วง 0.0002-0.009 mg/L และตัวอย่างน้ำใต้ดินระดับตื้นและลึกทั้ง 2 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูแล้ง และฤดูฝน พบว่าน้ำใต้ดินระดับตื้น ครั้งที่ 1 (ฤดูแล้ง) pH 4.88-7.02 มีปริมาณสารหนู 0.0007-0.01 mg/L และน้ำใต้ดินระดับตื้น ครั้งที่ 1 (ฤดูฝน) มีปริมาณน้อยกว่า 0.0001-0.01 mg/L ในขณะที่ตัวอย่างน้ำใต้ดินระดับลึก ครั้งที่ 2 (ฤดูแล้ง) pH 6.36-7.14 มีปริมาณสารหนู 0.002-0.12 mg/L และน้ำใต้ดินระดับลึก ครั้งที่ 2 (ฤดูฝน) มีปริมาณน้อยกว่า 0.0001-0.01 mg/L

2.1.9.3 จังหวัดเลย

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555) ศึกษาโครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาการปนเปื้อนโลหะหนักในเขตพื้นที่ภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย ติดตามปริมาณสารหนูในตัวอย่างดิน ตะกอนท้องน้ำ น้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน พบว่าปริมาณสารหนูในดินเกินค่ามาตรฐานเท่ากับ 61.33% ของสถานีทั้งหมด (ค่ามาตรฐานของสารหนูในดินไม่เกิน 3.9 mg/kg) เมื่อหาความถี่สะสมสัมพัทธ์ พบว่าช่วงความเข้มข้นที่พบจำนวนตัวอย่างมากที่สุดอยู่ในช่วง 0.0-13.5 mg/kg จำนวน 63 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 84% ในตะกอนท้องน้ำพบปริมาณสารหนูสูงกว่ามาตรฐานจำนวน 23 สถานี คิดเป็น 76.67% ของสถานีเก็บตัวอย่างทั้งหมด สถานีเก็บตัวอย่างที่พบความเข้มข้นเกินกว่าค่ามาตรฐานอยู่บริเวณที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในการทำการเกษตร ประเภทนาข้าว ยางพารา ข้าวโพด และอื่นๆ เมื่อหาความถี่สะสมสัมพัทธ์ พบว่าช่วงความเข้มข้นที่พบจำนวนตัวอย่างมากที่สุดอยู่ในช่วง 0.0-23.9 mg/kg จำนวน 24 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 80% บริเวณน้ำผิวดินทั้ง 2 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูแล้ง และฤดูฝน ในบริเวณน้ำผิวดิน ครั้งที่ 1 (ฤดูแล้ง) พบว่ามีค่า 0.0343 0.0149 และ 0.0133 mg/L (มาตรฐานของสารหนูในน้ำผิวดินไม่เกิน 0.01 mg/L) ครั้งที่ 2 (ฤดูฝน) พบว่าสารหนูมีค่าเกินมาตรฐาน 0.0136 mg/L เมื่อหาความถี่สะสมสัมพัทธ์ พบว่าช่วงความเข้มข้นที่พบจำนวนตัวอย่างมากที่สุดอยู่ในช่วง 0.0-0.008 mg/L จำนวน 63 ตัวอย่าง หรือคิดเป็น 84% และบริเวณน้ำใต้ดิน ครั้งที่ 1 พบสถานีเก็บตัวอย่างมีค่าความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกสถานี (มาตรฐานของสารหนูในน้ำบาดาลไม่เกิน 0.05 mg/L) และครั้งที่ 2 พบว่าการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าจำกัดการวิเคราะห์ในทุกสถานี

นอกจากนี้ได้มีการติดตามปริมาณสารหนูจากหน่วยงานอื่น ได้แก่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และหน่วยงานราชการ (กรมควบคุมมลพิษ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล) โดยการศึกษาของมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2549-2555 จากตัวอย่างน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน พบว่าบริเวณน้ำผิวดินเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งที่พบสารหนูเกินค่ามาตรฐาน เท่ากับ 99% ในขณะที่บริเวณน้ำใต้ดิน เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งที่พบสารหนูเกินค่ามาตรฐาน เท่ากับ 52%

ในขณะที่การติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อมของหน่วยราชการ ได้แก่ กรมควบคุมมลพิษ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล พ.ศ. 2552-2555 จากตัวอย่างน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน พบว่าบริเวณน้ำผิวดินมีค่าสารหนูเกินมาตรฐาน ช่วงความเข้มข้น 0.0158-0.1238 mg/L ในขณะที่บริเวณน้ำใต้ดินมีค่าสารหนูเกินมาตรฐาน ช่วงความเข้มข้น 0.1081-0.1698 mg/L

ตารางที่ 2.2 การปนเปื้อนสารหนูในประเทศไทย

ความเข้มข้นของสารหนูที่ตรวจวัด	จังหวัดนครศรีธรรมราช				จังหวัดพิจิตร และ เพชรบูรณ์		จังหวัดเลย
	Williams et al. (1996)	กรมควบคุมมลพิษ (2541)	Visootticiset, Francesconi, and Sridokchan (2002)	Chintakovid et al. (2008)	มหาวิทยาลัยขอนแก่น (2554)	สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2559)	สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555)
1. น้ำผิวดิน (mg/L)							
- ฤดูแล้ง	0.00048-0.583	0.002-1.005	-	-	<มาตรฐาน	<0.0001-0.004	เกินมาตรฐาน 0.0133-0.0343
- ฤดูฝน			-	-	0.019	0.0002-0.009	มากที่สุดช่วง 0.0-0.008
2. น้ำใต้ดิน (mg/L)	0.00125-5.114	>0.05	-	-	0.0136-0.039	0.002-0.12	เกินมาตรฐาน
3. ดิน (mg/kg)	-	0-466.7	200-14,000	362-500	4.6-73	1.66-49.00	มากที่สุดช่วง 0.0-13.5
4. ตะกอนท้องน้ำ (mg/L)	-	1,000	-	-	-	7.64-30.01	มากที่สุดช่วง 0.0-23.9

หมายเหตุ

- มาตรฐานสารหนูในน้ำผิวดินไม่เกิน 0.01 mg/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2537)
- มาตรฐานสารหนูในน้ำใต้ดินไม่เกิน 0.01 mg/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543)
- มาตรฐานสารหนูในดินไม่เกิน 3.9 mg/L (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2547)

2.1.10 เทคโนโลยีการกำจัดสารหนู

จากการปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยที่มีการปนเปื้อนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมและประชาชนในพื้นที่ ทำให้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาแก้ปัญหาเหล่านี้ กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical processes) เป็นวิธีที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความรวดเร็วและสามารถควบคุมแต่ละขั้นในกระบวนการได้ดี ซึ่งแต่

ละวิธีล้วนมีข้อดี-เสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 โดยเลือกวิธีบำบัดให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การนำไปใช้ในการกำจัดสารหนูในแต่ละพื้นที่

ตารางที่ 2.3 เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารหนู (Mohan and Pittman, 2007)

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน/การตกตะกอน		
การทำปฏิกิริยากับอากาศ	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีที่ค่อนข้างง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ - เหมาะกับการกำจัดสารหนูในพื้นที่ 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นการกำจัดสารหนูเบื้องต้นเท่านั้น As(V) และต้องอาศัยการเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการออกซิเดชัน
การออกซิเดชันทางเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - ตัวออกซิไดซ์มีความบริสุทธิ์และสามารถทำลายจุลินทรีย์ได้ - เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีความรวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการควบคุมค่า pH เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู ซึ่งทำให้ไม่มีความเสถียรในการกำจัด
กระบวนการโคแอกกูเลชัน(การรวมตะกอน)/ การตกตะกอนร่วม		
การรวมตะกอนด้วยสารส้ม	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นสารเคมีที่มีความทนทานหาได้ง่าย - มีค่าใช้จ่ายต่ำและทำได้ง่าย - มีประสิทธิภาพเนื่องจากใช้ได้กับค่า pH ที่หลากหลาย 	<ul style="list-style-type: none"> - กากตะกอนที่ได้มีความเป็นพิษ - มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูต่ำ - ในบางครั้งอาจต้องใช้กระบวนการออกซิเดชันก่อน
การตกตะกอนด้วยน้ำปูนใส	<ul style="list-style-type: none"> - สารเคมีสามารถหาได้ทั่วไป 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการปรับค่า pH
การดูดซับ/การแลกเปลี่ยนไอออน		
ถ่านกัมมันต์	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นวิธีที่รู้จักกันโดยทั่วไป - มีการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมต่างๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องเปลี่ยนถ่านกัมมันต์หรือปรับสภาพใหม่เมื่อใช้หลายครั้ง
ผงเหล็กเคลือบบนทราย	<ul style="list-style-type: none"> - มีค่าใช้จ่ายต่ำและไม่มีการนำกลับมาใช้ใหม่หรือการปรับสภาพ - กำจัดได้ทั้ง As(III) และ As(V) 	<ul style="list-style-type: none"> - วิธีไม่เป็นมาตรฐาน - ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเสียที่มีความเป็นพิษ

ตารางที่ 2.3(ต่อ) เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสารหนู (Mohan and Pittman, 2007)

การดูดซับ/การแลกเปลี่ยนไอออน (ต่อ)		
การแลกเปลี่ยนไอออน โดย ใช้เรซิน	- มีการกำหนดองค์ประกอบและความ ประสิทธิภาพอย่างชัดเจน - ไม่ขึ้นกับค่า pH - สามารถใช้เรซินที่มีไอออนจำเพาะใน การกำจัดสารหนู	- มีค่าใช้จ่ายสูง ใช้เทคโนโลยีสูงใน การทำงานและซ่อมแซมระบบ - การนำกากตะกอนกลับมาใช้ หรือปรับสภาพใหม่ยังเป็นปัญหา - กำจัด As(III) ได้ยาก - ข้อจำกัดเรื่องอายุการใช้งานของ เรซิน
การใช้แผ่นเมมเบรน		
นาโนฟิลเตรชัน	- มีการระบุขั้นตอนและองค์ประกอบ ชัดเจน - มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด	- ต้นทุนและค่าใช้จ่ายสูง - หากมีน้ำปริมาณมากจะทำให้ไม่ สามารถใช้งานได้
ออสโมซิสผันกลับ	- ขอบเสียที่ได้ไม่มีความเป็นพิษ	- ใช้เทคโนโลยีสูงในการทำงาน และซ่อมแซมระบบ
อิเล็กโตรไดอะไลซิส	- สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่นๆได้	- น้ำเสียที่ได้มีความเป็นพิษ

2.1.10.1 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process)

การเกิดออกซิเดชันทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Reduction) ซึ่งจะเกิดคู่กัน โดยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้และรับอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ตามลำดับ และนำหลักการนี้มาใช้ในการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันของสารหนู โดยทั่วไปพบสารหนูมีเลขออกซิเดชัน +3 และ +5 คือ As(III) และ As(V) ตามลำดับ ซึ่ง As(V) มีความเป็นพิษมากกว่า As(III) ทำให้มีการนำกระบวนการนี้มาทำให้สารหนูเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจาก As(III) ให้เป็น As(V) จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำสารออกซิแดนต์มาใช้ในการกำจัดสารหนูมากมาย เช่น H_2O_2 MnO_4^- TiO_2/UV systems เป็นต้น หลังจากกระบวนการนี้จะใช้กระบวนการดูดซับ As(V) ในขั้นตอนต่อไป

2.1.10.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคของของแข็ง โดยสารถูกดูดซับ (Adsorbate) อยู่ในรูปสารละลายหรือก๊าซ การดูดซับเกิดขึ้นบนผิว โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดึงเข้ามาติด

ผิวของสารดูดซับ (Adsorbent) ดังนั้นวัสดุดูดซับจะมีคุณสมบัติมีความเป็นรูพรุนสูง และมีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้ความสามารถในการดูดซับสารประกอบต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1 ประเภทการดูดซับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับด้วยแรงที่อ่อน (Van der Waals) ไม่มีการให้อิเล็กตรอนหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน และไม่มีพันธะเกิดขึ้น การยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผันกลับได้ (Reversible) ตำแหน่งที่ดูดซับไม่เฉพาะเจาะจง (Specific site) และมีค่าพลังงานการคายความร้อนต่ำกว่า 25 KJ/mol

- การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดพันธะเคมี (Covalent bond) ระหว่างวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ หรือมีการให้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ พันธะที่สร้างขึ้นค่อนข้างแข็งแรงไม่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับได้ (Irreversible) ตำแหน่งที่ดูดซับเฉพาะเจาะจง ไม่เกิดทั่วบริเวณผิวของตัวดูดซับทั้งหมด และมีค่าพลังงานการคายความร้อน 60-85 KJ/mol

2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

- ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Size and surface area) โดยอัตราเร็วในการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ดังนั้น สารดูดซับชนิดผง (Powder) จึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าชนิดเกล็ด (Granular) ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย

- ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดซับ (Solute solubility and size) โดยขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของสารดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงของสารดูดซับ

- อุณหภูมิ (Temperature) การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา นอกจากนี้ อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงอีกทางหนึ่งด้วย

- ความปั่นป่วน (Turbulence or mixing) อัตราเร็วในการดูดซับเกิดขึ้นกับการแพร่ภายนอก (ฟิล์ม) และการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำ (ของ

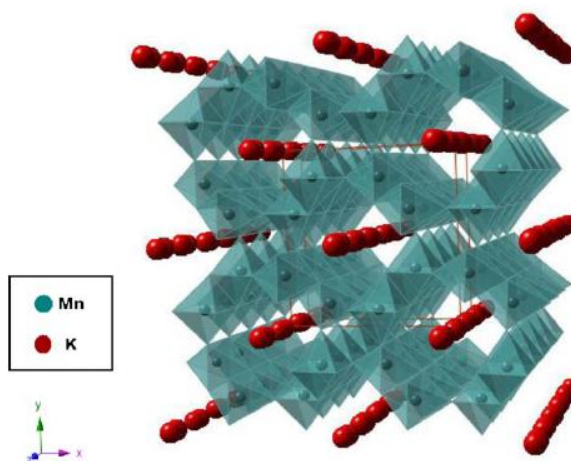
ไหล) ที่อยู่รอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดซับ

- ค่าพีเอช (pH value) ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดซับเนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดซับได้ค่อนข้างแข็งแรง เมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับไอออนอื่นๆนอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนแล้วยังมีผลต่อการละลายน้ำของสารต่างๆด้วย

2.1.11 แมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide octahedral molecular sieve ชนิด K-OMS2): ลักษณะและสมบัติ

สาร Oxidized agent ที่ใช้ในการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ As(III) เช่น Manganese oxides (MnO_2) (Driehaus, Seith and Jekel, 1995) O_2 และ/หรือ Ozone (O_3) (Kim and Nriagu, 2000) Hydrogen peroxide (H_2O_2) (Pettine, Campanella and Millero, 1999) และ TiO_2/UV systems (Bissen et al., 2001) เป็นต้น แต่เนื่องจากสารดังกล่าวยังมีข้อเสียคือ ความสามารถในการกำจัดอาร์เซนไนต์น้อย มีพื้นที่ผิวมีในการกำจัดสารอาร์เซนไนต์อย่างจำกัด ดังนั้นจึงเลือกใช้แมงกานีสออกไซด์มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากสังเคราะห์ได้ง่าย ใช้ต้นทุนสังเคราะห์ต่ำ มีความหลากหลายของโครงสร้าง มีความเป็นพิษต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Qiu et al., 2011) และยังมีพื้นที่ผิวสูงถึง $134.76 \text{ m}^2/\text{g}$ (Phanthasri et al., 2018) ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาร์เซนไนต์ได้สูง อีกทั้งมีงานวิจัยที่สามารถนำแมงกานีสออกไซด์มาใช้ในการกำจัดทั้ง As(III) และ As(V) (Babaeivelni and Khodadoust, 2016) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดต่อพื้นที่ผิวของ As(III) และ As(V) เท่ากับ 188 และ $121 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ตามลำดับ และเนื่องจากแมงกานีสมีเลขออกซิเดชันหลายค่า ได้แก่ +2 +3 +4 +6 +7 จึงมีโครงสร้างที่หลากหลายในสิ่งแวดล้อม เช่น MnO MnO_2 Mn_2O_3 และ Mn_3O_4 (Saputra et al., 2013)

K-OMS2 มีสูตรโมเลกุล $KMn_8O_{16} \cdot nH_2O$ โดยประกอบด้วยการทำพันธะที่ขอบ 2×2 ของ MnO_6 octahedral chains ในหนึ่งมิติมีโครงสร้าง $4.6 \text{ \AA} \times 4.6 \text{ \AA}$ นำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสารออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากโครงสร้างเสถียร มีความแข็งแรง ขนาดรูพรุนสูง และพื้นที่ผิวสูง (Yodsa-nga et al., 2015) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

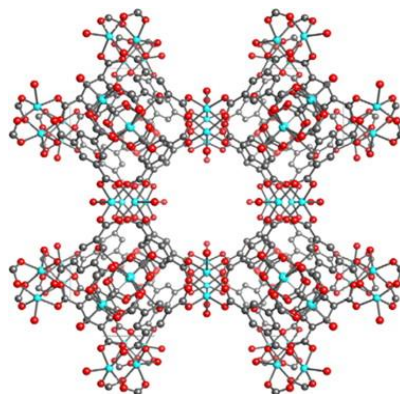


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ K-OMS2 (Iyer et al., 2010)

2.1.12 โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron-based metal-organic framework ชนิด Fe-BTC): ลักษณะและสมบัติ

โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ (Metal-organic frameworks; MOFs) เป็นโครงข่ายที่มีการศึกษาในปัจจุบันเป็นจำนวนมาก ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโลหะและส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่ต่อกันเป็นโครงสร้างจนเกิดเป็นโครงข่าย (Framework) โดยรูปแบบของโครงสร้างสามารถปรับเปลี่ยนให้มีความหลากหลาย ทำให้มีการนำ MOFs มาประยุกต์ใช้ในงานสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก เช่น การทำให้อากาศบริสุทธิ์ การแยกแก๊ส การกักเก็บแก๊ส การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysis) (Zhu et al., 2012) ของไหลนาโน (Nanofluids) เซนเซอร์ การดูดซับน้ำ การกำจัดแก๊สพิษ และการกักเก็บพลังงาน (Nandasiri et al., 2016) เป็นต้น

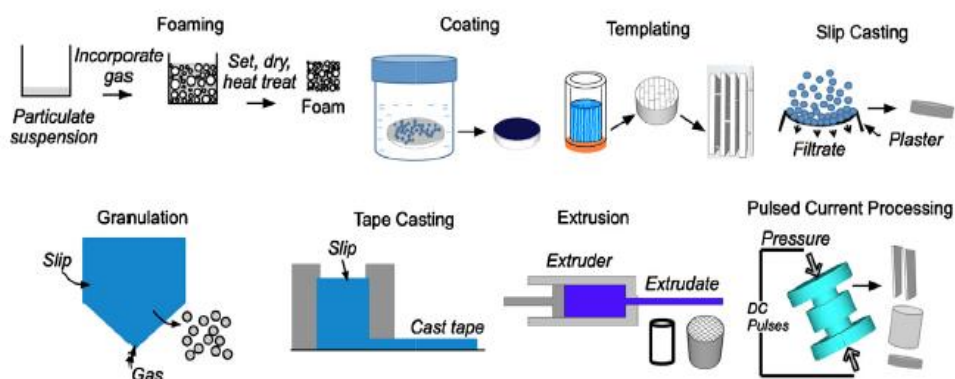
สารโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron(III) trimesic; Fe-BTC) จัดอยู่ในกลุ่มของ MOFs ชนิดหนึ่ง ที่เริ่มมีการศึกษามากขึ้นในปัจจุบันและนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น การเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า การเป็นเซนเซอร์ (Babu et al., 2010) การดูดซับ (Garcia et al., 2014, Zukal et al., 2015, Zhu et al., 2012) โดยมีพื้นที่ผิวสูงถึง $1,500 \text{ m}^2/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุน 4.6 \AA (Du et al., 2016) แสดงแบบจำลองในรูปที่ 2.4 โดยนำมาเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากโครงสร้างเสถียร มีความแข็งแรง ขนาดรูพรุนสูง พื้นที่ผิวสูงและง่ายต่อการสังเคราะห์ (Zhu et al., 2012)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC) (อะตอมสีเทา เป็นของคาร์บอน, อะตอมสีแดง เป็นของออกซิเจน และอะตอมสีฟ้าเป็นเหล็ก) (Shahid and Nijmeijer, 2014)

2.1.13 การขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ

ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวดูดซับในปัจจุบันนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสามารถนำมาทำการขึ้นรูปและเลือกกระบวนการขึ้นรูปให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการได้ อีกทั้ง สามารถเลือกขนาดรูปร่างที่หลากหลาย การขึ้นรูปสารแต่ละแบบให้ประสิทธิภาพของงานใช้งานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างวิธีการขึ้นรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เช่น การเคลือบ (Coating) แม่แบบ (Templating) การเทหล่อ (Slip casting) การทำแกรนูล (Granulation) การอัดเป็นแท่ง (Extrusion) และการอัดเม็ด (Tableting) เป็นต้น การขึ้นรูปด้วยเทคนิคต่างๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย เช่น การกักเก็บแก๊ส การแยกแก๊สให้บริสุทธิ์ การแยกอากาศ การดูดซับและการออกซิเดชันสารพิษ และการทำให้แห้ง เป็นต้น



รูปที่ 2.5 การขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับแบบต่างๆ (Akhtar et al., 2014)

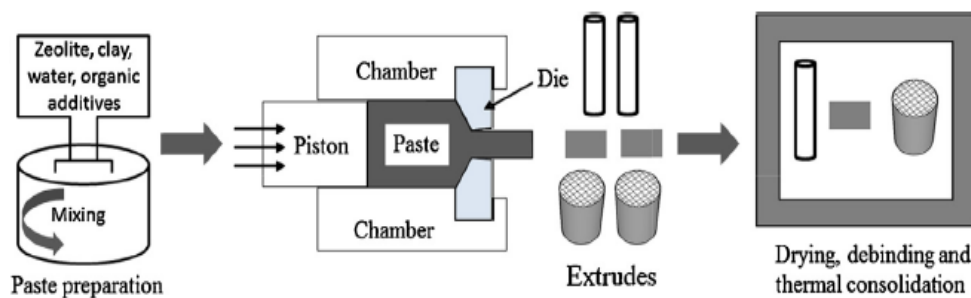
2.1.13.1 การอัดเม็ด (Tableting)

เป็นการขึ้นรูปที่ใช้กันอย่างแพร่หลายของตัวเร่งปฏิกิริยา (Stillwell, 1957, Rotaru et al., 2005, Baldovino-Medrano et al., 2015) ในอุตสาหกรรมยา ได้ขนาดและรูปร่างที่แน่นอน มีความรวดเร็ว และเป็นวิธีขึ้นรูปที่ทำให้ลักษณะอนุภาคและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีความแข็งแรง เกิดการแพร่ (Diffusion) ได้ดี (Rotaru et al., 2005) ตัวอย่างการนำมาใช้ เช่น การขึ้นรูปของ Trichloroisocyanuric acid (TCCA) เพื่อใช้ฆ่าเชื้อในสระว่ายน้ำ (Pasetta et al., 2016) การขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง VAIOH VAIO และ BiMO เพื่อเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Baldovino-Medrano et al., 2015) เป็นต้น แต่เนื่องจากการอัดเม็ดใช้ต้นทุนในกระบวนการที่ค่อนข้างสูง มีราคาเครื่องอัดที่แพง จึงเหมาะสมในการขึ้นรูปในปริมาณที่มากพอและมีอุปกรณ์ครบครัน

2.1.13.2 การอัดแท่ง (Extrusion)

เป็นเทคนิคขึ้นรูปที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดในการขึ้นรูปของโลหะ โพลีเมอร์ และเซรามิก โดยการขึ้นรูปด้วยเทคนิคนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทน แข็งแรง (Akhtar et al., 2014) นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม อีกทั้งนำมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การอัดแท่งของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ในกระบวนการ Dehydrogenation (Addiego, Liu and Boger, 2001) การอัดแท่งของตัวเร่งปฏิกิริยา Ts-1/SiO₂ ในกระบวนการ Epoxidation ของโพรพิลีน (Song et al., 2015) และการอัดแท่งของซีโอไลต์ในการเร่งปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ AlPO₄ (Freiding, Patcas and Kraushaar-Czarnetzki, 2007) เป็นต้น ถึงแม้เทคนิคนี้จะให้อัตราการผลิตที่สูง เป็นกระบวนการอัตโนมัติ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาด รูปร่างที่แน่นอนและหลากหลาย แต่เนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการสูง เครื่องมือในการอัดมีต้นทุนสูง จึงเหมาะกับการขึ้นรูปของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มากกว่านำมาใช้ในการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ

จากงานวิจัยของ (Baldovino-Medrano et al., 2015) อธิบายถึงการอัดแท่งที่เป็นเทคนิคขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากที่สุด ต้องมีการควบคุมลักษณะทางเคมีฟิสิกส์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการอัดแท่งให้มีประสิทธิภาพอยู่เสมอ โดยงานวิจัยของ (Akhtar et al., 2014) แสดงกระบวนการอัดแท่งของตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์ (Zeolites) ให้เป็นแท่งรังผึ้ง (Honeycombs) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการอัดแท่งของซีโอไลต์ (Zeolites) ให้เป็นแท่งรังผึ้ง (Honeycombs)

(Akhtar et al., 2014)

2.1.13.3 การเคลือบ (Coating)

การเคลือบเป็นเทคนิคที่นิยมและมีความสำคัญในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ เป็นเทคนิคที่มีกระบวนการไม่ยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายต่ำ มีความเสถียรของผลิตภัณฑ์ มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย (Akhtar et al., 2014) งานวิจัยก่อนหน้าได้ทำเทคนิคนี้มาขึ้นรูปพบว่าประสิทธิภาพที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปแบบอื่น (Khamdahsag et al., 2012) และคุณสมบัติสำคัญที่มักนำมาประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับ เนื่องจากช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการขึ้นรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวดูดซับอื่นๆ ที่ใช้ในการกำจัดสารหนู ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด As(III) และ As(V) ด้วยเทคนิคการเคลือบบนวัสดุที่แตกต่างกัน

วัสดุที่เคลือบ	ชนิดของสารที่ถูกละลาย	ขนาดของสารที่ถูกละลาย (mm)	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ช่วงความเข้มข้น (mg/L)	ประสิทธิภาพกำจัด (mg/g)		ที่มา
					As(III)	As(V)	
ε-MnO ₂	Waste goethite	0.25-1	232	1-100	8.03	28.25	Shih, Huang and Huang (2015)
MHCMP	Macroporous polymers	<0.001	35	1	82.3	49.6	Kumar et al. (2016)
Zirconium oxide	Sand	0.106-0.125	-	0.2-1	0.137	-	Chaudhry, Zaidi and Siddiqui (2017)
Iron-oxide	Sand	-	-	0.2	-	0.037	Rahman et al. (2013)

2.1.14 การออกแบบคอลัมน์ ในการออกแบบระบบคอลัมน์ ใช้เกณฑ์ต่อไปนี้

1. การควบคุมทิศทางการไหลจากด้านบนลงล่าง หรือด้านล่างขึ้นด้านบน
2. เลือกทิศทางของน้ำที่ไหลผ่าน หากเป็นการไหลจากด้านบนลงด้านล่าง จะให้ไหลด้วยแรงดัน (Pressure) หรือไหลตามแรงโน้มถ่วง (Gravity) หากเป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนจะให้ชั้นของวัสดุติดชิดอัดกันแน่น (Packed bed) หรือขยายตัวได้ (Expanded bed) มากน้อยเมื่อมีน้ำไหลผ่าน
3. ลักษณะของคอลัมน์ที่บรรจุ รวมถึงชนิดและขนาดของวัสดุที่ใช้ทำคอลัมน์

2.1.15 การวิเคราะห์หลักเกณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันและดูดซับที่ใช้ในการศึกษาแบบกะ (Batch system)

2.1.15.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ดังในสมการ 2.1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (2.1)$$

เมื่อ	q_t	คือ ความจุการดูดซับเมื่อเวลา t (mg/g)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น (mg/L)
	C_t	คือ ความเข้มข้นสารหนูเมื่อเวลา t (mg/L)
	V	คือ ปริมาตรสารละลายสารหนู (L)
	W	คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

2.1.15.2 จลนพลศาสตร์ (Kinetics models)

จลนพลศาสตร์เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราความเร็วของกระบวนการทางเคมีโดยการวัดสถานะที่ส่งผลต่อความไวของปฏิกิริยาเคมีและช่วยให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลในช่วงเวลาที่เหมาะสม กลไกที่เป็นไปได้ในการดูดซับ และสถานะต่างๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจนเข้าสู่ช่วงสมดุลของสารที่ทำปฏิกิริยาหรือวัสดุดูดซับและสารที่ถูกดูดซับนั้นจะถูกอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first order Kinetics) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second order Kinetics) และการแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion model) เป็นต้น (Akpomie and Dawodu, 2016)

1. Pseudo first order kinetics คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะแปรผันไปตามเวลาของปฏิกิริยาหรือการดูดซับ สามารถเขียนสมการ Pseudo first order ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการ 2.2

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2.2)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (1/min)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

2. Pseudo second order kinetics คือ การดูดซับบนวัสดุที่แน่นคงที่เมื่อเวลาผ่านไป และจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิวของวัสดุที่ทำปฏิกิริยาหรือดูดซับที่เกิดพันธะทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ถูกทำปฏิกิริยาหรือดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล สามารถเขียนสมการ Pseudo second order ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการ 2.3

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (2.3)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)
	k_2	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (1/min)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

3. การแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion model) ในการพิจารณาว่าปฏิกิริยาใดในกระบวนการดูดซับเกิดปฏิกิริยาช้าที่สุด (Rate limiting step) ซึ่งมีความสำคัญเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกของการดูดซับ จากงานวิจัยของ (Rajaković, 1992) ในการดูดซับสาร As(V) โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ เกิดกระบวนการดูดซับบนบริเวณพื้นผิวภายในของรูพรุนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดการแพร่บนพื้นผิวจึงไม่ใช่ปฏิกิริยาที่ช้าที่สุด ดังนั้นในการอธิบายว่าในขั้นตอนใดของการเกิดกระบวนการดูดซับเป็น Rate controlling step จึงใช้สมการ Intra-particle diffusion ดังสมการ 2.4 เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_t และ $t^{1/2}$ ถ้าเส้นกราฟผ่านจุดกำเนิด ($C = 0$) แสดงถึงการแพร่ภายในอนุภาค เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้าที่สุดในกระบวนการดูดซับ แสดงในสมการเชิงเส้นที่ 2.4

$$q_t = K_{id} t^{1/2} + C \quad (2.4)$$

เมื่อ	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	K_{id}	คือ ค่าอัตราคงที่ของการแพร่ภายในอนุภาค ($\text{mg/g} \cdot \text{min}^{-1/2}$)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

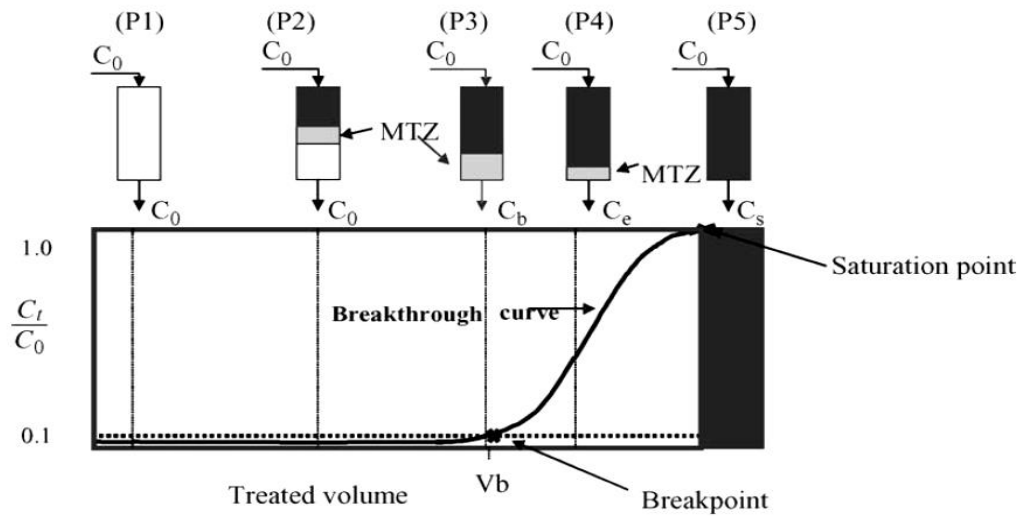
2.1.16 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง

2.1.16.1 ความจุทะลุ (Breakthrough capacity) กราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curves) เป็นการศึกษาคุณลักษณะของระบบดูดซับแบบเบตนิ่ง (Fixed-Bed Adsorption) จะเริ่มจากการพิจารณาการไหลของของไหล ผ่านชั้นดูดซับของแข็งภายใต้สภาวะอุดมคติ ดังนี้

1. ของไหลประกอบด้วยสารถูกดูดซับเพียงหนึ่งชนิดเท่านั้น
2. ไม่มีความต้านทานต่อการถ่ายโอนมวลทั้งภายในและภายนอกอนุภาค
3. การไหลเป็นแบบปลั๊ก (Plug flow) ทำให้อนุภาคของไหลใช้เวลาอยู่ในเบตเท่ากัน
4. ไม่มีการผสมของอนุภาคของไหลตามแนวแกน ($D_z=0$)
5. ที่เวลาเริ่มต้นไม่มีสารถูกดูดซับตกค้างอยู่ในอนุภาคดูดซับ
6. ระบบดูดซับอยู่ที่อุณหภูมิคงที่

กราฟเบรคทูร์ เป็นการติดตามความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ตำแหน่งทางออกของคอลัมน์โดยพล็อต C_t/C_0 เทียบกับเวลา เมื่อ C_t และ C_0 คือค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสายออกและสายเข้า ตามลำดับ กราฟที่ได้ซึ่งเป็นรูปตัวเอสจะเรียกว่า กราฟเบรคทูร์ (Breakthrough curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในทางปฏิบัติการกำหนดเวลาเบรคทูร์ จะพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นสูงสุดในของไหลขาออกที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นระบบจะยังสามารถทำงานได้ ตั้งแต่เวลาที่เริ่มป้อนสารเข้าสู่คอลัมน์จนถึงเวลาเบรคทูร์ จากนั้นต้องทำการคืนสภาพให้กับสารดูดซับหรืออาจเลือกที่จะทิ้งสารดูดซับ

การนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์ จำเป็นต้องหาประสิทธิภาพของสารดูดซับภายในคอลัมน์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง โดยประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปหรือความเข้มข้นของสารปนเปื้อนจะเพิ่มมากขึ้นตามเวลาจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ แสดงว่าคอลัมน์หมดประสิทธิภาพการดูดซับ เรียกจุดนี้ว่า จุดยุติ (Breakthrough point) โดยอายุการใช้งานคอลัมน์คือ เวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดยุตินั่นเอง โดยหาความสามารถของเบตในการดูดซับบำบัดสารหนู (Breakthrough capacity) ดังสมการที่ 2.5



รูปที่ 2.7 รูปแบบของกราฟเบรคทรูของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เพื่อดูการเคลื่อนที่บริเวณ โชนถ่ายโอนมวล (Mass transfer zone; MTZ) (Taty-Costodes et al., 2005)

$$\text{Breakthrough capacity} = \frac{C_0 \cdot \text{breakthrough time} \cdot \text{flow rate} \cdot 10^{-3}}{\text{adsorbent weight}} \quad (2.5)$$

- เมื่อ Breakthrough capacity คือ ความสามารถเบตในการดูดซับสารหนู (mg/g)
- C_0 คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น (mg/L)
- Breakthrough time คือ เวลาที่ยอมรับให้สารหนูออกจากคอลัมน์ได้ (min)
- Flow rate คือ อัตราการไหล (mL/min)
- Adsorbent weight คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

2.1.16.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (Sorption kinetics)

1. แบบจำลอง Thomas เป็นแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายประสิทธิภาพการทำงานของคอลัมน์ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยกระบวนการตามจลนพลศาสตร์การดูดซับและการคายซับของแลงเมียร์ที่ไม่มีการกระจายตามแนวแกนและแรงขับตามจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาผันกลับอันดับสอง แบบจำลอง Thomas มีสมมติฐานที่สามารถใช้ได้กับทั้งไอโซเทอมที่มีการดูดซับดีและไม่ดี ค่าคงที่อัตราการดูดซับสำหรับกระบวนการดูดซับในคอลัมน์และความเข้มข้นสูงสุดของเฟสของแข็งของตัวถูกละลายบนตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของโทมัส (Yagub et al., 2015) ดังในสมการเส้นตรงที่ 2.6

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \left(\frac{K_T q_0 m}{Q}\right) - \left(\frac{K_T C_0 V}{V}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ	K_T	คือ ค่าคงที่อัตราโทมัส (mL/mg min)
	q_0	คือ ปริมาณสารหนุที่ถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)
	m	คือ ปริมาณตัวดูดซับในคอลัมน์ (mg/g)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนุเริ่มต้นหรือความเข้มข้นสารหนุขาเข้า (mg/L)
	C	คือ ความเข้มข้นสารหนุสุดท้ายหรือความเข้มข้นสารหนุขาออก (mg/L)
	Q	คือ อัตราการไหล (mL/min)
	V	คือ ปริมาตรของสารละลายสารหนุที่ออกจากคอลัมน์ (mL)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. แบบจำลอง Yoon-Nelson ถูกกล่าวว่าเป็นแบบจำลองของคอลัมน์ที่มีความซับซ้อนน้อย เนื่องจากไม่ใช้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของตัวถูกละลาย ชนิดของตัวถูกละลาย และสมบัติทางกายภาพของเบตดูดซับ สมมติฐานของแบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจากอัตราการลดลงของความเข้มข้นในการดูดซับของตัวถูกละลายต่อตัวถูกละลายที่เบรคทรูบนตัวดูดซับ (Yagub et al., 2015) แบบจำลอง Yoon-Nelson อธิบายระบบที่มีองค์ประกอบเดียว ดังในสมการเส้นตรงที่ 2.7

$$\ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right) = K_{YN} - K_{YN}\tau \quad (2.7)$$

เมื่อ	K_{YN}	คือ ค่าคงที่อัตราการยูน-เนลสัน (1/min)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นความเข้มข้นสารหนูขาเข้า (mg/L)
	C	คือ ความเข้มข้นสารหนูสุดท้ายหรือความเข้มข้นสารหนูขาออก (mg/L)
	t	คือ เวลาเบรคทรุ (เก็บตัวอย่าง) (min)
	τ	คือ เวลาที่ใช้เมื่อสารหนูเบรคทรุ 50% (min)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การประยุกต์ใช้ K-OMS2

มีการนำ K-OMS2 มาใช้ในการบำบัดสารพิษอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง ทำให้มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยจากงานวิจัยของ (Schurz et al., 2009) ทำการศึกษาขนาดและชนิดต่างๆ ของ K-OMS2 และนำมากำจัดปริมาณเบนซิลแอลกอฮอล์ (Benzyl alcohol) โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน พบว่าการสังเคราะห์ K-OMS2 จากกระบวนการต่างๆ ได้แก่ Solid-state reaction Reflux method และ Oxidation ในรูปแบบของแมงกานีสออกไซด์รูปของผลึก ไม่มีผลึกหรือมีโครงสร้างไม่แน่นอน (Amorphous) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกตั้งแต่ 9-152 nm และมีพื้นที่ผิวของวัสดุตั้งแต่ 20-135 m^2/g โดยสารที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดและน้อยที่สุดคือ MnO_2 (Amorphous) และ K-OMS2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจน ตามลำดับ โดยเมื่อนำไปทดสอบการลดลงของปริมาณเบนซิลแอลกอฮอล์ พบว่า MnO_2 (Amorphous) สามารถลดปริมาณเบนซิลแอลกอฮอล์หมด ภายในไม่ถึง 150 นาที และประสิทธิภาพต่ำสุดคือ β - MnO_2 โดยลดปริมาณเบนซิลแอลกอฮอล์ได้น้อยกว่า 10% เมื่อใช้เวลา 240 นาที

Iyer et al. (2010) ศึกษากระบวนการ Photo oxidation โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ K-OMS2 เพื่อ เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ 2-โพรพานอล (2-Propanol) ซึ่งทำการศึกษา K-OMS2 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ Reflux (K-OMS-2R) Hydrothermal (K-OMS-2HY) และ solvent free (K-OMS-2SF) พบว่ามีขนาดของ ผลึก 18 17 และ 9.8 nm ตามลำดับ เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยา photocatalysis ของ 2-โพรพานอล โดยเปลี่ยนเป็นอะซิโตน ที่อุณหภูมิ 0°C อัตราการไหลของ O_2 10 mL/min และหลอดไฟ 520 W พบว่า K-OMS-2SF มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเปลี่ยน 2-โพรพานอลเป็นอะซิโตนได้มากถึง 50% ในขณะที่ K-OMS-2R และ K-OMS-2HY) มีประสิทธิภาพเพียง 5-6%

Tian et al. (2011) ศึกษาการออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) โดยใช้ K-OMS2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน Fixed-bed reactor ที่ความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ 460 ppm อัตราการไหลของก๊าซ 50 mL/min ปัจจัยที่ใช้ศึกษา คือ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ K-OMS2 ได้แก่ 25 80

100 และ 120°C เมื่อทดสอบ SEM พบว่าที่ 25°C มีลักษณะเป็น Nanoparticles ในขณะที่ 80 และ 100°C เริ่มมีลักษณะเป็น Nanorods และที่ 120°C มีลักษณะเป็น Nanowires และเมื่อทดสอบการออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์ โดยดูค่า CO₂ yield (%) พบว่าที่ 25°C มี CO₂ yield ถึง 64% เมื่อเทียบกับ 100°C ที่มีเพียงประมาณ 15% ดังนั้นการเพิ่ม อุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการออกซิเดชันของฟอร์มัลดีไฮด์ลดลง

อีกทั้งงานวิจัยของ Yodsa-nga et al. (2015) ได้มีการศึกษา K-OMS2 ในสภาวะอุณหภูมิและเวลาต่างๆ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเบนซิน โดยใช้การออกแบบด้วย Central composite design (CCD) พบว่าเมื่อทำการทดลองทั้งหมด 13 ครั้ง อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดเบนซินคือ อุณหภูมิ 75°C ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และเมื่อทดสอบด้วย Linear combination fit (LCF) พบว่าที่อุณหภูมิ 75°C ใช้เวลา 21 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดเบนซิน โดยอัตราส่วน Mn³⁺/Mn⁴⁺ จะมีค่าต่ำสุดคือ 0.09 ซึ่งการลดลงของระยะเวลาในการทดสอบ จะทำให้อัตราส่วน Mn³⁺/Mn⁴⁺ เพิ่มมากขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณการเกิดออกซิเดชันเบนซินด้วยเช่นกัน และการเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์ K-OMS2 ยังมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็น K-OMS7 แต่เนื่องจากมีอัตราส่วน Mn³⁺/Mn⁴⁺ ที่ต่ำ ทำให้การนำมาใช้ในประโยชน์น้อยกว่า K-OMS2

นอกจากจะมีการนำ K-OMS2 มาบำบัดสารพิษต่างๆ แล้ว ปัจจุบันมีการนำแมงกานีสออกไซด์มาใช้ในการกำจัดสารหนูมาก งานวิจัยของ Babaeivelni and Khodadoust (2016) ศึกษาการกำจัดทั้ง As(III) และ As(V) พบว่ามีพื้นที่ผิว 2.20 m²/g มีประสิทธิภาพในการกำจัดต่อพื้นที่ผิวของ As(III) และ As(V) เท่ากับ 188 และ 121 µg/m² ตามลำดับ เมื่อทดสอบการกำจัดสารหนูผ่านไป 24 ชั่วโมง พบว่า สามารถกำจัด As(III) และ As(V) ความเข้มข้น 1 mg/L เท่ากับ 94% และ 87% ตามลำดับ เมื่อทดสอบ pH 2-10 พบว่ากำจัด As(III) ได้ดีที่ pH<9 ประมาณ 91-95% และ As(V) กำจัดได้ดีที่สุดที่ pH 2 และลดลงเมื่อ pH มากขึ้น ในขณะที่จลพลศาสตร์การดูดซับพบว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) และไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ทั้ง As(III) และ As(V)

นอกจากนี้ Driehaus, Seith and Jekel (1995) ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของ As(III) ด้วย MnO₂ โดยทำการศึกษาจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน As(III) เพื่อดูผลกระทบของค่า pH และแคลเซียม อีกทั้งประยุกต์ใน Coated filter โดยผลการดูดซับ As(III) และ As(V) ที่ค่า pH 5.5 7.5 และ 9.8 จากแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich พบว่าค่าที่ pH 9.8 มีค่า R² เท่ากับ 0.93 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ As(III) และเกิดการดูดซับ As(V) ที่สภาวะสมดุลจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation kinetics) ที่ As (III+V) พบว่ามีปริมาณสาร

หนูคงที่หลังจากผ่านไป 2 นาที และเมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณ As(III) ลดลงเรื่อยๆ และ As(V) มีปริมาณมากขึ้น โดยการลดลงของ As(III) เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่า R^2 เท่ากับ 0.95 และพบว่าที่ $\text{pH} < 5$ มีอิทธิพลต่อการทำปฏิกิริยาทำให้ปริมาณแอมกานีสลดลง และไม่มีอิทธิพลที่ $\text{pH} 5-10$ ทำให้ไม่มีการคายของ Mn^{2+} ในขณะที่ทำการทดสอบเมื่อมีปริมาณอัตราส่วน $\text{MnO}_2/\text{As(III)}$ ที่สูง โดยการลดลงของการเกิดออกซิเดชัน As(III) เกิดครั้งแรกเมื่อผ่านไป 60 ชั่วโมง หลังจากนั้นเกิดการออกซิเดชันมากขึ้นอีกครั้งเมื่อผ่านไป 10 วัน ขณะที่มีการออกซิเดชันของ As(III) จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับของ $\text{Mn}^{2+}/\delta\text{MnO}_2$ มากกว่า 0.55 mol/mol ที่ $\text{pH} 6.7$ โดยปริมาณสารละลายแอมกานีสลดลงในขณะที่เกิดการออกซิเดชัน As(III) ดังนั้นปริมาณ Mn^{2+} ลดลงระหว่างที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดซับบริเวณผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Yodsa-nga et al. (2015)

อีกทั้งงานวิจัยของ Lenoble et al. (2004) ทำการกำจัด As(III) และ As(V) โดยใช้แอมกานีสไดออกไซด์ที่เคลือบบนเรซิน เรียกว่า R-MnO₂ เปรียบเทียบกับเรซินชนิดต่างๆ ได้แก่ R-Cl R-Ac และ XAD พบว่า MnO₂ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาเซไนต์มากที่สุด เวลาสมดุล (Equilibrium time) เกิดขึ้นภายใน 2 ชั่วโมง โดยความสามารถในการกักเก็บของเรซินเกิดขึ้นได้ดีกับ As(III) มากกว่า As(V) เมื่อดูไอโซเทอมการดูดซับเปรียบเทียบระหว่าง R-MnO₂ และ MnO₂ ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้คือ 1.6 g/L พบว่า R-MnO₂ มีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้ง As(III) และ As(V) ได้ดีกว่า MnO₂ สอดคล้องกับค่า pH_{zpt} R-MnO₂ และ MnO₂ เท่ากับ 7.8 และ 3.6 ตามลำดับ ความสามารถในการกำจัด As(III) และ As(V) ของ R-MnO₂ สูงสุด เท่ากับ 0.7 และ 0.3 mmol As/g โดยพบว่าปริมาณแอมกานีสที่ออกมามากที่สุดเมื่อมี As(III) 30 mg/L และจากนั้นค่อยๆ ลดลง และเมื่อ As(V) ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าปริมาณแอมกานีสที่ออกมาคงที่ และจากตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) และ As(V) โดยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสาร As(III) และ As(V) โดยสารดูดซับชนิดต่างๆ

วัสดุดูดซับ	ช่วงความเข้มข้น (mg/L)	ประสิทธิภาพในการกำจัด (mg/kg)		ปริมาณตัวดูดซับ (g/L)	ที่มา
		As(III)	As(V)		
Mn ₂ O ₃	1	413	267	5	Babaeivelni and Khodadoust (2016)
R-MnO ₂	60	90,937	93,603	1.6	Lenoble et al. (2004)
MnO ₂	60	16,888	31,201	1.6	
Amorphous iron oxide	1-80	46,768	29,641	1.6	Lenoble et al. (2002)
Goethite	1-80	33,777	12,480	1.6	
Iron oxide coated sand	0.177	22,994	1,776	0.0075	Thirunavukkarasu, Viraraghavan and Subramanian (2003)
Fe(III)-loaded resin	1000	19,487	249,608	0.134	Rau, Gonzalo and Valiente (2003)
Zeolite	0.2	0.014	43.68	15	Elizalde-González, Mattusch and Wennrich (2001)

2.2.2 การประยุกต์ใช้ Fe-BTC

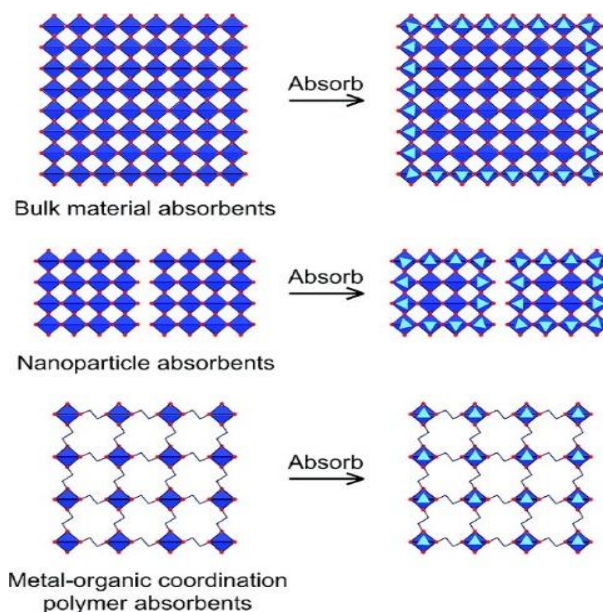
ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้โครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก มีรูพรุนที่สูง (Zhu et al., 2012) ความหนาแน่นต่ำ และมีกระบวนการผลิตในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (Low-temperature processability) เป็นต้น (Khan, Hasan and Jhung, 2013)

Garcia et al. (2014) ศึกษาการดูดซับสีย้อม Azo-Dye Orange II โดยใช้ Fe-BTC เป็นวัสดุดูดซับ พบว่าจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) มีค่า $R^2 > 0.997$ สามารถดูดซับสี

ยอมได้ถึง 435 mg/g ที่อุณหภูมิ 25°C และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี่
 ย่อมลดลง

Du et al. (2016) ศึกษาโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์ชนิด Fe-BTC Cu-BTC และ ZIF-8 และ
 นำมาดูดซับ CO₂ พบว่า มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1,009 1,390 และ 1,522 m²/g ตามลำดับ และมี
 ประสิทธิภาพในการดูดซับ CO₂ เท่ากับ 73.2 15.9 และ 10.4 ตามลำดับ โดยจากการทดลองนี้พบว่า
 CU-BTC มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดูดซับ CO₂ เนื่องจากเกิดการโคออร์ดิเนชันระหว่างอะตอม
 ของคอปเปอร์และลิแกนด์ของออกซิเจนที่ทำพันธะกันอย่างแข็งแรง

ปัจจุบันการนำโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์มาใช้ในการกำจัดสารหนุยังไม่มีแพร่หลาย โดย
 งานวิจัยของ Zhu et al. (2012) สังเคราะห์โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron(III) trimesic; Fe-BTC) โดย
 ใช้กระบวนการ Solvothermal method จากนั้นนำมาดูดซับ As(V) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ
 As(V) เปรียบเทียบระหว่าง Fe-BTC Fe₂O₃ nanoparticle และ Fe₂O₃ powder พบว่า Fe-BTC
 และ Fe₂O₃ powder สามารถดูดซับ As(V) ได้ 100 % และเข้าสู่สภาวะสมดุลภายใน 10 นาทีแรก
 ในขณะที่ Fe₂O₃ nanoparticle สามารถดูดซับ As(V) ได้เพียง 60 % และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะ
 สมดุลถึง 60 นาที และเมื่อดูไอโซเทอมการดูดซับพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสาร As(V) พบว่าได้
 เท่ากับ 12.287, 6.365 และ 1.098 mg/g ตามลำดับ แบบจำลองการดูดซับการดูดซับ As(V) ของ
 Fe-BTC Fe₂O₃ nanoparticle และ Fe₂O₃ powder ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า Fe-BTC มี
 ประสิทธิภาพในการดูดซับ As(V) สูงสุด เนื่องจากสามารถดูดซับ As(V) ไว้ในโครงสร้างวัสดุได้ทั้งหมด
 และเมื่อนำ Fe-BTC มาทดสอบอิทธิพลของค่า pH โดยปริมาณเริ่มต้นของ As(V) 5 mg/L พบว่าที่
 pH 2-10 สามารถดูดซับ As(V) ได้มากกว่า 96% และที่ pH 4 มีประสิทธิภาพในการดูดซับ As (V) ได้
 มากที่สุดถึง 98.2% ซึ่งข้อดีของการนำ Fe-BTC มาบำบัดสารหนุ เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง
 สารหนุและไอออนออกไซด์สูง และไม่มีการเปลี่ยนแปลง

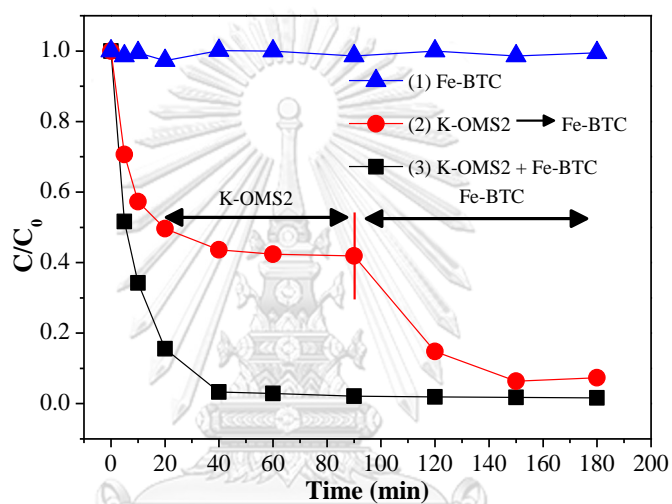


รูปที่ 2.8 แบบจำลองการดูดซับ As (V) ของ Fe-BTC, Fe₂O₃ nanoparticle และ Fe₂O₃ powder (Zhu et al., 2012)

2.2.3 การประยุกต์ใช้ K-OMS2 และ Fe-BTC ในการกำจัดสารหนู

ปัจจุบันงานวิจัยที่นำ K-OMS2 และ Fe-BTC มากำจัด As(III) และ As(V) ยังไม่แพร่หลาย งานวิจัยของ Phanthasri et al. (2018) ศึกษาการกำจัดสารหนูโดยใช้ K-OMS2 ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเปลี่ยน As(III) เป็น As(V) และใช้ Fe-BTC ในการดูดซับ As(V) โดยเป็นการศึกษาแบบกะ (batch experiment) ที่ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น 5 mg/L ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนของ K-OMS2:Fe-BTC ไอออนต่างๆ ไอโซเทอมการดูดซับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และทดสอบแบบเดี่ยวและแบบผสม พบว่าการออกซิเดชัน As(III) โดย K-OMS2 ที่อุณหภูมิ 30-60°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ระยะเวลาในการเกิดออกซิเดชันรวดเร็วขึ้น และเป็นปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo second order) เมื่อดูการดูดซับของ As(III) และ As(V) โดย Fe-BTC พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที Fe-BTC สามารถกำจัด As(V) ได้ประมาณ 70% ในขณะที่ไม่สามารถกำจัด As(III) เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสอง และเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในขณะที่ทำการผสมระหว่าง K-OMS2 และ Fe-BTC ในการกำจัด As(III) โดยแบ่งเป็น 3 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าการทดลองที่ 1 เมื่อใส่เพียง Fe-BTC ไม่สามารถดูดซับ As(III) ได้ ในขณะที่การทดลองที่ 2 ใส่วัสดุทีละตัว พบว่า K-OMS2 สามารถกำจัด As(III) ประมาณ 60% เมื่อผ่านไป 90 นาที และจากนั้นสารหนูถูกดูดซับด้วย Fe-BTC ได้ถึง 95% และการทดลองที่ 3 เป็นการใส่วัสดุทั้งสองพร้อมกัน พบว่าใช้เวลาในการกำจัดสารหนูสั้น

ลงเมื่อเทียบกับการใส่วัสดุที่ละตัว เมื่อดูผลของอัตราส่วน K-OMS2:Fe-BTC ที่มีผลต่อการกำจัด As(III) ได้แก่ 1:0.50 0.50:0.50 และ 0.25:0.50 g พบว่าเมื่อให้ปริมาณ Fe-BTC 0.5 g และเพิ่มปริมาณ K-OMS2 ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) มากขึ้น และเพื่อดูผลของไอออนลบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด As(II) ได้แก่ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และคลอไรด์ (Cl^-) พบว่า ไอออนลบที่ศึกษาทุกชนิดทำให้ลดประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) โดยเฉพาะฟอสเฟตที่ความเข้มข้นสูง เนื่องจากมีค่าการสลายตัวที่ใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดการแข่งขันในการดูดซับบนพื้นผิวของ Fe-BTC



รูปที่ 2.9 การกำจัด As(III) โดยใช้ K-OMS2 ร่วมกับ Fe-BTC (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) = 5 mg/L K-OMS2:Fe-BTC = 0.5:0.5 g pH เริ่มต้น = 8.46) (Phanthasri et al., 2018)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ห้องปฏิบัติการ 309 อาคารสถาบัน 2 ชั้น 3 สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไดโซเดียมไฮโดรเจนอาร์เซนเตเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; AS(V), 98%, Sigma-Aldrich)
2. โซเดียมอาร์เซไนต์ (NaAsO_2 ; As(III), 98%, Sigma-Aldrich)
3. แมงกานีส(II) อะซิเตท เตตระไฮเดรต ($\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 99%, ACROS Organics)
4. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4 , 99%, CARLO ERBA)
5. กรดอะซิติก (CH_3COOH , 99.8%, Merck)
6. ไอรอน(III) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 99%, QRëC)
7. กรดไตรเมซิก ($\text{C}_9\text{H}_6\text{O}_6$; BTC, 95%, Sigma-Aldrich)
8. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, 99.9%, QRëC)
9. เม็ดเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm (Al_2O_3 68.50% SiO_2 28% อื่นๆ 3.5%, Fine Abrasive Media, BPF 05)
10. กรดไฮโดรคลอริก (HCl, 37%, QRëC)
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH, 98.7%, Mallinckrodt)
12. สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 7 และ 10 (Buffer Solution, Laboratory Chemical)
13. เรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดต่างแก่ (Amberjet 4200 chloride form, Sigma-Aldrich)

3.3 การสังเคราะห์วัสดุ

แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS2) และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยอ้างอิงตามวิธีการสังเคราะห์ของ Phanthasri et al. (2018)

3.3.1 การสังเคราะห์แมงกานีสออกไซด์ (K-OMS2)

1. เตรียมสารละลาย $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 0.33 M ปริมาตร 40 mL
2. เตรียมสารละลาย KMnO_4 ความเข้มข้น 0.25 M ปริมาตร 40 mL

3. หยดสารละลาย KMnO_4 ลงในสารละลาย $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ช้าๆ พร้อมกับปั่นกวนสารผสมทั้งสอง

4. กวนหลังการผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. ปรับ pH ของสารผสมให้มีค่า $\text{pH} < 3.5$ ด้วย CH_3COOH
6. กวนต่อเนื่องอีก 1 ชั่วโมง จะได้สารที่มีสีน้ำตาลเข้ม
7. นำสารดังกล่าวเทลงในหม้ออัดความดัน (Autoclave) และอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal treatment process)
8. นำหม้ออัดความดันออกจากเตาอบและทิ้งไว้ให้เย็น สารที่ได้จะเป็นของผสมสีน้ำตาลเข้มระหว่างของแข็งที่เป็นอนุภาคและของเหลว
9. ล้างอนุภาคของแข็งด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) และแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำล้างด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหลายๆ ครั้ง จนน้ำที่ใช้ล้างมี $\text{pH} = 7$
10. เทสารผสมลงในถ้วยระเหย และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ

3.3.2 การสังเคราะห์โครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Fe-BTC)

1. เตรียมสารละลาย $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 75 mL
2. เตรียมสารละลาย BTC ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 75 mL
3. ผสมสารละลายทั้ง 2 ชนิด แล้วกวนสารผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 30-60 นาที
4. ได้สารผสมมีสีส้มลักษณะคล้ายวุ้น เทสารดังกล่าวลงในหม้ออัดความดัน และตกผลึกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล
5. นำหม้ออัดความดันออกจากเตาอบและตั้งทิ้งไว้ให้เย็น จะได้ของผสมสีส้มระหว่างของแข็งที่เป็นอนุภาคและของเหลว
6. ล้างอนุภาคของแข็งออกด้วยน้ำปราศจากไอออน และแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำล้างด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงหลายๆ ครั้ง จนน้ำที่ใช้ล้างมี $\text{pH} = 7$
7. เทสารผสมลงในถ้วยระเหย และนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้สารที่มีลักษณะเป็นผงสีส้ม

3.4 การเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก

1. ชั่ง K-OMS2 Fe-BTC และเม็ดเซรามิก โดยใช้อัตราส่วน K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิกโดยน้ำหนัก เท่ากับ 1:10 1:50 และ 1:100
2. นำไปเหวี่ยงด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล (Mechanical orbital shaking technique) ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำเม็ดเซรามิกที่เคลือบด้วย K-OMS2 และ Fe-BTC อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ขึ้นรูปแล้วมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมสีดำและสีส้ม ซึ่งจะเรียกว่า K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ตามลำดับ

3.5 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)

3.5.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy with Energy dispersive x-ray spectrometry (SEM-EDS)

ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscopes (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300, Tokyo, Japan เริ่มต้นตัวอย่างจะถูกอบให้แห้งที่ 100°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปติดบนแท่งเหล็กกลมที่มีเทปกาวยคาร์บอนติดอยู่ การวิเคราะห์นี้ตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองหรือแพลตตินัม เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า ในที่สุดแท่งเหล็กกลมจะถูกนำเข้าไปในเครื่อง SEM เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเครื่อง Energy dispersive x-ray spectrometer (EDS) ใช้ยี่ห้อ Oxford รุ่น X-Max^N 20, UK

3.5.2 การศึกษาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Micro-X-ray fluorescence (Micro-XRF)

Micro-XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยปรากฏการณ์การเรืองรังสีเอกซ์เป็นความแตกต่างของชั้นพลังงานแต่ละธาตุ เมื่อเรากระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำตัวอย่างไปอบที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำไปวางบนแผ่นรองรับตัวอย่างที่ทำด้วยดินน้ำมันสังเคราะห์ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเคลื่อนที่ขณะทำการวิเคราะห์ และสุดท้ายนำตัวอย่างเข้าไปในเครื่อง Micro-x-ray fluorescence spectrometry (Micro-XRF) (M4 TORNADO, BRUKER, GERMANY) เพื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) และใช้โปรแกรม Auto-Point ในการคำนวณหาความหนาของการเคลือบ

3.5.3 การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD)

เทคนิค XRD ถูกใช้เพื่อระบุลักษณะของโครงสร้างผลึก โดยการนำสารตัวอย่างมาอบในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นแล้ววิเคราะห์ภายใต้ตัวกลางที่เป็นอากาศ ณ อุณหภูมิห้อง และเปรียบเทียบข้อมูลกระเจิงแสงกับค่า Standards in the International Centre for Diffraction Data (JCPDS file)

การวิเคราะห์ K-OMS2 และ Fe-BTC ด้วยเครื่อง XRD ยี่ห้อ Bruker AXS รุ่น Model D8 Discover นั้นศึกษาทั้งแบบผงและแบบที่ผ่านการขึ้นรูป โดยใช้แหล่งกำเนิด Cu K α ด้วย VANTEC-1 detector ตัวอย่างถูกสแกนในช่วง 5–80° ของ 2 Theta Accelerating voltage เท่ากับ 40 kV Emission current เท่ากับ 40 mA Time เท่ากับ 0.3 วินาที Increment เท่ากับ 0.02° และ Effective time เท่ากับ 240.5 วินาที

3.5.4 การหาพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของตัวดูดซับโดยเทคนิค Nitrogen adsorption desorption isotherm

พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) การกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) อาศัยการใช้สมการจากทฤษฎีที่เหมาะสมมาคำนวณ ซึ่งได้มาจากข้อมูลดิบของกราฟไอโซเทอม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) กับปริมาตรหรือน้ำหนักของก๊าซที่ถูกดูดซับของตัวอย่าง โดยในการวิเคราะห์จะใช้เครื่อง Nitrogen adsorption-desorption ยี่ห้อ Quantachrome Instrument Autosorb-1 ก่อนการทดลอง ตัวอย่างปริมาณ 0.1000-0.3000 g จะถูกกำจัดก๊าซ ความชื้น และสารระเหยต่างๆ ที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างด้วย Degasser ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3-6 ชั่วโมง (Sultana et al., 2017) จากนั้นตัวอย่างถูกทดสอบการดูดซับก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196°C ข้อมูลที่ได้ถูกคำนวณด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) เพื่อให้ได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และวิธี Barrett-Joyner-Halenda (BJH) เพื่อหาค่าการกระจายขนาดของรูพรุน และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

3.5.5 การศึกษาประจุที่ผิวและ pH of point of zero charge (pH_{pzc})

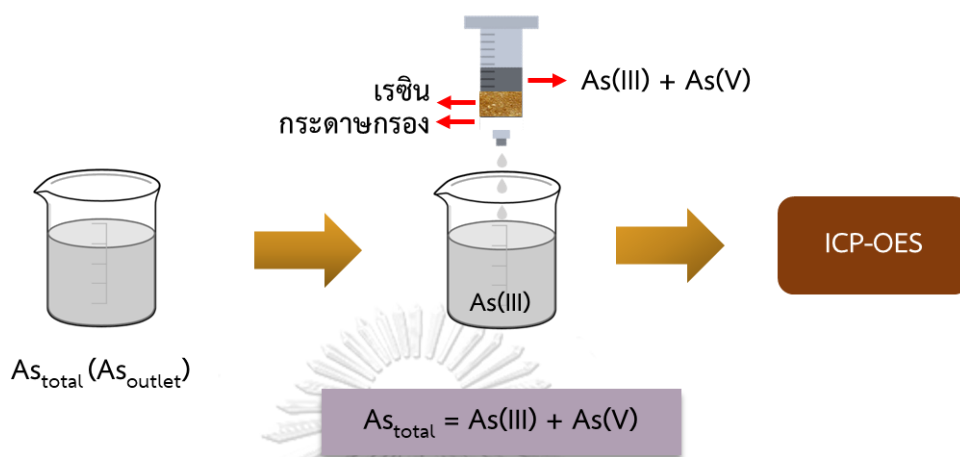
pH_{pzc} เป็นการศึกษาเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง pH ที่เปลี่ยนแปลง (Delta pH) จาก pH เริ่มต้น โดยนำน้ำปราศจากไอออนและสารละลาย $NaAsO_3$ และ $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ มาปรับ pH 5-8 ด้วยสารละลาย HCl และ NaOH ความเข้มข้น 1 และ 0.1 M แล้วเติมตัวอย่างปริมาณ 0.5 g/L แช่ตัวอย่างทิ้งไว้ในสารละลายและกวนเบาๆ จากนั้นวัดหา pH สุดท้ายตามเวลาจนครบ 72 ชั่วโมง จากนั้นนำค่า pH ที่ได้พลอตกราฟระหว่าง Delta pH และ pH เริ่มต้น

3.6 การทดสอบความเป็นไปได้ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในการกำจัด As(III) และ As(V) แบบกะ (Batch system)

3.6.1 การทดสอบเรซิน

การศึกษาประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดต่างแก่ ยี่ห้อ Amberjet 4200 เพื่อยืนยันการแลกเปลี่ยนประจุ As(V) และแยก As(III) ออกมา ใช้ปริมาณเรซิน 0.5 1 และ 2 g เตรียมสารละลาย $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ และ $NaAsO_2$ ปริมาตร 5 mg/L จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายแต่ละชนิดผ่านเรซินโดยแยกเรซินของแต่ละสารละลาย จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้น As(III) และ As(V)

ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) การทดสอบเรซินแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การทดสอบประสิทธิภาพเรซินที่ปริมาณ 0.5 1 และ 2 g

3.6.2 K-OMS2 (coated) กับการเปลี่ยน As(III) ให้เป็น As(V)

เตรียมสารละลาย $NaAsO_2$ ความเข้มข้น 5 mg/L ปริมาตร 100 mL นำมาปรับให้ได้ pH 4 ค่า ได้แก่ 5 6 7 และ 8 ด้วยสารละลาย HCl และ NaOH ความเข้มข้น 1 และ 0.1 M แล้วเติม K-OMS2 (coated) ปริมาณ 0.5 g/L ลงไปในสารละลายและกวนเบาๆ ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลา นำตัวอย่างที่ได้ไปกรองผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดต่างแก่ เพื่อดักจับ As(V) ที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ความเข้มข้นของ As(III) ที่เปลี่ยนแปลงด้วยเครื่อง ICP-OES

3.6.3 Fe-BTC (coated) กับการดูดซับ As(V)

เตรียมสารละลาย $Na_2HAsO_4 \cdot 7H_2O$ ความเข้มข้น 5 mg/L ปริมาตร 100 mL นำมาปรับให้ได้ pH 4 ค่า ได้แก่ 5 6 7 และ 8 ด้วยสารละลาย HCl และ NaOH ความเข้มข้น 1 และ 0.1 M แล้วเติม Fe-BTC (coated) ปริมาณ 0.5 g/L ลงไปในสารละลายและกวนเบาๆ จากนั้นเก็บตัวอย่างตามเวลา แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้น As(V) ด้วยเครื่อง ICP-OES

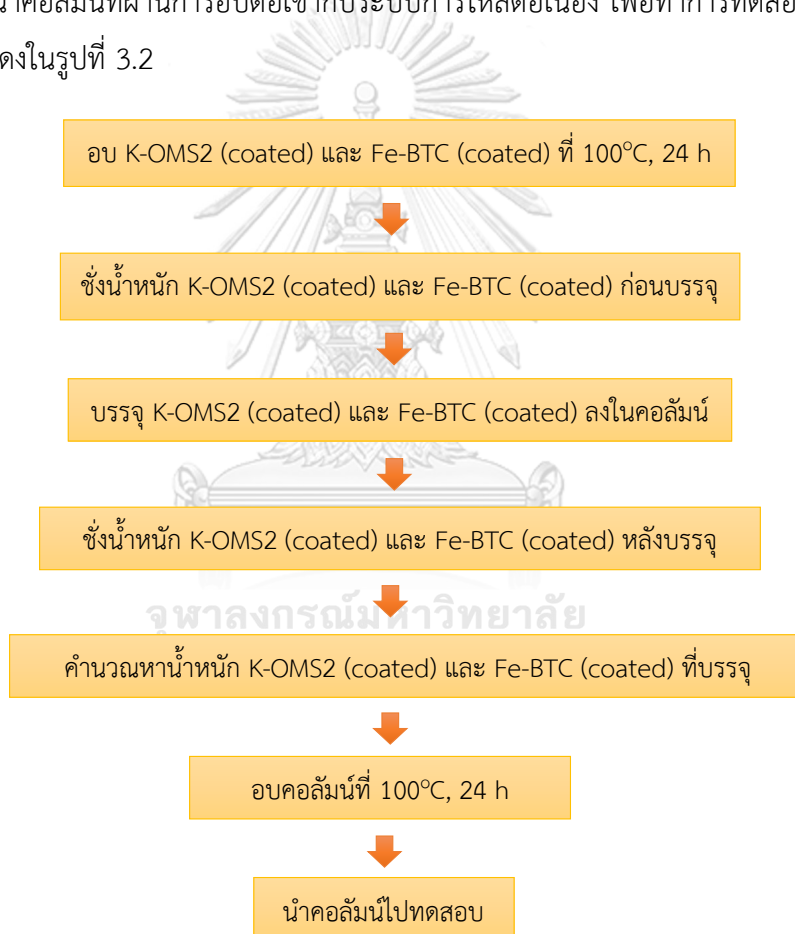
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง

3.7.1 การบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์

1. นำ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ไปอบที่อุณหภูมิ $100^\circ C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

2. นำ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) มาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น

3. บรรจุสำลี (Cotton wool) เม็ดแก้ว (Glass beads) และสำลีความหนาชั้นละ 2 cm ตามลำดับด้านล่าง และบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์ที่ทำมาจากแก้วโบโรซิลิเกต ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 cm ชนิดละ 1 คอลัมน์ โดยปริมาณ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) จะขึ้นอยู่กับความยาวเบดที่ต้องการ
4. บรรจุสำลี เม็ดแก้ว และสำลี ความหนาชั้นละ 2 cm ตามลำดับ เพื่อปิดการบรรจุด้านบน
5. ชั่งน้ำหนัก K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่เหลือหลังจากการบรรจุลงในคอลัมน์ จากนั้นคำนวณหาน้ำหนักที่ใช้ในการบรรจุ
6. นำคอลัมน์ที่บรรจุเสร็จแล้วไปอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำคอลัมน์ที่ผ่านการอบต่อเข้ากับระบบการไหลต่อเนื่อง เพื่อทำการทดสอบต่อไป แผนผังการบรรจุแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์

3.7.2 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated)

เตรียมสารละลาย NaAsO_2 ความเข้มข้นในช่วง 1-5 mg/L ทำการทดสอบแบบการไหลต่อเนื่องใน Packed-bed column ณ อุณหภูมิห้อง โดยบรรจุ K-OMS2 (coated) ลงในคอลัมน์ที่มีสำลีและเม็ดแก้วปิดหัวและท้ายเพื่อป้องกันวัสดุเกิดการเลื่อนไหล จากนั้นต่อสายซิลิโคนเชื่อมต่อกอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลา และติดตามความเข้มข้นของ As(III) ที่เปลี่ยนแปลงโดยใช้เรซิน แลกเปลี่ยนประจุชนิดต่างแก่ เพื่อดักจับ As(V) ที่เกิดขึ้น แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES

3.7.3 การทดสอบประสิทธิภาพ Fe-BTC (coated)

เตรียมสารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้นในช่วง 1-5 mg/L ทำการทดสอบแบบการไหลต่อเนื่องใน Packed-bed column ณ อุณหภูมิห้อง โดยบรรจุ Fe-BTC (coated) ลงในคอลัมน์ที่มีสำลีและเม็ดแก้วปิดหัวและท้ายเพื่อป้องกันวัสดุอุดตันเกิดการเลื่อนไหล จากนั้นต่อสายซิลิโคนเชื่อมต่อกอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข) ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลา และวิเคราะห์ความเข้มข้นของ As(V) ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง ICP-OES

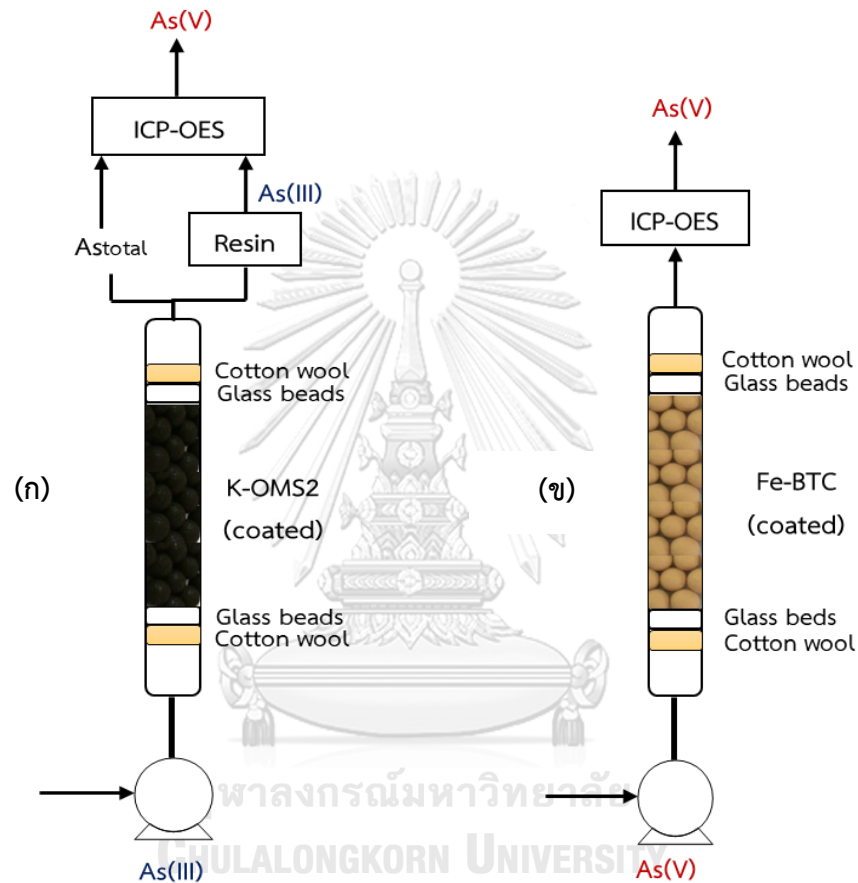
3.7.4 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) พร้อมกัน ในระบบการไหลต่อเนื่อง

เตรียมสารละลาย NaAsO_2 ความเข้มข้นในช่วง 1-5 mg/L ทำการทดสอบแบบการไหลต่อเนื่องใน Packed-bed column ณ อุณหภูมิห้อง โดยบรรจุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ชนิดละ 1 คอลัมน์ โดยมีสำลีและเม็ดแก้วปิดหัวและท้ายเพื่อป้องกันวัสดุเกิดการเลื่อนไหล จากนั้นต่อสายซิลิโคนเชื่อมต่อกอลัมน์ทั้งสองโดยให้คอลัมน์ของ K-OMS2 (coated) เป็นคอลัมน์ที่ 1 และ Fe-BTC (coated) เป็นคอลัมน์ที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างตามเวลา และวิเคราะห์ความเข้มข้น As(III) ที่เปลี่ยนแปลงในคอลัมน์ที่ 1 และความเข้มข้น As(V) ที่เหลืออยู่ในคอลัมน์ที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3-3.4

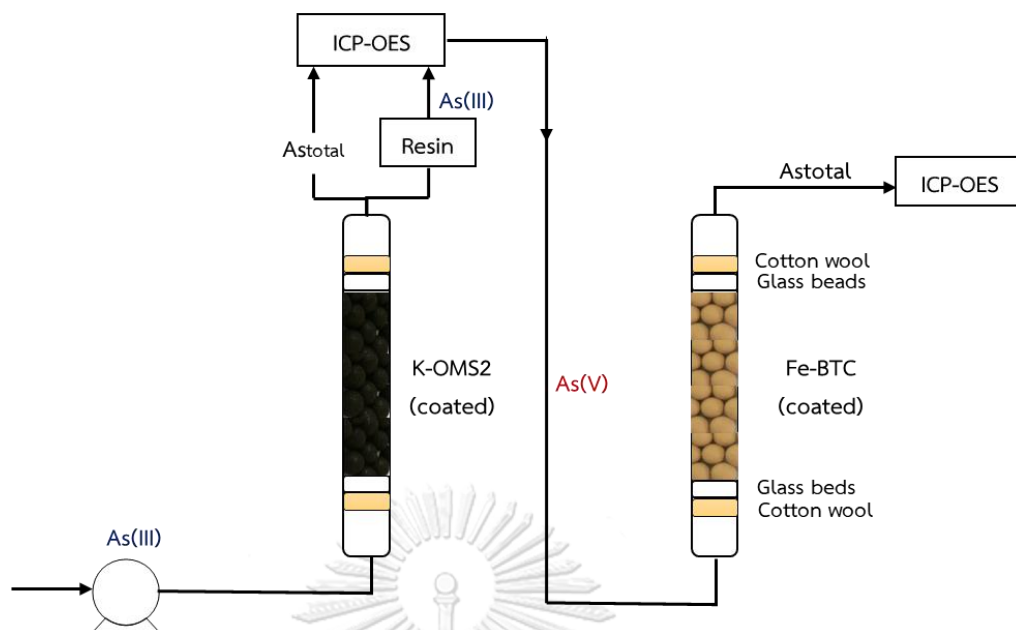
3.7.5 ปัจจัยที่ใช้ศึกษา ได้แก่

- 1) สภาวะการทดสอบ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่เหมาะสม
 - ความยาวเบด ได้แก่ 5 10 15 และ 20 cm
 - อัตราการไหล ได้แก่ 5 10 และ 20 mL/min
 - ความเข้มข้นเริ่มต้น ได้แก่ 1 และ 5 mg/L
- 2) จำนวนรอบของการใช้ซ้ำ (Reuse cycle number) ศึกษาในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ที่มีภาวะทดสอบเหมาะสมจากปัจจัยข้อ 1) โดยศึกษาจำนวนรอบของการใช้ซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ
- 3) การชะละลายของ Mn K และ Fe ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่มีภาวะทดสอบที่เหมาะสมจากปัจจัยข้อ 1)

- การชะละลายของ Mn และ K ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ทดสอบการชะละลายของธาตุจากการใช้งานซ้ำจำนวน 3 รอบ
- การชะละลายของ Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ทดสอบการชะละลายของธาตุ 1 จากการใช้งานจำนวน 1 รอบ



รูปที่ 3.3 ระบบการไหลต่อเนื่องของ (ก) K-OMS2 (coated) และ (ข) Fe-BTC (coated) แบบแยกทดสอบทีละคอลัมน์



รูปที่ 3.4 ระบบการไหลต่อเนื่องของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ที่ทดสอบพร้อมกัน ทั้ง 2 คอลัมน์

3.8 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของ As(III) และ As(V) ด้วยเครื่อง Inductively couple plasma optical emission spectrometer (ICP-OES)

เครื่อง ICP-OES ยี่ห้อ Analyticjena รุ่น PlasmaQuant PQ 9000 Elite เป็นเครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุและโลหะในปริมาณความเข้มข้นต่ำได้ถึงในระดับ ppb และยังสามารถวิเคราะห์หลายธาตุได้ในเวลาเดียวกัน โดยอาศัยหลักการเผาตัวอย่างที่ฉีดเป็นละอองฝอยในเปลวอาร์กอนพลาสมาเพื่อให้แตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุ +1 จากนั้นส่งไปทำการแยกและตรวจวัดมวลสารตามค่ามวลต่อประจุ (M/Z) ด้วย Mass Spectrometer การวัดตัวอย่างทำโดยนำตัวอย่างจำนวน 20 mL มาปรับให้ pH < 2 ด้วย สารละลาย HCl เข้มข้น ก่อนทำการเข้าเครื่องตรวจวัด

3.9 การวิเคราะห์การชะละลายของ Mn K และ Fe ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectroscopy (AAS)

เครื่อง AAS ยี่ห้อ Analyticjena รุ่น ContrAA 800 อาศัยหลักการเมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดชนอะตอมอิสระที่เปลี่ยนจากสถานะพื้นเป็นสถานะกระตุ้น โดยอาศัยการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นแต่ละธาตุที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งปริมาณการดูดกลืนแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของธาตุที่เราสนใจ การวัดตัวอย่างทำโดยนำตัวอย่างจำนวน 5 mL มาปรับให้ pH < 2 ด้วย สารละลาย HCl เข้มข้น ก่อนทำการเข้าเครื่องตรวจวัด

3.10 การวิเคราะห์หลักไทม์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันและการดูดซับในระบบการทดสอบแบบกะ

3.10.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ตั้งในสมการที่ 3.1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \quad (3.1)$$

เมื่อ	q_t	คือ ความจุการดูดซับเมื่อเวลา t (mg/g)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น (mg/L)
	C_t	คือ ความเข้มข้นสารหนูเมื่อเวลา t (mg/L)
	V	คือ ปริมาตรสารละลายสารหนู (L)
	W	คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

3.10.2 จลนพลศาสตร์ (Kinetics models)

3.10.2.1 Pseudo first order kinetics ตั้งในสมการ 3.2

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (3.2)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (1/min)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

3.10.2.2 Pseudo second order kinetics ตั้งในสมการ 3.3

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (3.3)$$

เมื่อ	q_e	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)
	k_2	คือ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (1/min)
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

3.10.2.3 การแพร่ภายในอนุภาค (Intra-particle diffusion model) ดังใน

สมการ 3.4

$$q_t = K_{id}t^{1/2} + C \quad (3.4)$$

เมื่อ	q_t	คือ ปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาหรือถูกดูดซับที่จุดสมดุล (mg/g)
	K_{id}	คือ ค่าอัตราคงที่ของการแพร่ภายในอนุภาค (mg/g·min ^{1/2})
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาหรือดูดซับ (min)

3.11 การวิเคราะห์หลักไคที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันและดูดซับระบบการไหลต่อเนื่อง

3.11.1 ความจุทะลุ (Breakthrough capacity) ดังในสมการเส้นตรงที่ 3.5

$$\text{Breakthrough capacity} = \frac{C_0 \cdot \text{breakthrough time} \cdot \text{flow rate} \cdot 10^{-3}}{\text{adsorbent weight}} \quad (3.5)$$

เมื่อ	Breakthrough capacity	คือ ความสามารถเบตในการดูดซับสารหนู (mg/g)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้น (mg/L)
	Breakthrough time	คือ เวลาที่ยอมรับให้สารหนูออกจากคอลัมน์ได้ (min)
	Flow rate	คือ อัตราการไหล (mL/min)
	Adsorbent weight	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3.11.2 จลพลศาสตร์การดูดซับ (Sorption kinetics)

1. แบบจำลอง Thomas ตั้งในสมการเส้นตรงที่ 3.6

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \left(\frac{K_T q_0 m}{Q}\right) - \left(\frac{K_T C_0 V}{V}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ	K_T	คือ ค่าคงที่อัตราโทมัส (mL/mg min)
	q_0	คือ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล (mg/g)
	m	คือ ปริมาณตัวดูดซับในคอลัมน์ (mg/g)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นหรือความเข้มข้นสารหนูขาเข้า (mg/L)
	C	คือ ความเข้มข้นสารหนูสุดท้ายหรือความเข้มข้นสารหนูขาออก (mg/L)
	Q	คือ อัตราการไหล (mL/min)
	V	คือ ปริมาตรของสารละลายสารหนูที่ออกจากคอลัมน์ (mL)

2. แบบจำลอง Yoon-Nelson ตั้งในสมการเส้นตรงที่ 3.7

$$\ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right) = K_{YN} - K_{YN} \tau \quad (3.7)$$

เมื่อ	K_{YN}	คือ ค่าคงที่อัตรายูน-เนลสัน (1/min)
	C_0	คือ ความเข้มข้นสารหนูเริ่มต้นความเข้มข้นสารหนูขาเข้า (mg/L)
	C	คือ ความเข้มข้นสารหนูสุดท้ายหรือความเข้มข้นสารหนูขาออก (mg/L)
	t	คือ เวลาเบรคทรู (เก็บตัวอย่าง) (min)
	τ	คือ เวลาที่ใช้เมื่อสารหนูเบรคทรู 50% (min)

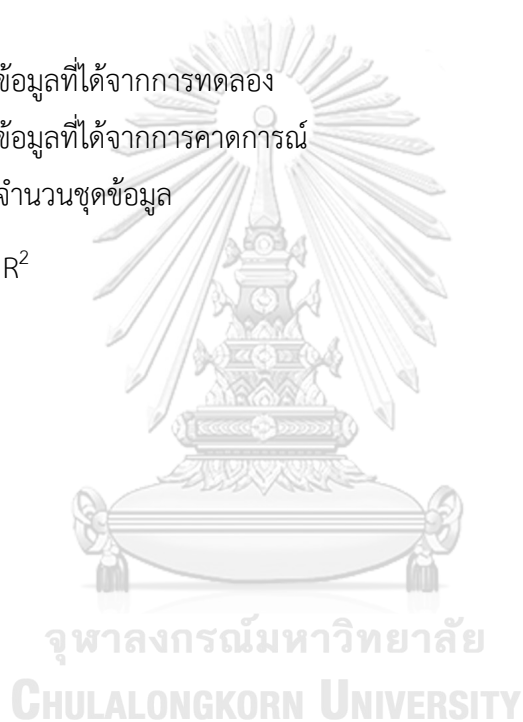
3.12 การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ใช้การคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) เพื่อใช้วัดการกระจายของข้อมูล (Luekittisup et al., 2015) ดังในสมการที่ 3.8

$$S.D.(%) = 100 \times \left\{ \frac{\sum [(Y_e - Y_p) / Y_e]^2}{N - 1} \right\}^{1/2} \quad (3.8)$$

เมื่อ Y_e คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 Y_p คือ ข้อมูลที่ได้จากการคาดการณ์
 N คือ จำนวนชุดข้อมูล

2. การหาค่า R^2



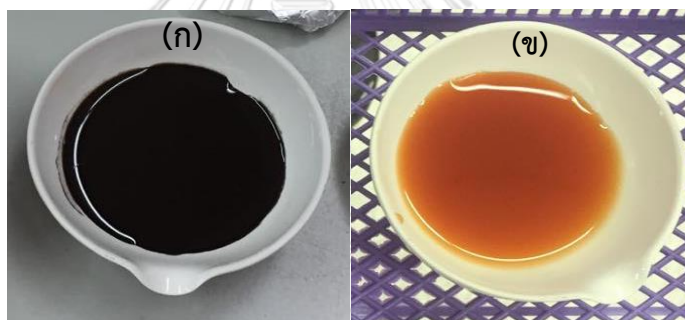
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)

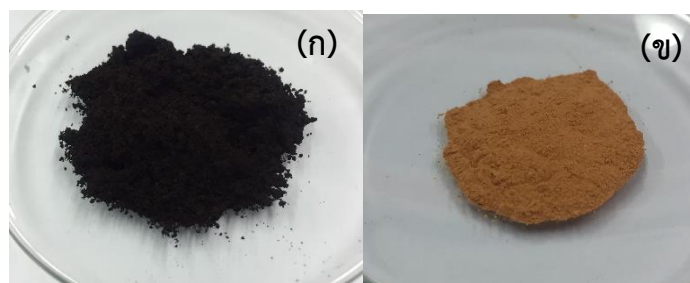
4.1.1 ลักษณะของ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่สังเคราะห์ได้

ผลการสังเคราะห์ K-OMS2 และ Fe-BTC เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นด้วยน้ำปราศจากไอออน จนน้ำที่ใช้ล้างมี $\text{pH} = 7$ จะได้สารผสมสีน้ำตาลเข้มและสีส้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และ 4.1(ข) ตามลำดับ และเมื่อนำสารผสมสีน้ำตาลเข้มไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ K-OMS2 ที่มีลักษณะเป็นผงสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ก) ในขณะที่เมื่อนำสารผสมสีส้มไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ Fe-BTC ที่มีลักษณะเป็นผงส้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.2(ข)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะสารผสมสีน้ำตาลเข้มขณะสังเคราะห์ K-OMS2 และ (ข) ลักษณะสารผสมสีส้มขณะสังเคราะห์ Fe-BTC หลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4.2 (ก) ลักษณะของ K-OMS2 และ (ข) Fe-BTC ที่สังเคราะห์ได้

4.1.2 การเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก







ผลการเคลือบผง K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิกด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล พบว่า K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ขึ้นรูปแล้ว ซึ่งเรียกว่า K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ตามลำดับ มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมสีดำและสีส้ม เมื่อเทียบกับเม็ดเซรามิกเปล่าที่ใช้เป็นวัสดุรองรับซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งทรงกลมสีขาวและมีผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะที่ปรากฏของ (ก) เม็ดเซรามิกเปล่าที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ (ข) K-OMS2 (coated) และ (ค) Fe-BTC (coated)

ลักษณะที่ปรากฏ ปริมาณผงที่ใช้ และ เปอร์เซ็นต์การเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก ด้วยอัตราส่วน K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก เท่ากับ 1:10 1:50 และ 1:100 แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อสังเกตลักษณะพื้นผิวที่เคลือบด้วย K-OMS2 และ Fe-BTC พบว่าที่อัตราส่วน 1:10 มีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC มากเกินพอ โดยอัตราส่วน 1:50 และ 1:100 ของ K-OMS2 (coated) ไม่สามารถระบุลักษณะพื้นผิวที่เคลือบได้มากนัก เนื่องจากพื้นผิวมีสีเข้ม ในขณะที่อัตราส่วน 1:50 และ 1:100 ของ Fe-BTC (coated) มีลักษณะพื้นผิวไม่ขรุขระมาก และมีความเรียบมากกว่าอัตราส่วน 1:10 เมื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ที่เคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกที่เตรียมด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 พบว่า K-OMS2 (coated) มีการเคลือบติดบนเม็ดเซรามิก 0.55 0.61 และ 0.45% ตามลำดับ ในขณะที่ Fe-BTC (coated) มีการเคลือบติดบนเม็ดเซรามิก 2.32 0.95 และ 0.53% ตามลำดับ ดังนั้นในภาพรวมสามารถกล่าวได้ว่า ปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC ที่ใช้ในการเคลือบบนเม็ดเซรามิกน้อยลง เปอร์เซ็นต์การเคลือบจะมีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วน 1:10>1:50>1:100 บ่งบอกถึงความหนาและลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันจากการเคลือบด้วยอัตราส่วนที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามการศึกษาในขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถระบุอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

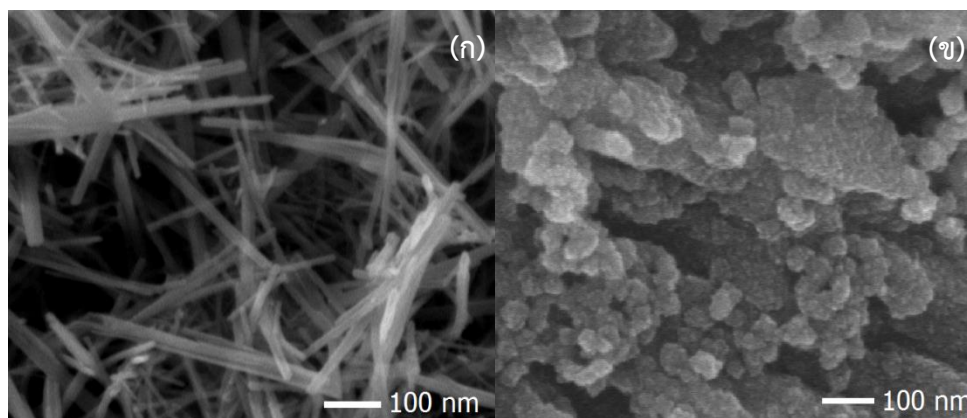
ตารางที่ 4.1 ลักษณะที่ปรากฏ ปริมาณผงที่ใช้ และเปอร์เซ็นต์การเคลือบของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)

K-OMS2 or Fe-BTC: Ceramic ball ratio	K-OMS2 (coated)			Fe-BTC (coated)		
	Appearance	Powder weight (g)	% coating	Appearance	Powder weight (g)	% coating
1:10		0.0055	0.55		0.0237	2.32
1:50		0.0061	0.61		0.0096	0.95
1:100		0.0045	0.45		0.0053	0.53

4.1.3 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy with energy dispersive x-ray spectrometry (SEM-EDS)

4.1.3.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว K-OMS2 และ Fe-BTC ด้วยเทคนิค SEM

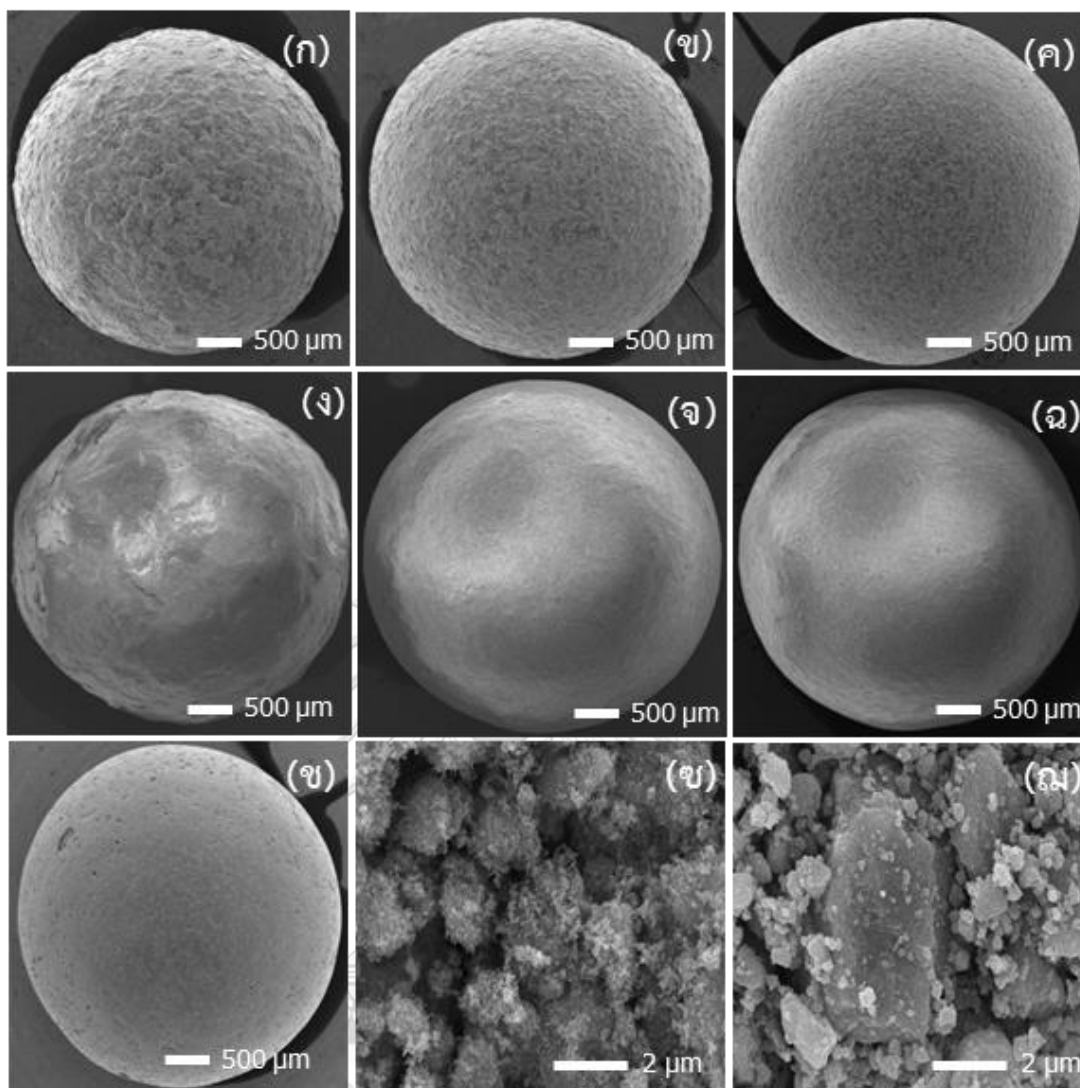
การศึกษาสัณฐานบริเวณพื้นผิวของ K-OMS2 จากการใช้เทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 4.4(ก) ซึ่งพบลักษณะเป็นแท่งและมีการเกาะกลุ่มรวมตัว (Feng et al., 2014, Iyer et al., 2012, Millanar et al., 2014, Phanthasri et al., 2018, Wang et al., 2015, Wei et al., 2015) ในขณะที่ลักษณะสัณฐานบริเวณพื้นผิวของ Fe-BTC ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ข) พบว่ามีลักษณะเป็นอนุภาคกลมขนาดเล็กเกาะกลุ่มและมีโพรงขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว (Majano et al., 2013)



รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของ (ก) K-OMS2 และ (ข) Fe-BTC

4.1.3.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิคของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค SEM-EDS

ลักษณะสัณฐานบริเวณพื้นผิวของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงในรูปที่ 4.5 จากลักษณะพื้นผิวโดยรวมของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ในรูปที่ 4.5 (ก-ค) และ (ง-ฉ) ตามลำดับ เปรียบเทียบกับเม็ดเซรามิกแม่แบบ ในรูปที่ 4.5(ข) พบว่าพื้นผิวของอัตราส่วน 1:10 มีลักษณะไม่เรียบ ขรุขระ เป็นแผ่นใหญ่หนาและร่องลึกอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณผงของ K-OMS2 และ Fe-BTC มีมากเกินไป แสดงถึงความไม่สม่ำเสมอในการเคลือบ ในขณะที่อัตราส่วน 1:50 และ 1:100 พบลักษณะดังกล่าวลดลง โดยพบว่าพื้นผิวที่อัตราส่วน 1:100 มีความเรียบมากกว่า 1:50 ดังนั้นอัตราส่วนที่ทำให้พื้นผิววัสดุ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เรียบสม่ำเสมอจากมากไปน้อย คือ 1:100 1:50 และ 1:10 ตามลำดับ ในรูปที่ 4.5 (ข) K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:10 พบว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นแท่งที่มีการหักเป็นขนาดต่างๆ และมีการเกาะกลุ่มรวมกัน เนื่องจากผ่านการเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลานานถึง 24 ชั่วโมง แต่ยังคงโครงสร้างพื้นฐานของ K-OMS2 ที่มีลักษณะเป็นแท่ง (จักรภาพ พันธศรี, 2560) ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 ในรูปที่ 4.5(ฉ) มีลักษณะเป็นก้อนหลายขนาด ดังนั้นสามารถระบุได้ว่าอัตราส่วน 1:100 ทั้งจาก K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ทำให้มีพื้นผิวเคลือบที่เรียบสม่ำเสมอมากที่สุด



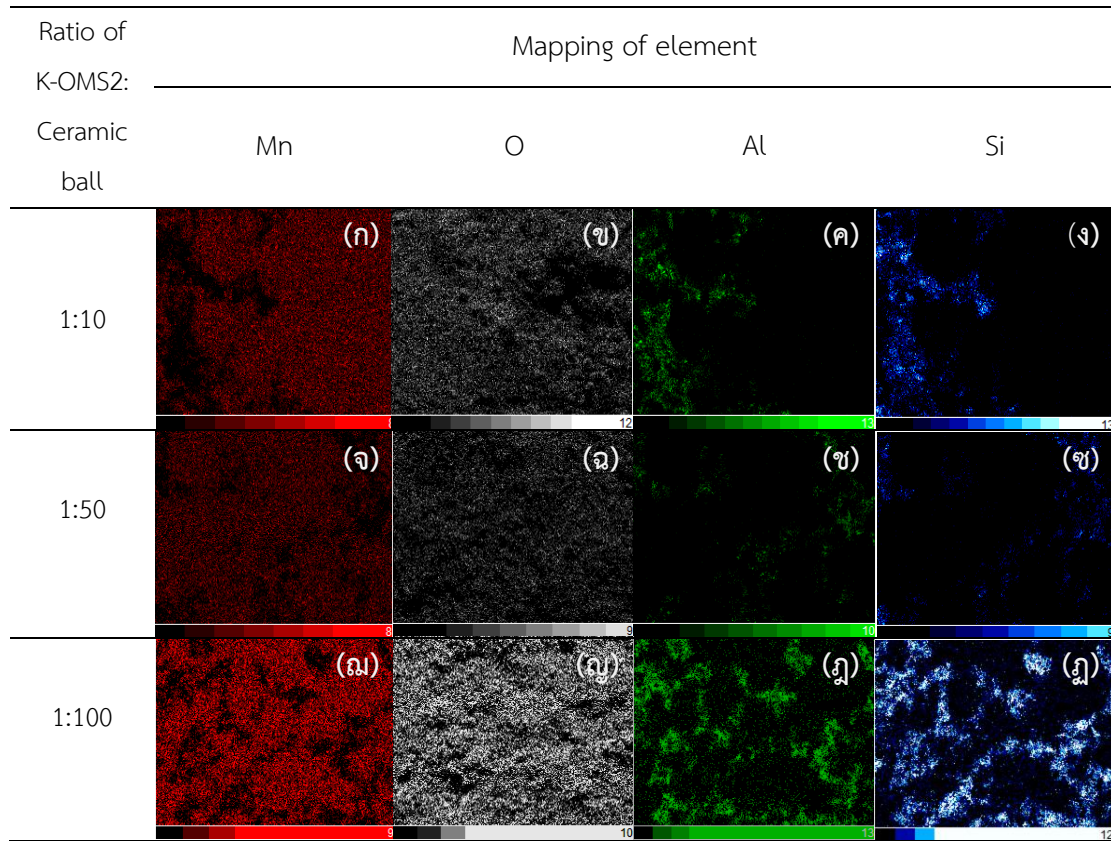
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM (SEM images) กำลังขยาย 20 เท่า ของ K-OMS2 (coated) อัตราส่วน (ก) 1:10 (ข) 1:50 (ค) 1:100 Fe-BTC (coated) อัตราส่วน (ง) 1:10 (จ) 1:50 (ฉ) 1:100 (ช) เม็ดเซรามิก และกำลังขยาย 15,000 เท่า ของ (ซ) K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:10 และ (ฌ) Fe-BTC (coated)

ผลการศึกษการกระจายตัวของธาตุและปริมาณธาตุใน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS ดังแสดงในตารางที่ 4.2-4.4 พบว่าพบว่า K-OMS2 (coated) มีแมงกานีส (Mn) และออกซิเจน (O) กระจายตัวในทุกอัตราส่วนการเคลือบ โดยมีปริมาณ Mn 46.19-47.78% และ O ปริมาณ 36.35-37.79% ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ K-OMS2 (จักรภพ พันธศรี, 2560) นอกจากนี้ยังพบการ

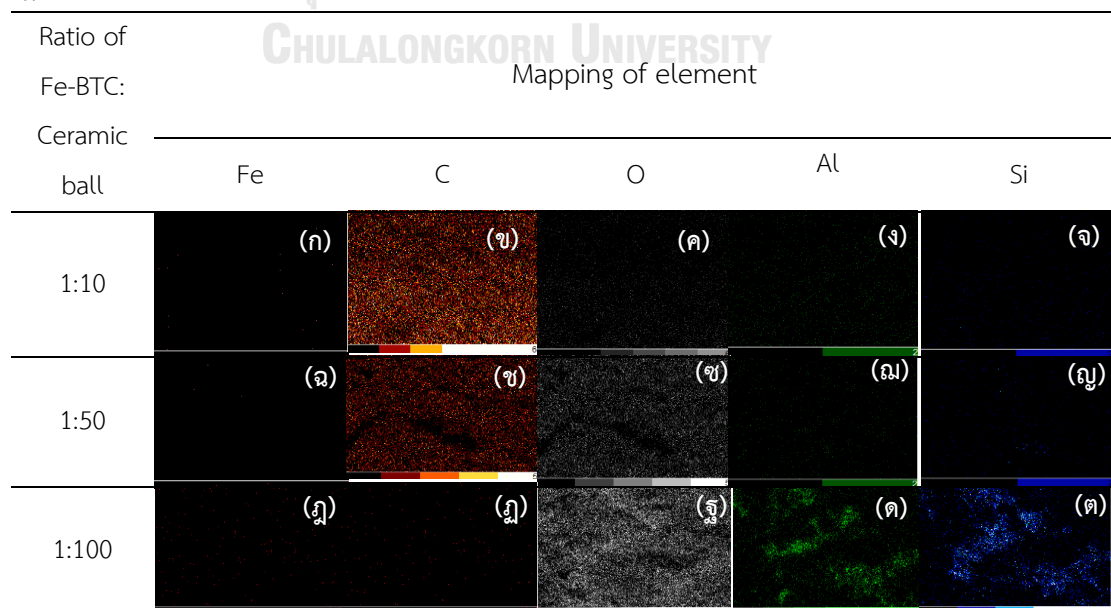
กระจายตัวของธาตุอลูมิเนียม (Al) และซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเม็ดเซรามิก จึงพบ Al (3.97%) Si (5.17%) กระจายตัวเป็นกลุ่มๆ โดยจะเห็นว่าพบการกระจายตัวมากในอัตราส่วน 1:10 เนื่องจากพื้นผิวหนา แต่ขรุขระ เป็นร่องลึก ทำให้เกิดช่องว่าง และพบมากขึ้นในอัตราส่วน 1:100 โดยอัตราส่วน 1:100 พบการกระจายของ Al (4.01%) Si (5.89%) ทั่วทุกพื้นที่ของภาพ ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเคลือบบาง สำหรับ K-OMS2 (coated) อัตราส่วน 1:50 พบการกระจายตัวของธาตุ Al (3.11%) Si (3.97%) เบบางเพียงเล็กน้อย บ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวที่เคลือบด้วย K-OMS2 มีความสม่ำเสมอ สมบูรณ์ และมีความหนาที่ค่อนข้างเหมาะสมที่สุด

สำหรับการกระจายตัวของธาตุใน Fe-BTC (coated) ทั้ง 3 อัตราส่วน พบการกระจายตัวของเหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของ Fe-BTC น้อย และมีปริมาณธาตุ Fe ประมาณ 0.17-1.27% ผลดังกล่าวไม่สอดคล้องกับการศึกษา Fe-BTC ก่อนหน้านี้ในลักษณะผง ซึ่งพบปริมาณธาตุ Fe สูงถึง 12.17% (จักรภพ พันธศรี, 2560) อย่างไรก็ตาม Fe-BTC (coated) ยังคงพบการกระจายตัวของธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในส่วนของ BTC โดยมีปริมาณธาตุ C 42.82-45.36% และ O 53.37-54.73% สำหรับการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si พบในอัตราส่วนเดียวคือ 1:100 แสดงถึงการเคลือบที่น้อยและบางเกินไปจนสามารถพบการกระจายตัวของธาตุ Al และ Si ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเม็ดเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ ดังนั้นอัตราส่วนการเคลือบที่เหมาะสมของ Fe-BTC (coated) จากผลการศึกษาพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM-EDS คือ 1:10 และ 1:50 และเนื่องจากการใช้เทคนิคนี้ไม่สามารถยืนยันการมีอยู่ของธาตุ Fe ใน Fe-BTC (coated) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาการมีอยู่ของธาตุ Fe ด้วยเทคนิค Micro-XRF ต่อไป

ตารางที่ 4.2 การกระจายตัวของธาตุบน K-OMS2 (coated) อัตราส่วน (ก-ง) 1:10 (จ-ช) 1:50 และ (ณ-ญ) 1:100



ตารางที่ 4.3 การกระจายตัวของธาตุบน Fe-BTC (coated) อัตราส่วน (ก-จ) 1:10 (ฉ-ญ) 1:50 และ (ฎ-ต) 1:100



ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุของ K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิก

Ratio	Weight of element (%)								Total
	Al	Si	O	Mn	K	C	Fe	Others	
K-OMS2:ceramic ball									
1: 10	3.97	5.17	37.64	46.19	3.68	3.34	-	-	100
1: 50	3.11	3.97	37.79	47.74	3.87	3.53	-	-	100
1: 100	4.01	5.89	36.35	47.78	3.84	4.14	-	-	100
Fe-BTC:ceramic ball									
1: 10	-	-	53.37	-	-	45.36	1.27	-	100
1: 50	-	-	54.73	-	-	45.10	0.17	-	100
1: 100	1.58	2.03	53.46	-	-	42.82	0.11	-	100
Ceramic ball	14.55	20.46	55.44	-	1.14	5.28	-	1.52	100

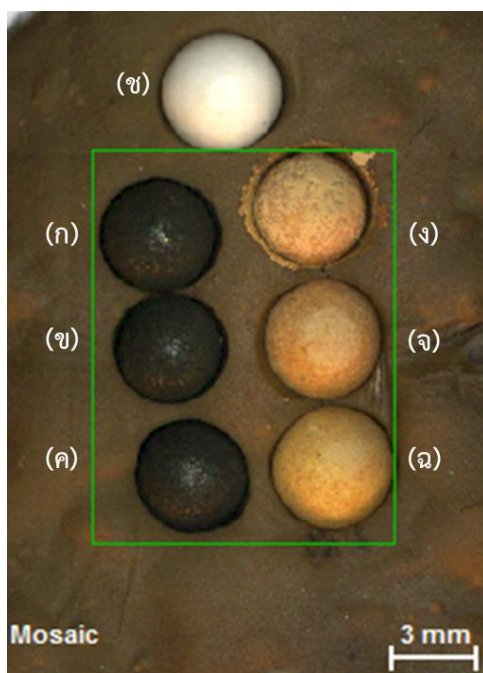
4.1.4 การศึกษาองค์ประกอบและการกระจายตัวของธาตุด้วยเทคนิค Micro-X-ray fluorescence (Micro-XRF)

การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค Micro-XRF กำหนดให้สภาวะของเครื่องที่ใช้ทดสอบตัวอย่างมีรายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 4.6

Map information	
Mapping parameters	
Width:	500 pixel
	10.3 mm
Height:	655 pixel
	13.5 mm
Pixel Size:	21 μ m
Total number of pixel:	327500 pixel
Acquisition parameters	
Frame count:	2
Pixel time:	1 ms/pixel
Measure time:	4:08 min
Overall time:	20 min
Stage speed:	21.0 mm/s
Stage position (X,Y,Z):	106.295;77.627;120.111 mm
Tube parameter	
High voltage:	50 kV
Anode current:	600 μ A
Filter:	Empty
Optic:	Lens
SpotSize:	20
Chamber at:	Air 20 mbar
Anode:	Rh
Detector parameters	
Selected detectors:	1,2
Max. pulse throughput:	130000 cps

รูปที่ 4.6 สภาวะของเครื่อง Micro-XRF ที่ใช้วิเคราะห์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)

เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุในตัวอย่าง K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยเทคนิค Micro-XRF ลักษณะของตัวอย่างที่เตรียมและถูกรองรับด้วยดินน้ำมันสังเคราะห์ก่อนนำไปวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.7 โดย K-OMS2 (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ในรูปที่ 4.7(ก-ค) ตามลำดับ มีลักษณะเป็นผงสีดำเคลือบบนเม็ดเซรามิก ในขณะที่ Fe-BTC (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน 1:10 1:50 และ 1:100 ในรูปที่ 4.7(ง-จ) ตามลำดับ มีลักษณะเป็นผงสีส้มที่เคลือบบนเม็ดเซรามิก เปรียบเทียบกับเม็ดเซรามิกแม่แบบ ในรูปที่ 4.7(ข) สำหรับตัวอย่าง Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 ในรูปที่ 4.7(ง) สังเกตลักษณะผงสีส้มของ Fe-BTC มีการหลุดออกจากเม็ดเซรามิกอย่างชัดเจนและไปติดอยู่รอบๆ หลุมของแผ่นรองรับดินน้ำมันสังเคราะห์ แสดงถึงการเคลือบของผง Fe-BTC ที่มากเกินไปจนสามารถหลุดร่อนออกมาจากเม็ดเซรามิกได้

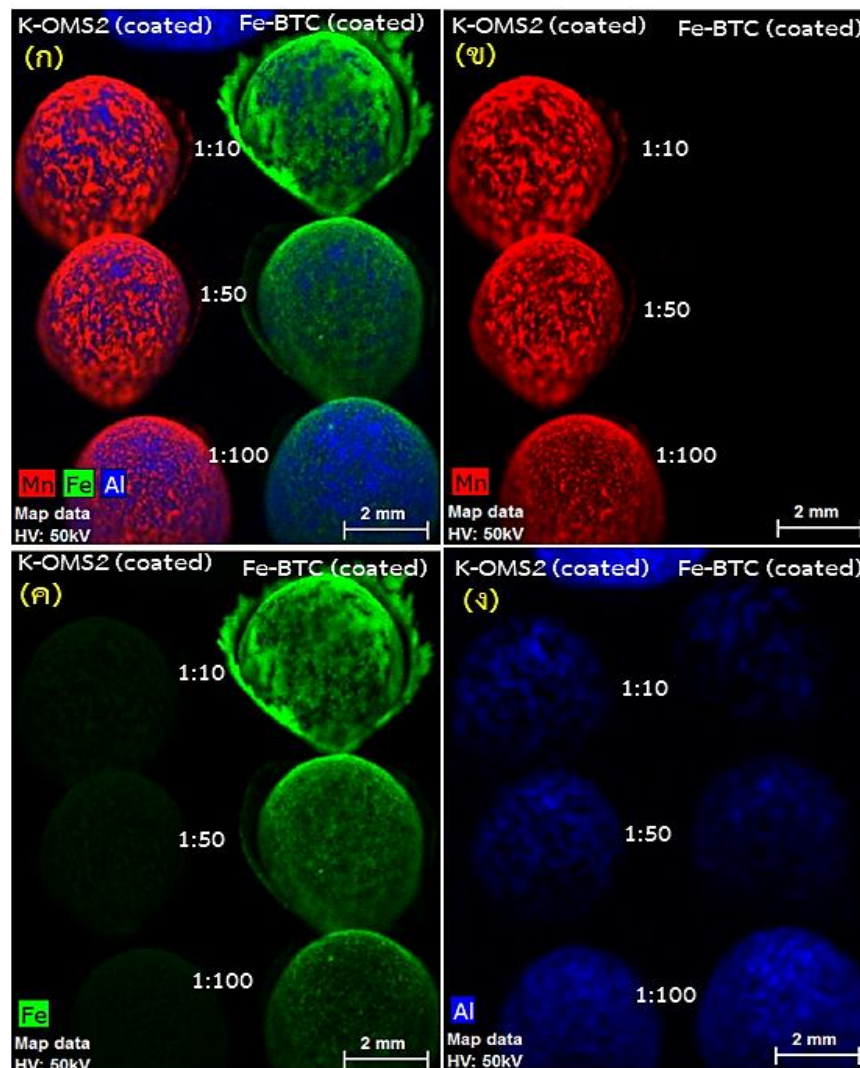


รูปที่ 4.7 ลักษณะ K-OMS2 (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (ก) 1:10 (ข) 1:50 และ (ค) 1:100 และ Fe-BTC (coated) ที่เคลือบด้วยอัตราส่วน (ง) 1:10 (จ) 1:50 และ (ฉ) 1:100 ที่วางบนแผ่นรองรับชนิดดินน้ำมันสังเคราะห์ก่อนนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ (ข) เม็ดเซรามิก

ภาพแผนที่ (Mapping image) ชนิดซ้อนทับการกระจายตัวของทุกธาตุที่สนใจ ได้แก่ แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) และอะลูมิเนียม (Al) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Micro-XRF ในรูปที่ 4.8(ก) แสดงให้เห็นว่า K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) มีธาตุ Mn และ Fe เกาะติดบนเม็ดเซรามิกแม่แบบ ตามลำดับในทุกอัตราส่วนของการเคลือบ จากการศึกษาโดยใช้เทคนิค SEM-EDS ที่พบการกระจายของ Fe น้อยทั้ง 3 อัตราส่วน อีกทั้งปริมาณธาตุ Fe ที่พบบน Fe-BTC (coated) เท่ากับ 0.11-1.27% จึงไม่สามารถยืนยันการมีอยู่ของ Fe ได้ชัดเจน โดยจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Micro-XRF สามารถพบ Fe เคลือบในทุกอัตราส่วนที่มีการกระจายตัวที่แตกต่างกัน เป็นการยืนยันการมีอยู่ของ Fe ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าทั้ง K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เผยให้เห็น Al ปะปนอยู่บางส่วน ในรูปที่ 4.8(ข-ค) ความหนาแน่นของ Mn ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ K-OMS2 และ Fe ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ Fe-BTC (Phanthasri et al., 2018) กระจายตัวเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ การเคลือบด้วยอัตราส่วน 1:10 > 1:50 > 1:100 โดยอัตราส่วน 1:10 มีผง K-OMS2 และ Fe-BTC มากที่สุด แต่เกาะกลุ่มในลักษณะอนุภาคขนาดใหญ่กว่าอัตราส่วนอื่น เนื่องจากมีปริมาณผงที่ใช้มากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งปริมาณผงที่ใช้มากไปหาน้อยสุดคือ อัตราส่วน 1:10 1:50

และ 1:100 ตามลำดับ ทำให้พบการเคลือบหนาไปหาบางสุดตามอัตราส่วนของปริมาณผงที่ใช้ ในขณะที่ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อัตราส่วน 1:10 สังเกตพบการกระจายตัวของ Mn และ Fe บริเวณขอบของภาพตัวอย่าง เนื่องจากมีปริมาณผง K-OMS2 และ Fe-BTC มากเกินไป ทำให้เกิดการหลุดร่อนได้ง่าย โดยพบว่าปริมาณผงที่หลุดร่อนบริเวณขอบของตัวอย่าง Fe-BTC (coated) มีมากกว่า K-OMS2 (coated)

เมื่อดูการกระจายตัวของ Al บน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ทั้งสามอัตราส่วน ในรูปที่ 4.8(ง) พบว่าการกระจายตัวและปริมาณของ Al บนตัวอย่างเป็นไปในแนวทางเดียวกันคือ พบการกระจายตัวของ Al เรียงจากน้อยไปมากในอัตราส่วน $1:10 < 1:50 < 1:100$ เนื่องจากมีการใช้ปริมาณผงน้อยลงตามอัตราส่วนดังกล่าว ทำให้การเคลือบบางขึ้นและเห็น Al มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นอัตราส่วนการเคลือบที่ถูกคาดการณ์ว่าน่าจะมีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน ได้แก่ อัตราส่วน 1:50 และเมื่อคำนวณหาความหนาของการเคลือบอัตราส่วนดังกล่าวของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ด้วยโปรแกรม Auto-Point พบว่าเท่ากับ 0.99 และ 15.91 μm ตามลำดับ โดย Fe-BTC (coated) มีความหนามากกว่าเนื่องจากเม็ดเซรามิกที่เคลือบด้วยผง Fe-BTC มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ เป็นแผ่นหนาอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลลักษณะทางกายภาพและผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของธาตุ Mn (สีแดง) Fe (สีเขียว) และ Al (สีน้ำเงิน) บน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) (ก) ธาตุทั้งสามชนิด (ข) เฉพาะธาตุ Mn (ค) เฉพาะธาตุ Fe และ (ง) เฉพาะธาตุ Al

4.1.5 การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffractometry (XRD)

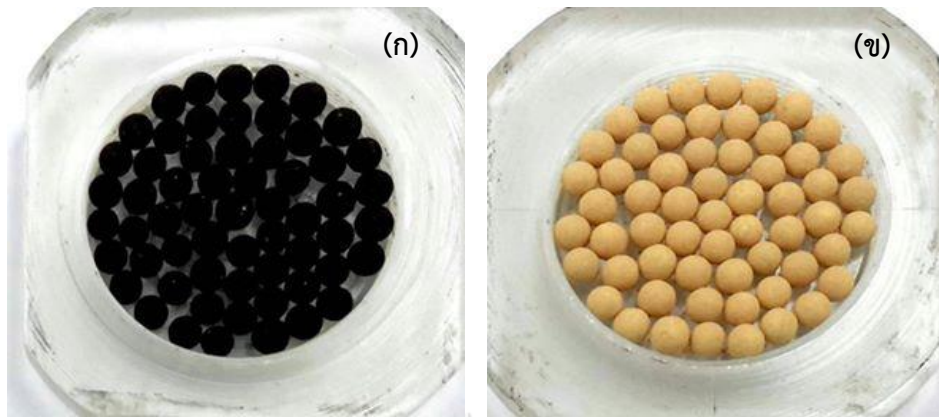
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาเฟสและโครงสร้างผลึกของ K-OMS2 และ Fe-BTC โดยศึกษาทั้งแบบผงและแบบที่ผ่านการขึ้นรูปเปรียบเทียบกัน เพื่อระบุลักษณะโครงสร้างที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการขึ้นรูปโดยการเคลือบด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล ที่ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่ผ่านการขึ้นรูป ได้แก่ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ในวิธีที่ต่างออกไป เนื่องจากตัวอย่างมีลักษณะเป็นเม็ด ไม่

สามารถเตรียมตัวอย่างให้มีพื้นผิวเรียบได้ตลอดพื้นที่รองรับของแท่นใส่ตัวอย่าง จึงต้องใช้แท่นใส่ตัวอย่างที่สามารถปรับระดับความลึกให้ตัวอย่างอยู่ในระนาบเดียวกันกับแท่นใส่ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากนั้นจึงจะทำการวิเคราะห์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ได้

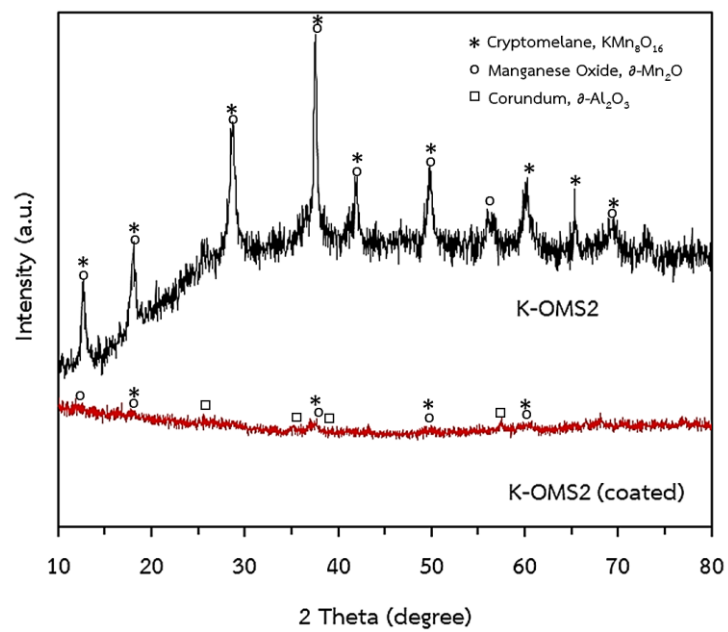
รูปแบบ XRD ของ K-OMS2 และ K-OMS2 (coated) แสดงในรูปที่ 4.10 โดยพบว่าผงของ K-OMS2 มีโครงสร้างผลึกตรงกับ Cryptomelane ($\text{KMn}_8\text{O}_{16}$, JCPDS 29-1020) (Chen et al., 2002, Garces et al., 2014, Iyer et al., 2012, Luo et al., 2000, Phanthasri et al., 2018, Sriskandakumar et al., 2009, Wang et al., 2015, Wei et al., 2015, Wu, Shi and Deng, 2018) และ Manganese dioxide ($\beta\text{-MnO}_2$, JCPDS 44-0141) (Feng et al., 2014) โดยระนาบของผลึกได้แก่ (110) (200) (310) (211) (301) (411) (600) (521) (002) และ (741) อยู่ในตำแหน่ง 2 Theta ที่ 12.6° 18.1° 28.7° 37.5° 41.8° 49.7° 56° 60.2° 65.4° และ 69.5° ตามลำดับ ซึ่งโครงสร้างผลึกดังกล่าวเริ่มเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Millanar et al., 2014) นอกจากนี้ K-OMS2 ที่ได้ มีรูปแบบ XRD ที่กว้าง (Broad) ซึ่งตรงกับผลรูปแบบ XRD จากการศึกษาอื่น (Chen et al., 2002) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างมีความเป็นผลึกไม่สูงมากนักและส่งผลต่อขนาดของผลึกที่ใหญ่ขึ้น ในขณะที่รูปแบบ XRD ของ K-OMS2 (coated) พบโครงสร้างผลึกของ Cryptomelane และ Manganese dioxide ที่ไม่ค่อยเด่นชัดที่ระนาบ (200) (211) (411) และ (521) นอกจากนี้ยังพบเฟสของ Corundum ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, JCPDS 83-2080) โดยมีพีคที่ไม่เด่นชัด ซึ่งเป็นของเม็ดเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ แสดงถึงพื้นที่ของ K-OMS2 (coated) ที่ไม่ถูกเคลือบบางส่วนหรือการเคลือบที่ไม่หนามาก ทำให้รังสีเอกซ์สามารถทะลุไปถึงได้

รูปแบบ XRD ของ Fe-BTC และ Fe-BTC (coated) แสดงในรูปที่ 4.11 โดยพบโครงสร้างผลึกของ Fe-BTC ตำแหน่ง 2 Theta เท่ากับ 10.7° 23.5° และ 27.4° สอดคล้องกับรูปแบบ XRD ที่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา (Garcia et al., 2014, Phanthasri et al., 2018) ในขณะที่รูปแบบ XRD ของ Fe-BTC (coated) ไม่สามารถระบุโครงสร้างผลึกของ Fe-BTC ได้ชัดเจน อย่างไรก็ตามรูปแบบ XRD ของ Fe-BTC (coated) ยังพบโครงสร้างผลึกของ $\text{Fe}+3\text{O}(\text{OH})$, JCPDS 34-1266 Hematite (Fe_2O_3 , JCPDS 85-0987) และเฟสที่เด่นชัดของ Corundum ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, JCPDS 83-2080) มากกว่าที่พบในรูปแบบ XRD ของ K-OMS2 (coated) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Micro-XRF

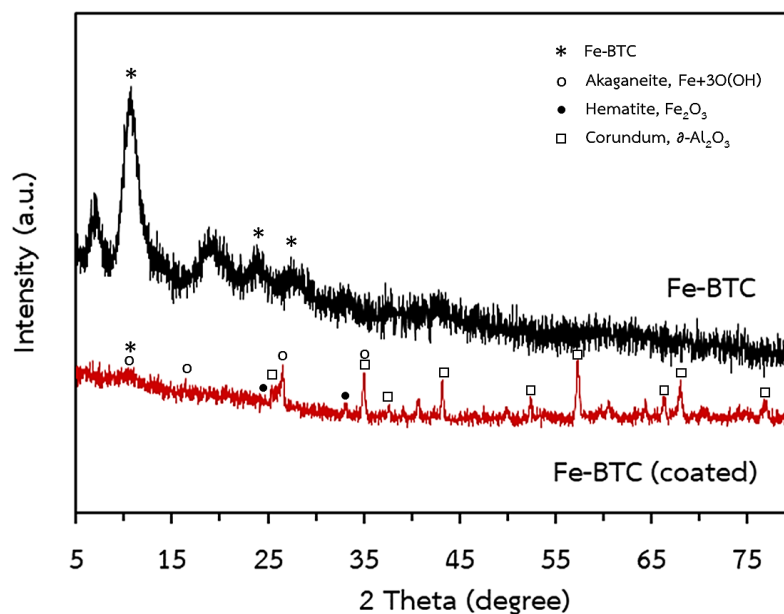
ดังนั้นจากการศึกษาด้วยเทคนิค XRD สามารถยืนยันได้ว่าวัสดุ K-OMS2 และ Fe-BTC ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็น K-OMS2 และ Fe-BTC ในขณะที่ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งของ K-OMS2 และ Fe-BTC ได้บางส่วน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของขั้นตอนการเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิก ผ่านการเขย่าด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกลที่ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้โครงสร้างผลึกของ K-OMS2 และ Fe-BTC เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.9 การเตรียมตัวอย่างในแท่นใส่ตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ XRD ของ (ก) K-OMS2 (coated) และ (ข) Fe-BTC (coated)



รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของ K-OMS2 และ K-OMS2 (coated)



รูปที่ 4.11 รูปแบบ XRD ของ Fe-BTC และ Fe-BTC (coated)

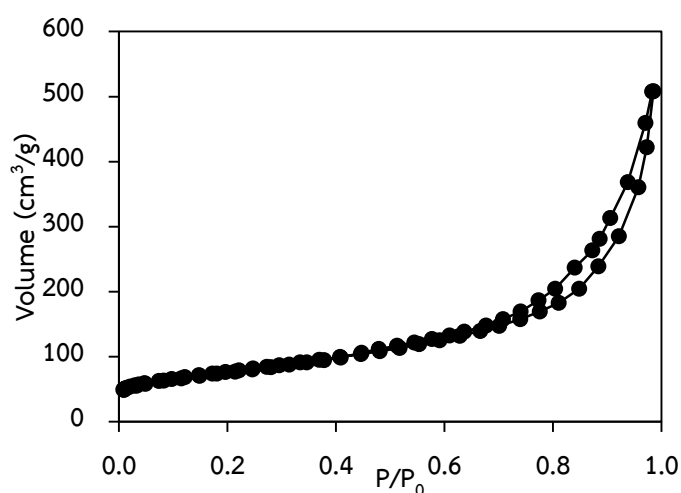
4.1.6 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Nitrogen adsorption-desorption isotherm

4.1.6.1 Nitrogen adsorption-desorption isotherm

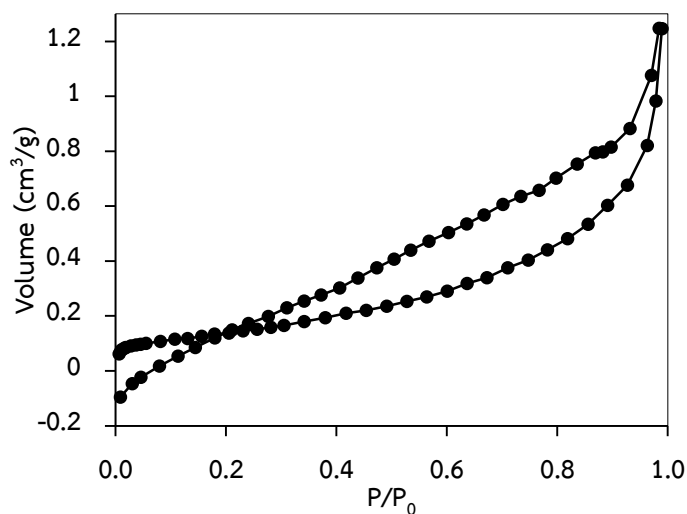
ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2 และ K-OMS2 (coated) แสดงในรูปที่ 4.12-4.13 โดยของ K-OMS2 พบลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็น Type II ซึ่งตรงกับผลการศึกษาอื่น (Chen et al., 2002, Wang et al., 2015, Wei et al., 2015, Wu, Shi and Deng, 2018) แสดงให้เห็นว่า เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (Nonporous) หรือ ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึง เกิดเป็นหลายชั้น (Multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (Break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้น เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm (Sing, 1985, Gregg and Sing, 1982) อย่างไรก็ตาม ก็ยังคงพบรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ที่ P/P_0 ต่ำ และการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation) ที่ P/P_0 สูง เช่นเดียวกัน (Chen et al., 2002, Wang et al., 2015) สำหรับวงฮีสเทอริซิส (Hysteresis loop) ที่พบใน K-OMS2 เป็น Type H3 (Chen et al., 2002) ตามการจัดจำแนกของ IUPAC

classification ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ดูดซับเป็นสองชั้น และลักษณะของ Type H3 แสดงถึงการรวมตัวกันอย่างหลวมๆ (Aggregation) ของอนุภาคที่มีลักษณะแบน มีช่องว่างแบบเป็นร่อง และที่ P/P_0 สูง ซึ่งเข้าใกล้การอิ่มตัว บ่งบอกถึงการมีอยู่ของ Slit-shape mesopores ที่เป็นรูพรุนขนาดกลาง 2-50 nm รูปทรงยาว (Chen et al., 2002) ซึ่งผลดังกล่าวตรงกับรูปทรงของ K-OMS2 จากผลการศึกษา SEM

ในส่วนของ K-OMS2 (coated) ซึ่งผ่านขั้นตอนการขึ้นรูปโดยเทคนิคการเขย่า หมุนรอบเชิงกล ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่งผลให้ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2 (coated) เปลี่ยนแปลงไป โดยพบลักษณะไอโซเทอมการดูดซับเป็น Type IV (Wu et al., 2018) ที่หมายถึงไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (Bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับ Type II ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งจะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ (Gregg and Sing, 1982, Sing, 1985) นอกจากนี้วงฮีสเทอรีซิสที่พบใน K-OMS2 (coated) เป็น Type H1 แสดงการจับตัวเป็นก้อน (Agglomeration) ของอนุภาคทรงกลม หรืออนุภาคที่มีการเรียงตัวที่ค่อนข้างมีระเบียบ หรือเกิดจากรูพรุนที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่เชื่อมต่อกัน มีความสม่ำเสมอของรูพรุนค่อนข้างสูง (Sing, 1985) สอดคล้องกับความ เป็นได้จากการขึ้นรูปเทคนิคการเขย่า หมุนรอบเชิงกลและตรงกับผลการศึกษา SEM ที่กล่าวมาข้างต้น

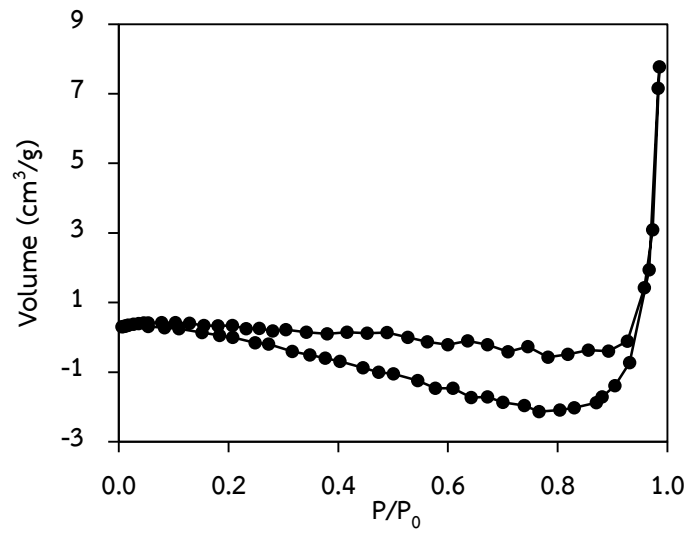


รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2

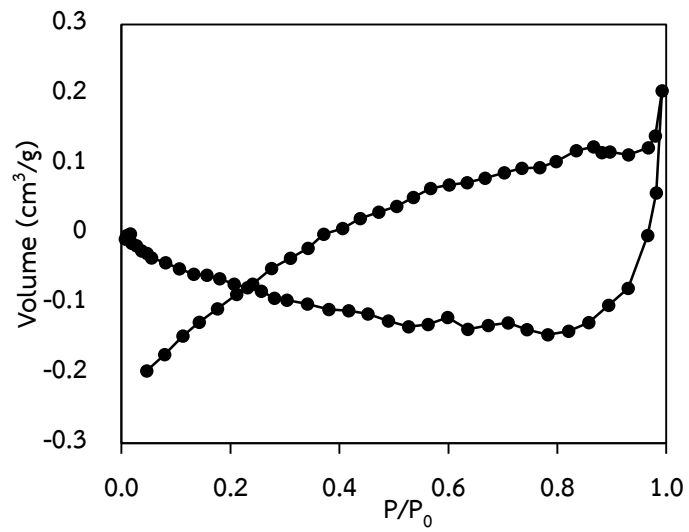


รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดซับของ K-OMS2 (coated)

ไอโซเทอมการดูดซับของ Fe-BTC และ Fe-BTC (coated) แสดงในรูปที่ 4.14-4.15 โดยทั้ง Fe-BTC และ Fe-BTC (coated) มีไอโซเทอมการดูดซับที่แทบจะไม่ตรงกับลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบใดและมีปริมาตรรูพรุนที่เป็นค่าติดลบเมื่อทำการเพิ่มและลด P/P_0 ทั้งที่เกิดจากขั้นตอนการไล่ก๊าซก่อนการวิเคราะห์ที่ไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม Fe-BTC และ Fe-BTC (coated) ยังพอสามารถระบุวงฮิสเทอรีซิสได้ โดยอยู่ใน Type H4 แสดงถึงวงที่เกิดจากรูพรุนที่เป็นร่องแคบๆ หรืออนุภาคที่มีช่องว่างภายในแบบไม่สม่ำเสมอ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างกว้าง หรือเป็นอนุภาคกลมกลวงที่มีผนังที่มีรูพรุนอีกชั้นหนึ่ง (Sing, 1985)



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดซับของ Fe-BTC



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดซับของ Fe-BTC (coated)

4.1.6.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume) และการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution)

ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนของวัสดุ และการกระจายขนาดรูพรุน แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่า K-OMS2 มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่น (Chen et al., 2002, Phanthasri et al., 2018, Wang et al., 2015, Wei et al., 2015, Wu, Shi and Deng, 2018) โดยมีค่าเท่ากับ $270.703 \text{ m}^2/\text{g}$ นอกจากนี้ยังมีปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนเท่ากับ $0.729 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 3.422 nm ตามลำดับ เมื่อทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกลแล้ว K-OMS2 (coated) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนของวัสดุ และการกระจายขนาดรูพรุนลดลงเหลือ $0.517 \text{ m}^2/\text{g}$ $0.002 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 3.212 nm ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน Fe-BTC มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ การกระจายขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของวัสดุสูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับ Fe-BTC (coated) เท่ากับ $0.588 \text{ m}^2/\text{g}$ $0.015 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 5.492 nm ตามลำดับ และเมื่อทำการขึ้นรูปแล้ว Fe-BTC (coated) มีค่าดังกล่าวลดลงเหลือ $0.000 \text{ m}^2/\text{g}$ $0.0006 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 4.972 nm ตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากน้ำหนักของ Fe-BTC (coated) ที่ใช้วิเคราะห์ได้รวมกับน้ำหนักของเม็ดเซรามิกไปด้วย ซึ่งผลให้ปริมาณ Fe-BTC ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีน้อยมาก อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจำเพาะของ Fe-BTC ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการศึกษาอื่นซึ่งได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $356\text{-}877 \text{ m}^2/\text{g}$ (Garcia et al., 2014, Majano et al., 2013) และจากการกระจายขนาดรูพรุนที่ได้ของวัสดุรูพรุนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ K-OMS2 K-OMS2 (coated) Fe-BTC และ Fe-BTC (coated) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง $3.212\text{-}5.492 \text{ nm}$ แสดงถึงการมีอยู่ของลักษณะรูพรุน Mesopore ที่อยู่ในช่วง $2\text{-}50 \text{ nm}$

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุน K-OMS2 K-OMS2 (coated) Fe-BTC และ Fe-BTC (coated)

material	BET method	BJH method	
	Surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size (nm)
K-OMS2	270.703	0.729	3.422
K-OMS2 (coated)	0.517	0.002	3.212
Fe-BTC	0.588	0.015	5.492
Fe-BTC (coated)	0.000	0.0006	4.972

4.1.7 การศึกษาประจุที่ผิวของ K-OMS2 Fe-BTC K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)

4.1.7.1 K-OMS2 และ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออน

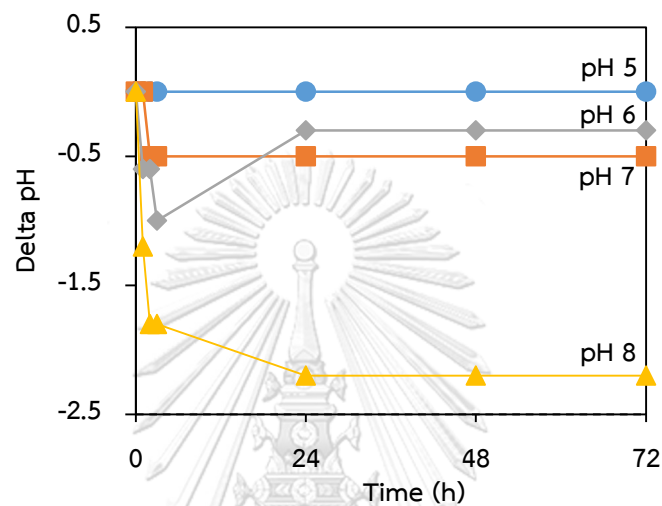
1 เวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium time)

รูปที่ 4.16 แสดงผลการศึกษาประจุที่ผิวของผง K-OMS2 ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 โดยตรวจวัด pH ที่เปลี่ยนแปลงจาก pH เริ่มต้น (Delta pH = pH สุดท้าย-pH เริ่มต้น) (Dmitrieva et al., 2007, Wu et al., 2006) จนเข้าสู่สภาวะสมดุลและไม่มีการเปลี่ยนแปลง pH อีก พบว่าประจุที่ผิวของ K-OMS2 ในน้ำปราศจากไอออน pH 5 มีค่าเท่ากับ 0 (เป็นกลาง) ในทุกช่วงเวลา ในขณะที่ pH 6 มีค่าประจุที่ผิวเท่ากับ 0 ที่ 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นประจุที่ผิวมีค่าลดลง (เป็นประจุลบ) มากขึ้นและปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง สำหรับ pH 7 และ 8 มีการเข้าสู่สภาวะสมดุลในชั่วโมงที่ 2 และ 24 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างประจุที่ผิวของผง K-OMS2 ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 พบว่า ความเป็นประจุลบที่ผิวเรียงลำดับจากสูงสุดไปต่ำสุด คือ pH 8 > 7 > 6 > 5

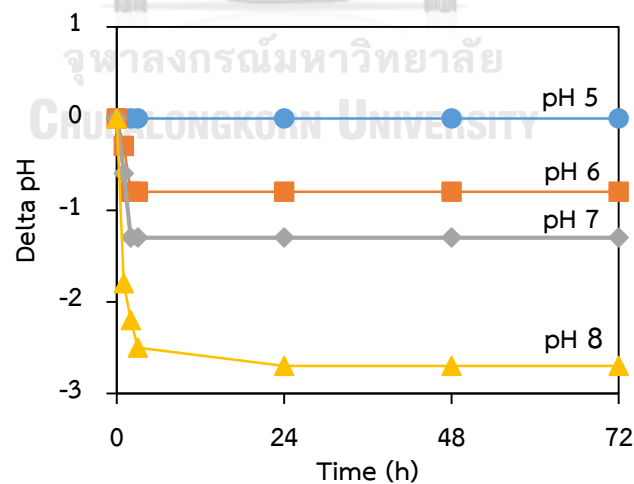
ในทำนองเดียวกันผลการศึกษาประจุที่ผิวของผง Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ประจุที่ผิวของ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออน pH 5 มีค่าเท่ากับ 0 (เป็นกลาง) ในทุกช่วงเวลา และที่ pH 6 7 และ 8 Fe-BTC มีค่าประจุที่ผิวค่อยๆ ลดลง (เป็นประจุลบ) มากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในชั่วโมงที่ 1 2 และ 24 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างประจุที่ผิวของผง Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ

8 พบว่า ความเป็นประจุลบที่ผิวเรียงลำดับจากสูงสุดไปต่ำสุด คือ $\text{pH } 8 > 7 > 6 > 5$ ซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับของ K-OMS2

ดังนั้น ณ สภาวะสมดุลในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 ผง K-OMS2 และ Fe-BTC จะแสดงประจุที่ผิวเป็นกลาง และเมื่อ $\text{pH} > 5$ แสดงประจุที่ผิวเป็นลบ



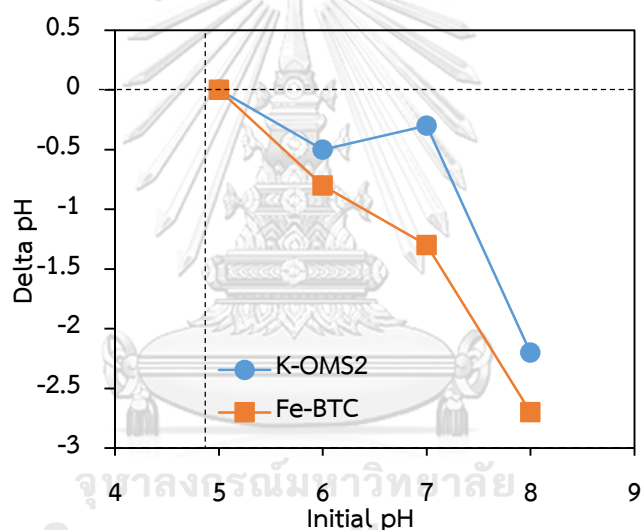
รูปที่ 4.16 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 72 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 ประจุที่ผิวของ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 72 ชั่วโมง

2 pH of point of zero charge (pH_{pzc})

การหาค่า pH_{pzc} หมายถึงการหา pH ที่ทำให้ประจุที่ผิวของ K-OMS2 และ Fe-BTC เป็น 0 (เป็นกลาง) ที่สภาวะสมดุล โดยทั่วไปจะทำการปรับ pH ของสารละลายหรือน้ำปราศจากไอออนให้ครอบคลุมทุกช่วง pH (Dmitrieva et al., 2007, Lambert et al., 2009, Seredych, Rossin and Bandosz, 2011, Wu et al., 2006, Yang et al., 2010, Zhao and Liu, 2009) pH_{pzc} ของ K-OMS2 และ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออน pH 5 6 7 8 ในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าทั้ง K-OMS2 และ Fe-BTC มีค่า pH_{pzc} ที่ pH 5 ทำให้ทราบว่า เมื่อ K-OMS2 และ Fe-BTC อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH 5 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 และ Fe-BTC จะเป็น 0 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Phanthasri et al., 2017 และ จักรภพ พันธศรี, 2560



รูปที่ 4.18 pH_{pzc} ของ K-OMS2 และ Fe-BTC ในน้ำปราศจากไอออนที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ณ เวลา 72 ชั่วโมง

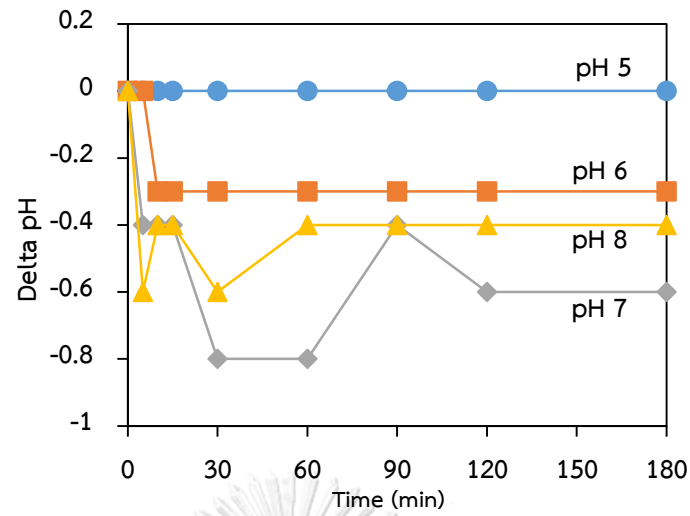
4.1.7.2 K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 5 mg/L

1. เวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล (Equilibrium time)

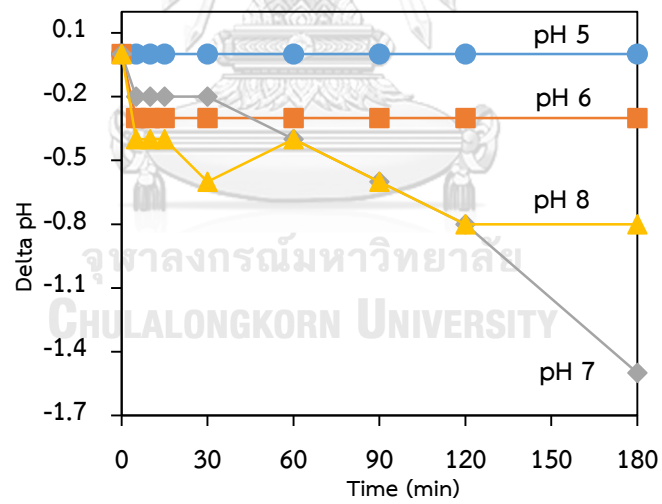
รูปที่ 4.19 แสดงผลการศึกษาประจุที่ผิวของผง K-OMS2 (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที โดยตรวจวัด pH ที่เปลี่ยนแปลงจาก pH เริ่มต้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุล พบว่าประจุที่ผิวของ K-OMS2 (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 ที่มีการปรับ pH 5 มีค่าเท่ากับ 0 (เป็นกลาง) ในทุกช่วงเวลา ในขณะที่ pH 6 มีค่าประจุที่ผิวเท่ากับ 0 ในช่วงแรก จากนั้นประจุที่ผิวมีค่าลดลง (เป็นประจุลบ) มากขึ้นและปรับเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 10 นาที สำหรับ pH 7 และ 8 มีการเข้าสู่สภาวะสมดุลในเวลาที่ 60 และ 120 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างประจุที่ผิวของผง K-OMS2 ในสารละลาย NaAsO_3 ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 พบว่าความเป็นประจุลบที่ผิวเรียงลำดับจากสูงที่สุดไปต่ำสุด คือ $\text{pH } 7 > 8 > 6 > 5$

สำหรับผลการศึกษาประจุที่ผิวของผง Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าประจุที่ผิวของ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ pH 5 มีค่าเท่ากับ 0 (เป็นกลาง) ในทุกช่วงเวลา และที่ pH 6 และ 8 Fe-BTC (coated) มีค่าประจุที่ผิวค่อยๆ ลดลง (เป็นประจุลบ) มากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลในเวลาที่ 10 และ 120 ตามลำดับ ในขณะที่ pH 7 ยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุลภายใน 180 นาที เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างประจุที่ผิวของผง Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 พบว่า ความเป็นประจุลบที่ผิวเรียงลำดับจากสูงที่สุดไปต่ำสุด คือ $\text{pH } 7 > 8 > 6 > 5$ ซึ่งเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับของ K-OMS2 (coated)

ดังนั้น ณ สภาวะสมดุลในสารละลาย NaAsO_3 และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่มีการปรับ pH 5 K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) จะแสดงประจุที่ผิวเป็นกลาง และเมื่อ $\text{pH} > 5$ แสดงประจุที่ผิวเป็นลบ



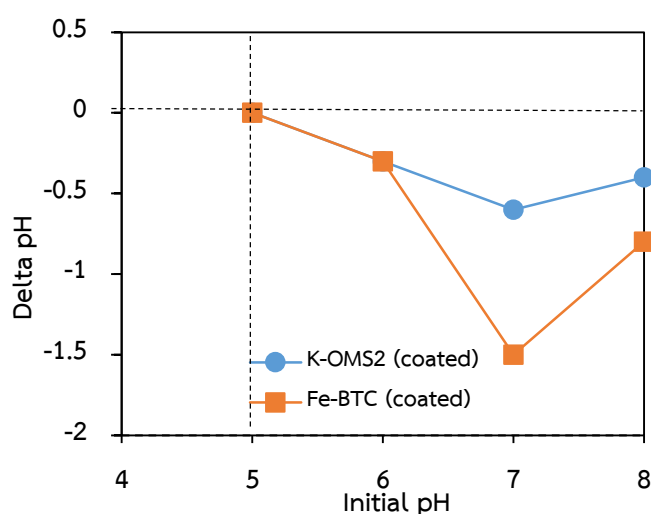
รูปที่ 4.19 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที



รูปที่ 4.20 ประจุที่ผิวของ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ในเวลา 180 นาที

2. pH of point of zero charge (pH_{pzc})

pH_{pzc} ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ตามลำดับ pH 5 6 7 8 ในรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าทั้ง K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) มีค่า pH_{pzc} ที่ pH 5 ทำให้ทราบว่า เมื่อ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อยู่ในสารละลายที่มีค่า pH 5 ประจุที่ผิวของ K-OMS2 และ Fe-BTC จะเป็น 0



รูปที่ 4.21 pH_{pzc} ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในสารละลาย NaAsO_3 และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ตามลำดับ ที่มีการปรับ pH 5 6 7 และ 8 ณ เวลา 180 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

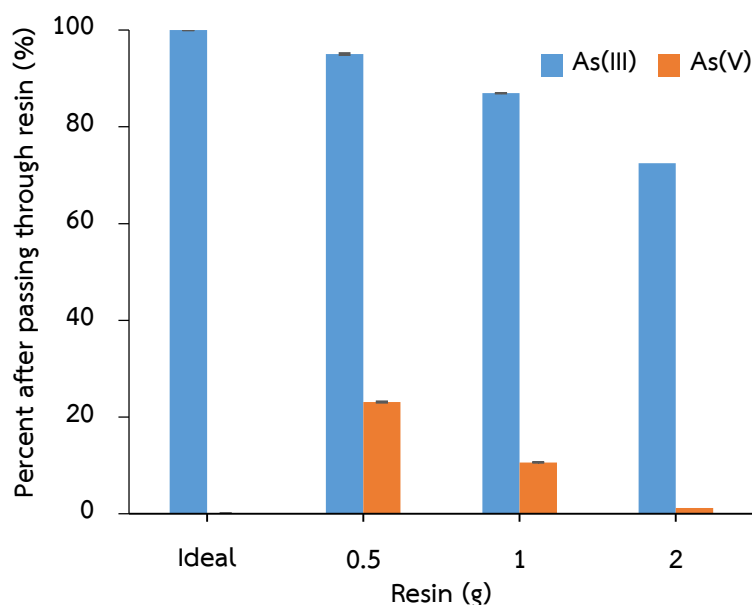
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2. การทดสอบเรซิน

การศึกษาประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนประจุชนิดต่าง ๆ ในการยืนยันการแลกเปลี่ยนประจุ As(V) และแยก As(III) ออกมา ซึ่งจากการศึกษาก่อนหน้าพบว่ามีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ As(V) มากที่สุด (Kotodyńska et al., 2010) โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 28°C ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูง (Kotodyńska et al., 2010) และที่ค่า pH 5.2 ซึ่งเป็น pH ที่สามารถพบ As(III) ประจุ 0 มากที่สุด ในขณะที่ As(V) พบประจุ -1 มากที่สุด (Sharma and Sohn, 2009)

การทดสอบใช้ปริมาณเรซิน 0.5 1 และ 2 g กับสารละลาย NaAsO_2 (As(III)) และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (As(V)) ความเข้มข้น 2 mg/L ปริมาตร 5 mL ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่า เรซิน 0.5 1 และ 2 g สามารถตรวจวัดปริมาณ As(III) เท่ากับ 95 87 และ 73% ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามพบปริมาณของ As(V) ที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนภายในเรซินและหลุดออกมาเท่ากับ 23 11 และ 1

% ตามลำดับ ในขณะที่ทางทฤษฎีเรซินต้องมีประสิทธิภาพในการแยก As(III) 100% และดักจับ As(V) ไว้ได้ทั้งหมด โดยควรพบปริมาณ As(V) ที่ผ่านเรซินเท่ากับ 0% จากผลการศึกษาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ปริมาณเรซิน 2 g ใช้ในการแยก As(III) ออกจาก As(V) เนื่องจากเป็นปริมาณที่มีการตรวจพบ As(V) น้อยที่สุด



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบประสิทธิภาพเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนกับ As(III) และ As(V) 5 mg/L ปริมาตร 5 mL ที่ใช้ปริมาณเรซิน 0.5 1 และ 2 g

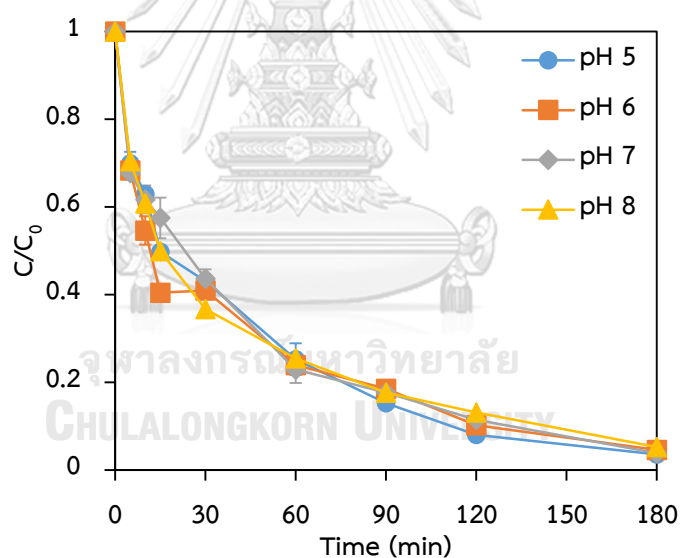
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 การทดสอบความเป็นไปได้ของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในการกำจัด As(III) และ As(V) แบบกะ (Batch system)

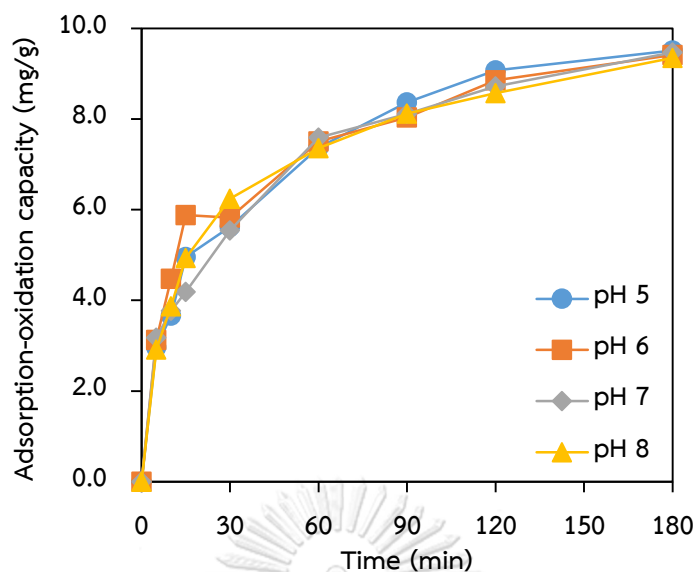
4.3.1 K-OMS2 (coated) กับปฏิกิริยาออกซิเดชัน As(III) ให้เป็น As(V)

ผลการศึกษาการออกซิเดชันของ As(III) โดยใช้ K-OMS2 (coated) ที่ค่า pH 5 6 7 และ 8 อุณหภูมิ 24.5°C แสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ As(III) ที่ลดลงแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า pH ต่างๆ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ที่ pH 5 6 7 และ 8 คงเหลือปริมาณ As(III) ในระบบเท่ากับ 3.56 4.58 3.83 และ 5.26% ตามลำดับ และจากการศึกษาของ Phanthasri et al. (2018) ที่นำผง K-OMS2 มาศึกษาการออกซิเดชันของ As(III) แบบกะ ที่ pH 6.34 อุณหภูมิ 30°C พบว่ามีปริมาณ As(III) ที่หายไปจากระบบประมาณ 58% และคงเหลือ As(III) ที่สามารถ

ออกซิไดซ์ As(III) ให้เป็น As(V) ประมาณ 42% แสดงถึงกลไกที่เกิดขึ้นระหว่าง K-OMS2 และ As(III) ที่มีทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของ As(III) และการดูดซับของ As(V) ที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.24 แสดง As(III) ที่หายไปจากระบบ เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ที่ pH 5 6 7 และ 8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.52 9.41 9.47 และ 9.35 mg/g ตามลำดับ โดยอาจเกิดได้จากทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของและการดูดซับเช่นกัน ค่าที่ได้จึงเป็นค่าความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับ (Oxidation-adsorption capacity) จากค่าดังกล่าวทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพในการออกซิเดชัน-ดูดซับที่ pH 5 6 7 และ 8 มีความใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามที่ pH 5 มีปริมาณ As(III) ลดลงและมีความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับมากที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษา $pH_{pzc}=5$ ของ K-OMS2 ที่ทำให้มีประจุที่ผิวเป็นกลางและเป็นลบที่ pH 6 และ 7 จึงทำปฏิกิริยากับ As(III) สปีชีส์ $As(OH)_3$ ซึ่งเป็นกลางได้ดีด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต ในขณะที่ pH 8 มีค่าความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับน้อยที่สุด เนื่องจากแรงผลักรันระหว่าง K-OMS2 ที่มีประจุที่ผิวเป็นลบกับ As(III) สปีชีส์ $AsO(OH_2)^-$ ซึ่งเป็นลบ (Yin et al., 2017)



รูปที่ 4.23 C/C_0 ของ As(III) ที่เหลือในระบบจากกระบวนการออกซิเดชันโดย K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L K-OMS2 0.05 g/100 mL และ อุณหภูมิ 24.5°C)

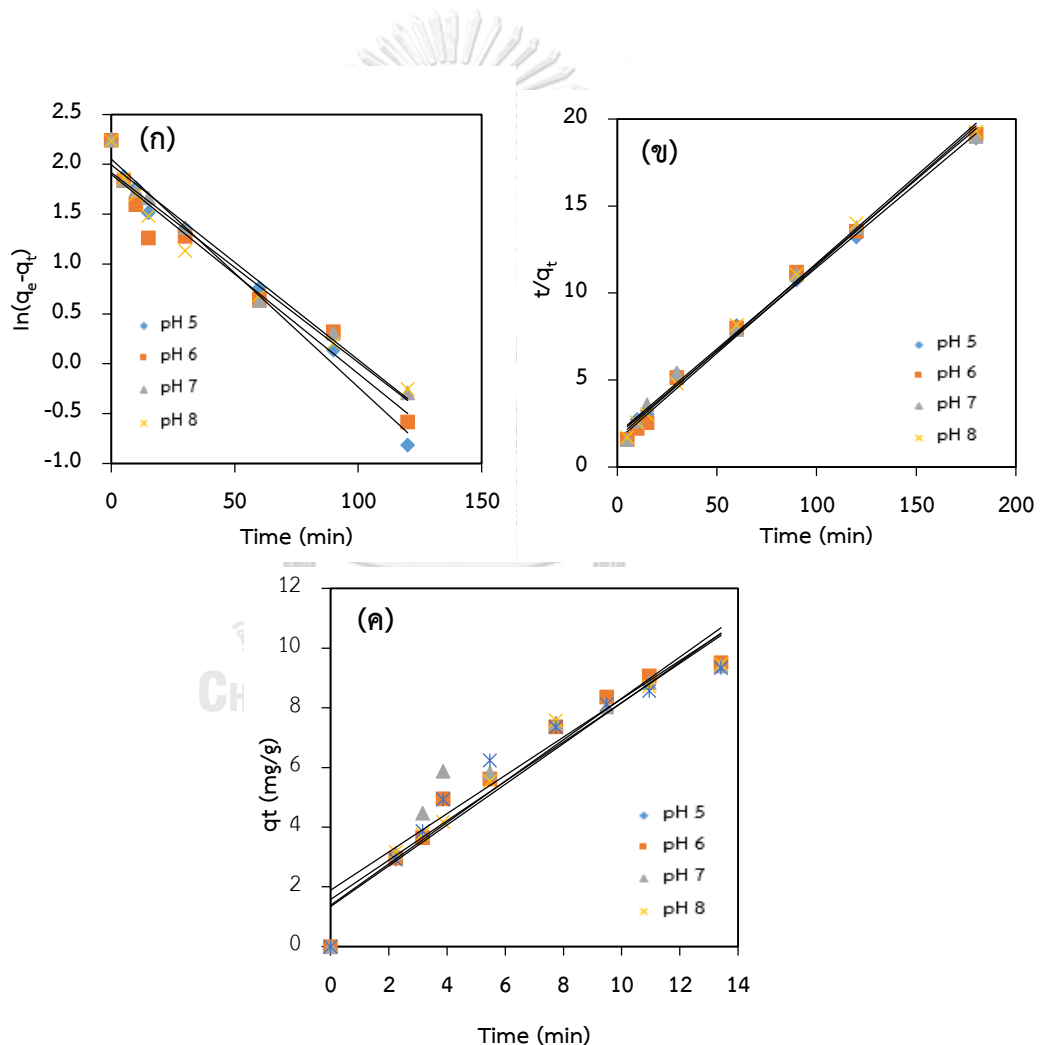


รูปที่ 4.24 ความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับของ K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L K-OMS2 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 24.5°C)

4.3.2 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-ดูดซับของ As(III) โดย K-OMS2 (coated)

การศึกษ้อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-ดูดซับโดยอาศัยแบบจำลอง Pseudo first order kinetics Pseudo second order kinetics และ Intra-particle diffusion เพื่ออธิบายถึงกลไกการที่เกิดขึ้น รูปที่ 4.25 แสดงการพลอตกราฟสมการเส้นตรงของทั้ง 3 แบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ในสมการของ Pseudo second order kinetics มีค่ามากกว่าของ Pseudo first order kinetics ในทุก pH ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-ดูดซับของสาร As(III) และ As(V) ที่เกิดจากการออกซิไดซ์โดย K-OMS2 (coated) เป็นแบบ Pseudo second order kinetics ซึ่งหมายถึงการทำปฏิกิริยาและการดูดซับบนวัสดุคงที่เมื่อเวลาผ่านไป และจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิวของวัสดุพื้นผิวที่ทำปฏิกิริยาและดูดซับที่เกิดขึ้นทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณของสารที่ถูกทำปฏิกิริยาและดูดซับเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้ยังหมายถึงความเร็วในการทำปฏิกิริยาและดูดซับถูกควบคุมโดยทางเคมี (El-Kamash, 2008, Yin et al., 2017) โดยที่ pH 5 6 7 และ 8 มีค่าคงที่อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (K_2) เท่ากับ 0.0050 0.0066 0.0050 และ 0.0060 g/mg·min ตามลำดับ และมีปริมาณสารที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและการดูดซับที่จุดสมดุล (q_e) เท่ากับ 7.78 6.69 7.36 และ 6.80 mg/g ตามลำดับ ค่า K_2 และ q_e มีค่าใกล้เคียงกันใน

ทุก pH ของการศึกษา อย่างไรก็ตาม K_2 และ q_e มีค่าสูงสุดที่ pH 5 นอกจากนี้จากแบบจำลอง Intra-particle diffusion ซึ่งอธิบายถึงกลไกของการดูดซับ พบว่ากราฟไม่ตัดไม่ผ่านจุดกำเนิด ($c \neq 0$) ซึ่งบ่งบอกถึงการแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้าที่สุดในกลไกการเกิดปฏิกิริยา (Rate controlling step) และไม่ได้เป็นการควบคุมการแพร่บริเวณขอบ (Boundary layer control) (Banerjee and Chattopadhyaya, 2017, Adams et al., 2010, Sadaf and Bhatti, 2013, Sekine and Nakatani, 2002) ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่า K_{id} ที่ pH 5 6 7 และ 8 เท่ากับ 0.6939 0.6421 0.6828 และ 0.6605 $\text{mg/g} \cdot \text{min}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ pH 5 มีอัตราการคงที่ของการแพร่ภายในอนุภาคสูงสุด



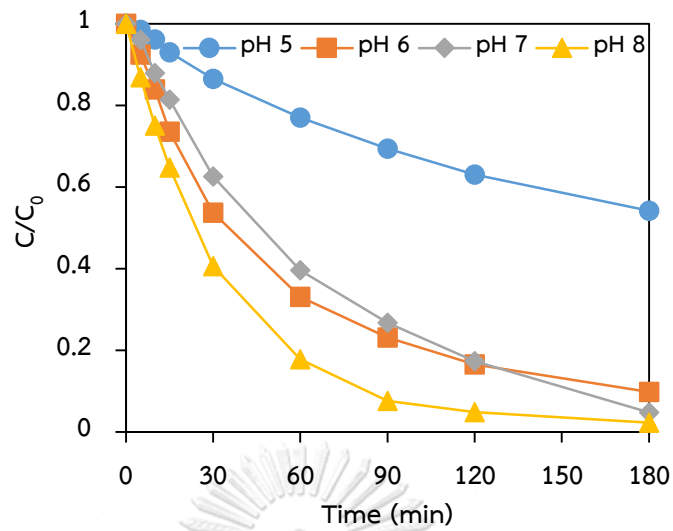
รูปที่ 4.25 จลนพลศาสตร์ของการออกซิเดชัน-ดูดซับ As(III) ที่ pH 5 6 7 8 โดย K-OMS2 (coated) ด้วยแบบจำลอง (ก) Pseudo first order kinetics (ข) Pseudo second order kinetics และ (ค) Intra-particle diffusion

ตารางที่ 4.6 จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซเดชัน-ดูดซับโดย K-OMS2 (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8

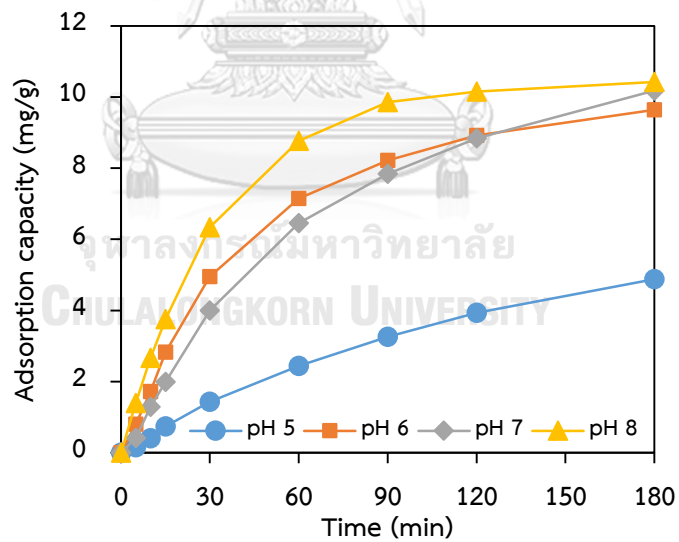
pH	Pseudo first order			Pseudo second order			Intra-particle diffusion		
	k_1 (1/min)	q_e (mg/g)	R^2	k^2 (g/mg·min)	q_e (mg/g)	R^2	k_{id} (mg/g·min ^{1/2})	C (mg/g)	R^2
5	0.0229	7.78	0.9827	0.0050	10.38	0.9950	0.6939	1.38	0.9401
6	0.0200	6.69	0.9479	0.0066	9.95	0.9938	0.6421	1.82	0.8906
7	0.0196	7.36	0.9780	0.0050	10.27	0.9941	0.6828	1.34	0.9446
8	0.0191	6.80	0.9632	0.0060	9.95	0.9967	0.6605	1.57	0.9189

4.3.3 Fe-BTC (coated) กับการดูดซับ As(V)

ผลการศึกษาดูดซับของ As(V) โดยใช้ Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 อุณหภูมิ 25°C แสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งพบความสัมพันธ์ของปริมาณ As(V) ที่ลดลงแตกต่างกันเปรียบเทียบกับค่า pH ต่างๆ โดยพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ที่ pH 5 6 7 และ 8 คงเหลือปริมาณ As(V) ในระบบเท่ากับ 54.16 9.79 4.74 และ 2.30% ตามลำดับ รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) As(V) บน Fe-BTC (coated) โดยเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ที่ pH 5 6 7 และ 8 มีค่าเท่ากับ 4.88 9.64 10.18 และ 10.42 mg/g ตามลำดับ จากค่าดังกล่าวทำให้ทราบว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ As(V) ของ Fe-BTC (coated) เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้าที่พบว่าเมื่อค่า pH สารละลายลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของ Fe-BTC ลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวเป็น Fe^{2+} และ Fe^{3+} มากขึ้น (Townsend, 1970, Cook and Olive, 2012) ทำให้ Fe-BTC เสื่อมสภาพ ที่ pH 5 ในขณะที่ pH 8 จะมี As(V) สปีชีส์ $AsO_3(OH)^{2-}$ เพิ่มมากขึ้น 90% จึงยึดเหนี่ยวกับ Fe-BTC ได้ดีด้วยแรงโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Corum, Abbaspour Tamijani and Mason, 2018, O'Day, 2006)



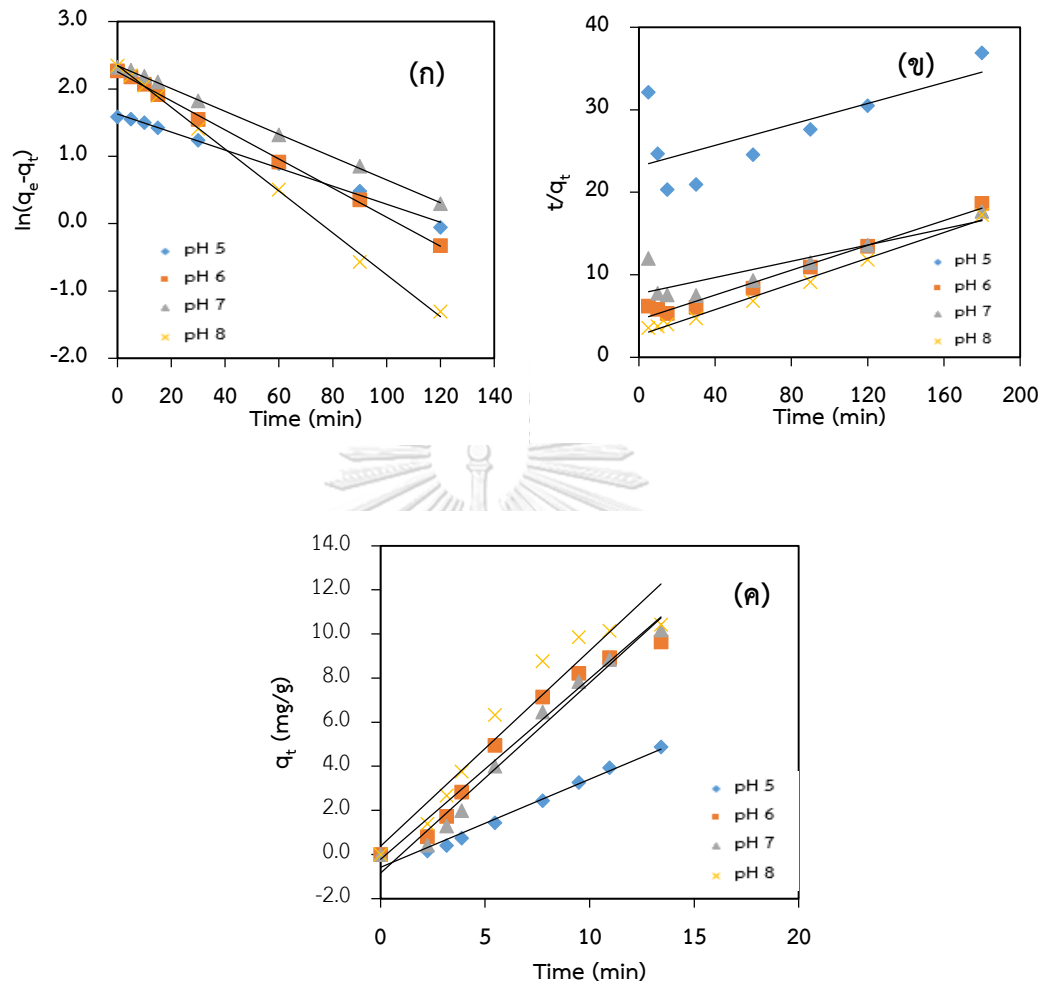
รูปที่ 4.26 การดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 5 mg/L Fe-BTC 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.27 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity) ของ Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8 (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 5 mg/L Fe-BTC 0.05 g/100 mL และอุณหภูมิ 25°C)

4.3.4 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated)

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) ดังแสดงในที่ 4.28 และตารางที่ 4.6 พบว่าค่า R^2 ของแบบจำลอง Pseudo first order kinetics มีค่ามากกว่า Pseudo second order kinetics ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสาร As(V) ที่ถูกดูดซับโดย Fe-BTC (coated) จึงเป็นแบบ Pseudo first order kinetics ซึ่งหมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะแปรผันไปตามเวลาของการดูดซับ โดยที่ pH 5 6 7 และ 8 มีค่าคงที่อัตราการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (K_1) เท่ากับ 0.0134 0.0216 0.0169 และ 0.0311 1/min ตามลำดับ และมีปริมาณสารที่ทำการดูดซับที่จุดสมดุล (q_e) เท่ากับ 5.10 9.53 10.44 และ 10.47 mg/g ตามลำดับ โดย K_1 และ q_e มีค่าสูงสุดที่ pH 8 ซึ่งเกิดจากการดูดซับด้วยแรงโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ (Corum, Abbaspour Tamijani and Mason, 2018, O'Day, 2006) และนอกจากนี้จากแบบจำลอง Intra-particle diffusion ของ As(V) บนพื้นผิว Fe-BTC (coated) ในรูปที่ 4.28(ค) ซึ่งอธิบายถึงกลไกของการดูดซับ พบว่ากราฟไม่ตัดไม่ผ่านจุดกำเนิด ซึ่งบ่งบอกถึงการแพร่ภายในอนุภาคไม่ได้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้าที่สุดในกลไกการเกิดปฏิกิริยา และไม่ได้เป็นการควบคุมการแพร่บริเวณขอบ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่า K_{id} ที่ค่า pH 5 6 7 8 เท่ากับ 0.3993 0.8195 0.8531 และ 0.8559 $\text{mg/g}\cdot\text{min}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่งที่ pH 8 มีอัตราคงที่ของการแพร่ภายในอนุภาคสูงสุด



รูปที่ 4.28 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ As(V) ที่ pH 5-8 โดย Fe-BTC (coated) ด้วยแบบจำลอง (ก) Pseudo first order kinetics (ข) Pseudo second order kinetics และ (ค) Intra-particle diffusion

ตารางที่ 4.7 จลนพลศาสตร์ของ As(V) ที่ถูกดูดซับโดย Fe-BTC (coated) ที่ pH 5 6 7 และ 8

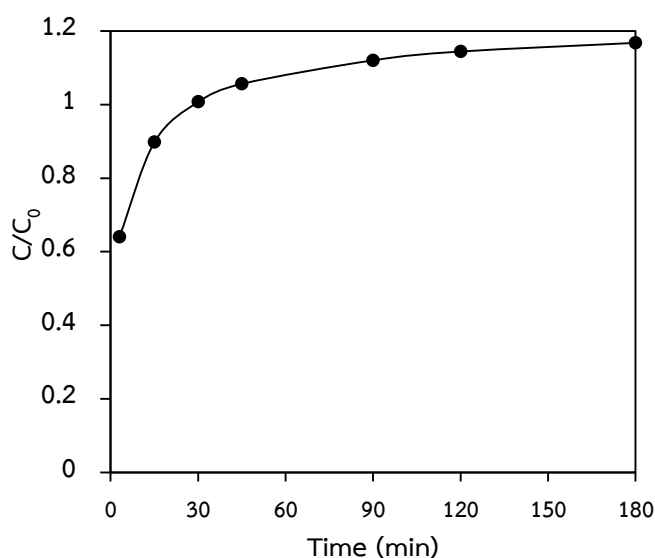
pH	Pseudo first order			Pseudo second order			Intra-particle diffusion		
	k_1 (1/min)	q_e (mg/g)	R^2	k^2 (g/mg·min)	q^e (mg/g)	R^2	k_{id} (mg/g·min ^{1/2})	C (mg/g)	R^2
5	0.0134	5.10	0.9936	0.0002	15.77	0.4776	0.3993	-0.58	0.9782
6	0.0216	9.53	0.9985	0.0012	13.33	0.9772	0.8195	-0.22	0.9600
7	0.0169	10.44	0.9993	0.0003	20.28	0.7365	0.8631	-0.85	0.9769
8	0.0311	10.47	0.9984	0.0023	12.85	0.9916	0.8859	-0.38	0.9289

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด As(III) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง

4.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated)

4.4.1.1 การศึกษาเบื้องต้น (Preliminary test)

ผลการศึกษาการออกซิเดชัน-ดูดซับ As(III) ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) จากการใช้ภาวะทดสอบ ได้แก่ สารละลาย NaAsO₂ 5 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 6 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm แสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งตรวจพบปริมาณ As(III) ตั้งแต่ในช่วงเวลาที่แรกที่เก็บตัวอย่าง และเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ยังพบว่ามีปริมาณ As(III) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น เนื่องจากระบบไม่สามารถทำหน้าที่ออกซิไดซ์ As(III) ได้หมด ดังนั้นภาวะทดสอบดังกล่าวจึงยังไม่มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในระบบการไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 4.29 กราฟเบรคทรูในหน่วย C/C_0 ของ As(III) ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(III) 5 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 5 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm)

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเคลือบและน้ำหนัก K-OMS2 (coated) ที่ใช้;

ฉะนั้น จะได้ปริมาณผง K-OMS2 ที่ใช้ = $(1.2927 \times 45.5038) / 100 = 0.5882$ g

จากผลการทดสอบแบบกะที่ pH 7 ปริมาณความจุการออกซิเดชัน-ดูดซับ เท่ากับ 9.4692 mg/g จากปริมาณผง K-OMS2 ที่มีในระบบ 0.5882 g;

ฉะนั้น ปริมาณการออกซิเดชัน-ดูดซับ As(III) ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ = $(9.4692 \times 0.5882) / 1 = 5.5802$ mg

K-OMS2 (coated) ความยาวเบด 10 cm ที่ pH 7 สามารถเปลี่ยน As(III) ให้เป็น As(V) และดูดซับ As(V) ไว้บางส่วน ได้เท่ากับ 5.5802 mg หากกำหนดให้ระบบมีอัตราการไหล 10 mL/min และใช้ความเข้มข้น As(III) เริ่มต้น 1 mg/L หรือเท่ากับ 0.01 mg As(III)/min;

ฉะนั้น จะใช้เวลาในการออกซิเดชัน-ดูดซับ As(III) ได้สูงสุด = $(1 \times 5.5802) / 0.01 = 558.02$ นาที

ดังนั้น เวลาที่ K-OMS2 (coated) ใช้ในการออกซิไดซ์-ดูดซับ As(III) สูงสุดเท่ากับ 558.02 นาที หรือ 9.30 ชั่วโมง การคำนวณดังกล่าวถูกใช้ในการคาดการณ์เวลาที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในระบบการไหลต่อเนื่องของ K-OMS2 (coated) โดยภาวะทดสอบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แสดงในตารางที่ 4.8

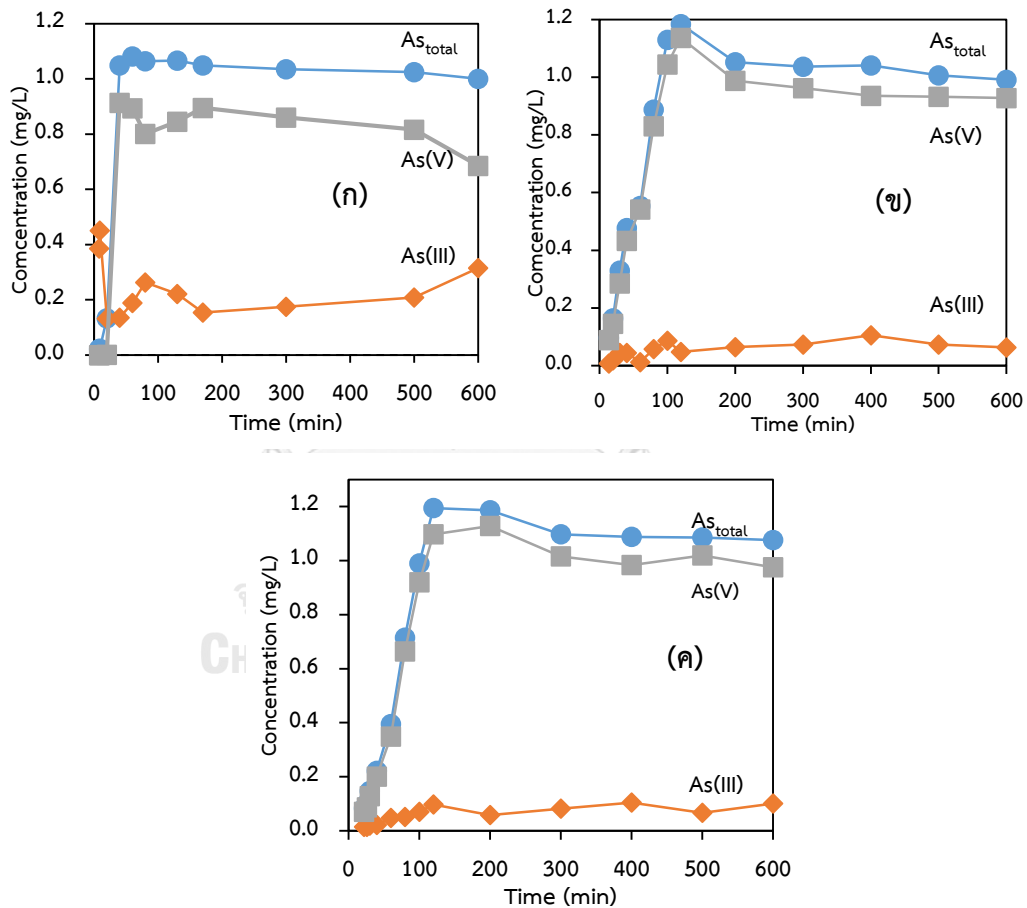
ตารางที่ 4.8 ภาวะทดสอบของคอลัมน์ K-OMS2 (coated)

Condition	Preliminary test	I	II	III
Flow rate (mL/min)	20	10	5	5
As(III) initial concentration (mg/L)	5	1	1	1
Inner diameter (cm)	2	2	2	2
Bed length (cm)	6	10	15	20
Bead weight (g)	30.4593	45.5038	72.3216	94.9543
% coating	1.35	1.29	0.98	0.97
Powder weight (g)	0.4112	0.5882	0.7096	0.9247
Residence time-calculated (min)	0.79	3.14	9.43	12.57
Residence time-measured (min)	-	1.90	4.50	5.75
Initial pH	5.2	7.0	7.0	7.0
Solution temperature (°C)	-	26.5	28.5	26.5

4.4.1.2 การศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated)

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องของคอลัมน์ K-OMS2 (coated) แสดงในตารางที่ 4.8 จากการศึกษาการออกซิไดซ์-ดูดซับของ As(III) ที่ pH 7 ในภาวะทดสอบ I (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min) ภาวะทดสอบ II (ความยาวเบด 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min) และภาวะทดสอบ III (ความยาวเบด 20 cm อัตราการไหล 5 mL/min) ดังแสดงในรูปที่ 4.30(ก-ค) ตามลำดับ พบว่าในช่วงแรกของการทดสอบพบ As(III) ออกมาจากระบบเล็กน้อย แต่ไม่พบปริมาณ As_{total} As(V) และ As(III) จากนั้นปริมาณ As(III) ค่อยๆ สูง และมีความแปรปรวนในช่วง 120 นาทีแรก แล้วเริ่มคงที่ โดยปริมาณ As(III) ที่ตรวจพบมีความสัมพันธ์กับปริมาณ As(V) ที่เกิดขึ้นตามเวลา เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ As(III) ที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ในคอลัมน์และหลุดออกมาพร้อมกับสารขาออก พบว่าภาวะทดสอบที่ I มีปริมาณ As(III) ออกมาสูงกว่าภาวะทดสอบที่ II และ III โดยภาวะทดสอบที่ II และ III จะมีปริมาณ As(III) ออกมาใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงคอลัมน์ทั้งสองภาวะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ As(III) ให้เป็น As(V) ไม่แตกต่างกันในช่วง 600 นาทีที่ทำการเก็บ

ตัวอย่าง อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การออกซิเดชัน-ดูดซับของภาวะทดสอบทั้งสามพบว่าภาวะทดสอบ I II และ III มีประสิทธิภาพการออกซิเดชัน-ดูดซับสูงสุดเท่ากับ 88.51 130.40 และ 114.91% ภายในเวลา 60 120 และ 200 นาที ตามลำดับ ซึ่งค่าที่มากกว่า 100% นั้นอาจเกิดจาก As(V) ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ As(III) ถูกดูดซับสะสมไว้บนพื้นผิวของ K-OMS2 (coated) ดังกลไกที่อธิบายโดย (Phanthasri et al., 2018) จากนั้น As(V) จึงหลุดออกในเวลา 120 และ 200 นาที ของภาวะทดสอบ II และ III ตามลำดับ ดังนั้น จากผลการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกใช้ภาวะทดสอบ II เป็นภาวะที่จะใช้งานต่อไป โดยภาวะทดสอบ II ใช้ความยาวเบตและปริมาณ K-OMS2 (coated) น้อยกว่าภาวะทดสอบ III แต่ให้ประสิทธิภาพการออกซิเดชัน-ดูดซับที่ไม่แตกต่างกัน

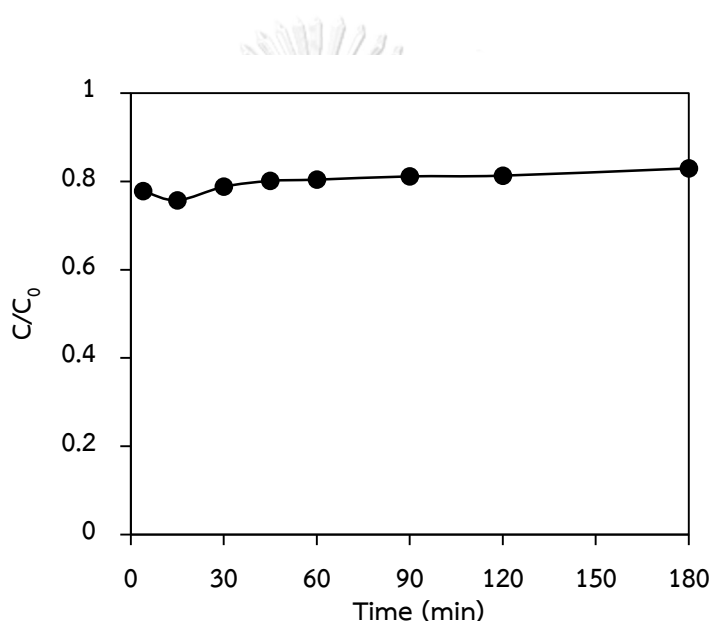


รูปที่ 4.30 กราฟเบรคทรูของ As(III) ที่คงเหลืออยู่ในระบบจากการออกซิเดชัน-ดูดซับโดย K-OMS2 (coated) และปริมาณ As(V) ที่เกิดขึ้น ที่ภาวะทดสอบ (ก) ความยาวเบต 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min (ข) ความยาวเบต 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min (ค) ความยาวเบต 20 cm อัตราการไหล 5 mL/min

4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพ Fe-BTC (coated)

4.4.2.1 การศึกษาเบื้องต้น

ผลการศึกษาการดูดซับ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) โดยใช้สารละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 3 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 6 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm แสดงในรูปที่ 4.31 ซึ่งตรวจพบปริมาณ As(V) มากตั้งแต่ในช่วงเวลาที่แรกที่เก็บตัวอย่าง และเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ยังคงพบปริมาณ As(V) มีค่าค่อนข้างคงที่จากช่วงเวลาเริ่มต้น แสดงถึง As(V) ที่เข้าไปในระบบไม่สามารถถูกดูดซับไว้ได้โดย Fe-BTC (coated) และหลุดออกมากับสารขาออกในที่สุด ดังนั้นภาวะทดสอบนี้ไม่มีความเหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 4.31 กราฟเบรคทรูในหน่วย C/C_0 ของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 3 mg/L อัตราการไหล 20 mL/min ความยาวเบด 5 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ 2 cm)

จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเคลือบและน้ำหนัก Fe-BTC (coated) ที่ใช้;

ฉะนั้น จะได้ปริมาณผง Fe-BTC ที่ใช้ $= (0.8600 \times 46.9570) / 100 = 0.4038$ g

จากผลการทดสอบแบบกะที่ pH 6 ปริมาณความจุการดูดซับ เท่ากับ 9.6431 mg/g จากปริมาณผง Fe-BTC ที่มีในระบบ 0.4038 g;

ฉะนั้น ปริมาณการดูดซับ As(V) ที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ $= (9.6431 \times 0.4038) / 1 = 3.8939$ mg

Fe-BTC (coated) ความยาวเบด 10 cm ที่ pH 6 สามารถดูดซับ As(V) ได้เท่ากับ 3.8939 mg หากกำหนดให้ระบบมีอัตราการไหล 10 mL/min และใช้ความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น 1 mg/L หรือเท่ากับ 0.01 mg As(V)/min;

ฉะนั้น จะใช้เวลาในการดูดซับ As(V) ได้สูงสุด = $(1 \times 3.8939) / 0.01 = 389.39$ นาที

ดังนั้น เวลาที่ Fe-BTC (coated) ใช้ในการดูดซับ As(V) สูงสุดเท่ากับ 389.39 นาที หรือ 6.49 ชั่วโมง การคำนวณดังกล่าวถูกใช้ในการคาดการณ์เวลาที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในระบบการไหลต่อเนื่องของ Fe-BTC (coated) โดยภาวะทดสอบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงในตารางที่ 4.9

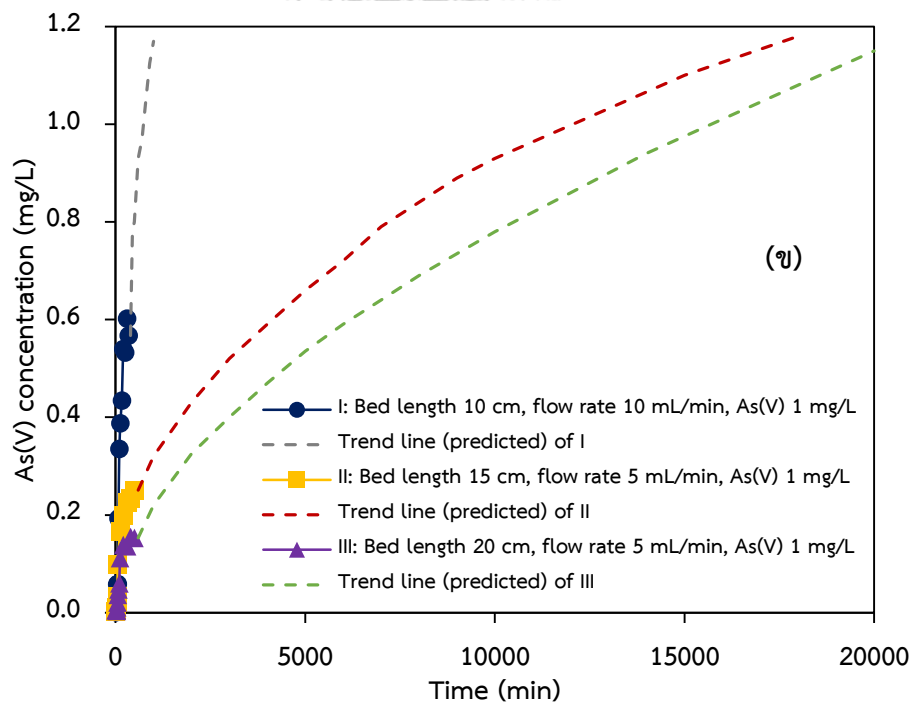
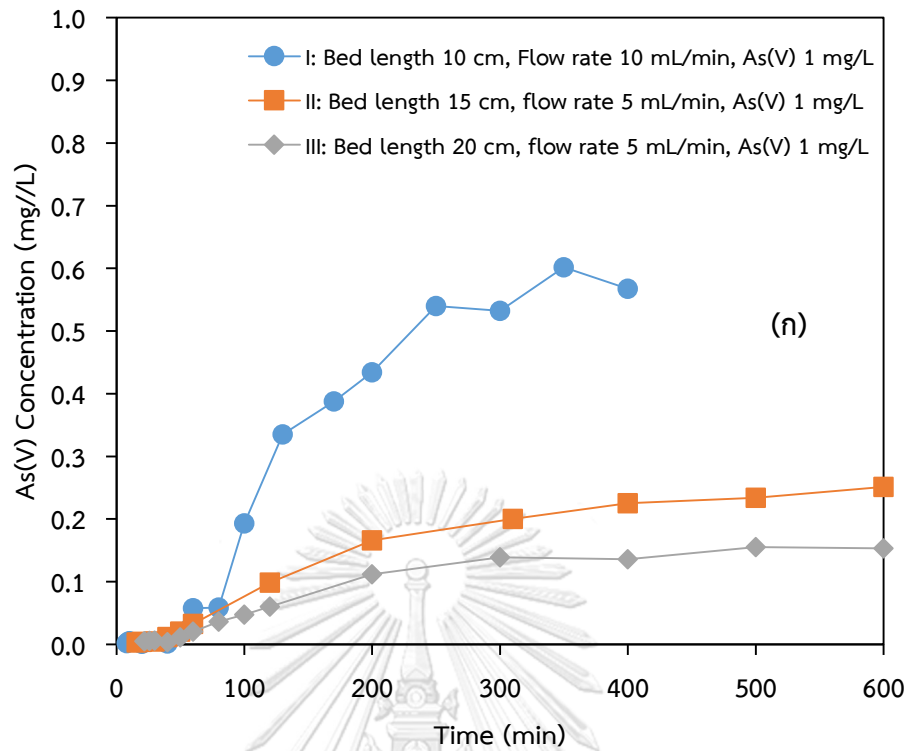
ตารางที่ 4.9 ภาวะทดสอบของคอลัมน์ Fe-BTC (coated)

Condition	Preliminary test	I	II	III	IV	V
Flow rate (mL/min)	20	10	5	5	20	10
As(V) initial concentration (mg/L)	5	1	1	1	2	2
Inner diameter (cm)	2	2	2	2	2	2
Bed length (cm)	6	10	15	20	10	10
Bead weight (g)	30.2563	46.9570	72.8353	97.2107	48.4001	49.8684
% coating	0.82	0.86	0.79	0.86	0.95	1.09
Powder weight (g)	0.2475	0.4038	0.5726	0.8380	0.4592	0.5416
Residence time-calculated (min)	0.79	3.1428	9.4286	12.5714	1.5714	3.1428
Residence time-measured (min)	-	2.93	4.33	5.43	0.78	1.58
Initial pH	5.2	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Solution temperature (°C)	-	26.0	29.0	28.0	28.0	29.0

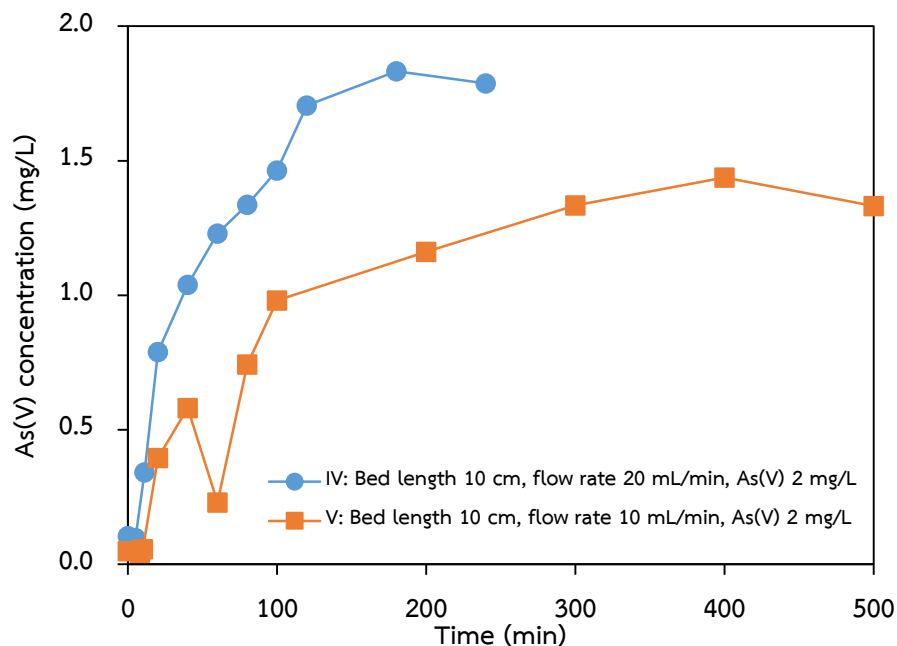
4.4.2.2 การศึกษาปัจจัยอื่นๆ ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated)

การศึกษาภาวะที่เหมาะสมภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องของคอลัมน์ Fe-BTC (coated) จากตารางที่ 4.9 และการศึกษาการดูดซับ As(V) ในภาวะทดสอบ I-V ดังแสดงในรูปที่ 4.32-4.33 พบว่า ภาวะทดสอบ I (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L) ภาวะทดสอบ II (ความยาวเบด 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L) และภาวะทดสอบ III (ความยาวเบด 20 cm อัตราการไหล 5 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L) มีปริมาณ As(V) ขาออกต่ำสุดในช่วงแรก จากนั้นภายใน 30-40 นาที ปริมาณ As(V) ขาออกค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น โดยภาวะทดสอบ I ให้กราฟเบรคทูล์ที่มีความชันสูงกว่าภาวะทดสอบ II และ III อย่างไรก็ตาม จากการเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 400 600 และ 600 นาที ตามลำดับ ยังไม่ได้กราฟเบรคทูล์ที่มีความเข้มข้น As(V) ขาออกเท่ากับความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับแบบจำลองจลนพลศาสตร์ได้ ดังนั้น จึงทำการคาดการณ์ปริมาณการดูดซับ As(V) จากการลากเส้นแนวโน้มต่อจากผลการทดสอบที่ได้จนความเข้มข้น As(V) ขาออกเท่ากับความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น และพบว่าจะใช้เวลาเบรคทูล์ 1,000 18,000 และ 20,000 นาที ตามลำดับ

สำหรับภาวะทดสอบ IV (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 20 mL/min และความเข้มข้น As(V) 2 mg/L) และภาวะทดสอบ V (ความยาวเบด 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 2 mg/L) เป็นภาวะที่เพิ่มอัตราการไหลและความเข้มข้น As(V) เริ่มต้นให้สูงขึ้น เพื่อเร่งเวลาการเบรคทูล์ให้เร็วขึ้นและสามารถติดตามจากการทดสอบจนได้ความเข้มข้น As(V) ขาออกเท่ากับหรือใกล้เคียงความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น โดยไม่มีการคาดการณ์จากเส้นแนวโน้ม ทั้งนี้ เพื่อจะได้นำข้อมูลที่แท้จริงจากการทดสอบไปคำนวณเพื่อหาจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม ซึ่งใช้เวลา 300 และ 600 นาที ตามลำดับ ในรูปที่ 4.33 พบว่าการเพิ่มอัตราการไหล และความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น ทำให้สามารถได้กราฟเบรคทูล์เป็นที่พบ S-curve ได้เร็วและชัดเจนมากขึ้น



รูปที่ 4.32 กราฟเบรคทรูของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ภาวะทดสอบ I II และ III (ก) ผลการทดสอบ และ (ข) ผลการทดสอบพร้อมเส้นแนวโน้มจากการคาดการณ์

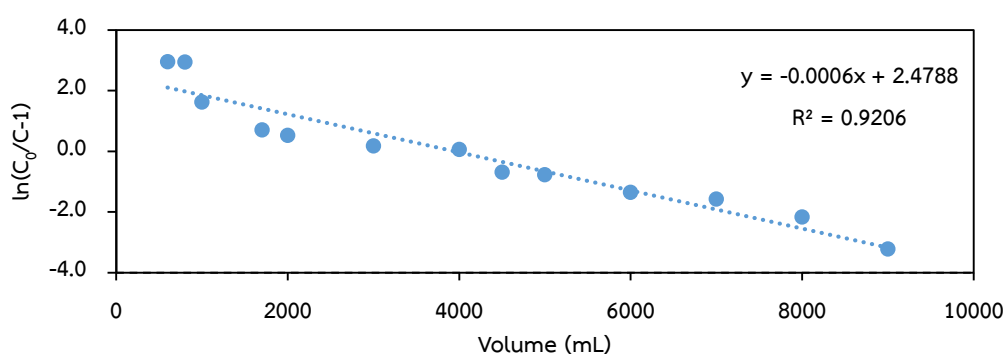


รูปที่ 4.33 กราฟเบรคทรูของ As(V) ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ที่ภาวะทดสอบ IV และ V

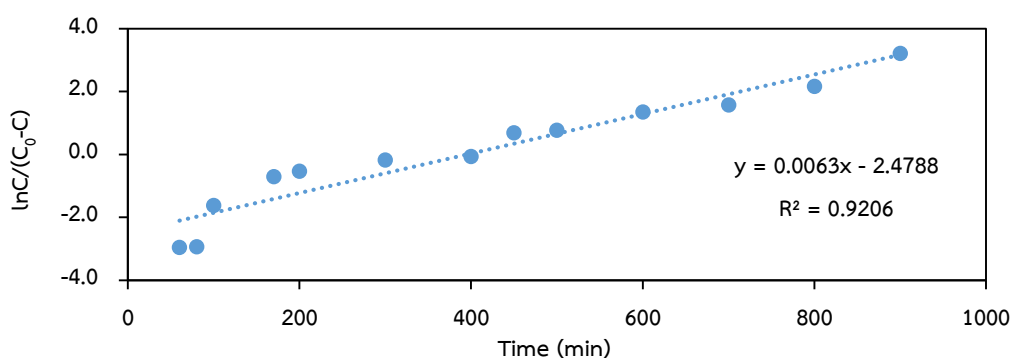
4.4.2.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Sorption kinetics)

ผลการศึกษการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) จากภาวะทดสอบ I-V เมื่อใช้แบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson เพื่อใช้อธิบายกลไกการเบรคทรูที่เกิดขึ้นและหาภาวะทดสอบที่เหมาะสมในการใช้งาน ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า ภาวะทดสอบ I มีค่า R^2 สูงสุดเท่ากับ 0.9206 และเท่ากันในทั้งสองแบบจำลอง (รูปที่ 4.34-4.35) เมื่อพิจารณาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) พบว่า S.D. ที่ได้จากแบบจำลอง Yoon-Nelson (1.6098%) มีค่าต่ำกว่า S.D. ที่ได้จากแบบจำลอง Thomas (13.662%) (Luekittisup et al., 2015) และเมื่อจำลองสถานการณ์ย้อนกลับตามสมการที่ได้จากแบบจำลอง Thomas และ Yoon-Nelson ในรูปที่ 4.36 พบว่ากราฟเบรคทรูที่ได้จากแบบจำลอง Yoon-Nelson มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่า กราฟเบรคทรูที่ได้จากแบบจำลองของ Thomas ดังนั้นแบบจำลอง Yoon-Nelson จึงสามารถใช้ อธิบายกลไกการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) ที่เกิดขึ้นในระบบการไหลต่อเนื่องได้เหมาะสมกว่า ซึ่งหมายถึงอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่อสัดส่วนการเบรคทรูเพิ่มขึ้นและพื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับลดลง (Luekittisup et al., 2015, Yagub et al., 2015) โดยในภาวะทดสอบ I นี้จะได้ค่าคงที่อัตรา Yoon-Nelson (K_{YN}) เท่ากับ 0.0063 และค่าปริมาณสารหนุที่ถูกดูดซับ (q_0) เท่ากับ 11.97 mg/g

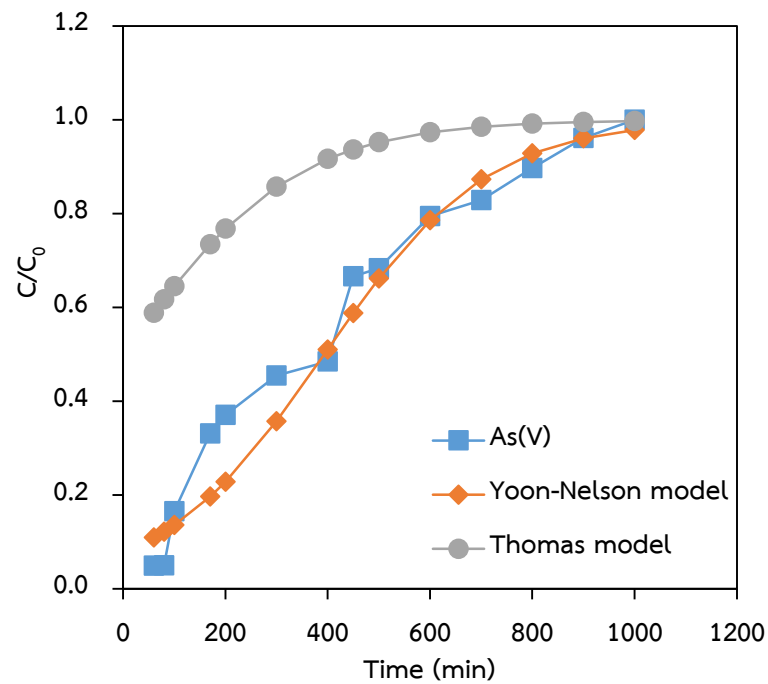
ตัวแปรที่ได้จากการพลอตกราฟสมการเส้นตรงโดยใช้แบบจำลอง Thomas และ Yoon-Nelson ภายใต้ภาวะทดสอบที่ I-V แสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อพิจารณาในทุกภาวะทดสอบโดยใช้ค่า S.D. ที่มีค่าต่ำกว่าเป็นเกณฑ์ พบว่าค่า S.D. จากแบบจำลอง Yoon-Nelson มีค่าต่ำกว่าค่า S.D. จากแบบจำลอง Thomas ในทั้งห้าภาวะทดสอบ ดังนั้นแบบจำลอง Yoon-Nelson จึงมีความเหมาะสมมากกว่า และเมื่อพิจารณาภาวะทดสอบโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูจากค่า q_0 พบว่าภาวะทดสอบที่ I II III IV และ V มีค่า q_0 เท่ากับ 11.40 52.60 42.89 17.60 และ 13.48 mg/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าที่ภาวะทดสอบ II มีค่า q_0 สูงสุด ดังนั้นจึงเลือกภาวะทดสอบดังกล่าวไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.34 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ I (ความยาวเบต 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L)



รูปที่ 4.35 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ I (ความยาวเบต 10 cm อัตราการไหล 10 mL/min และความเข้มข้น As(V) 1 mg/L)



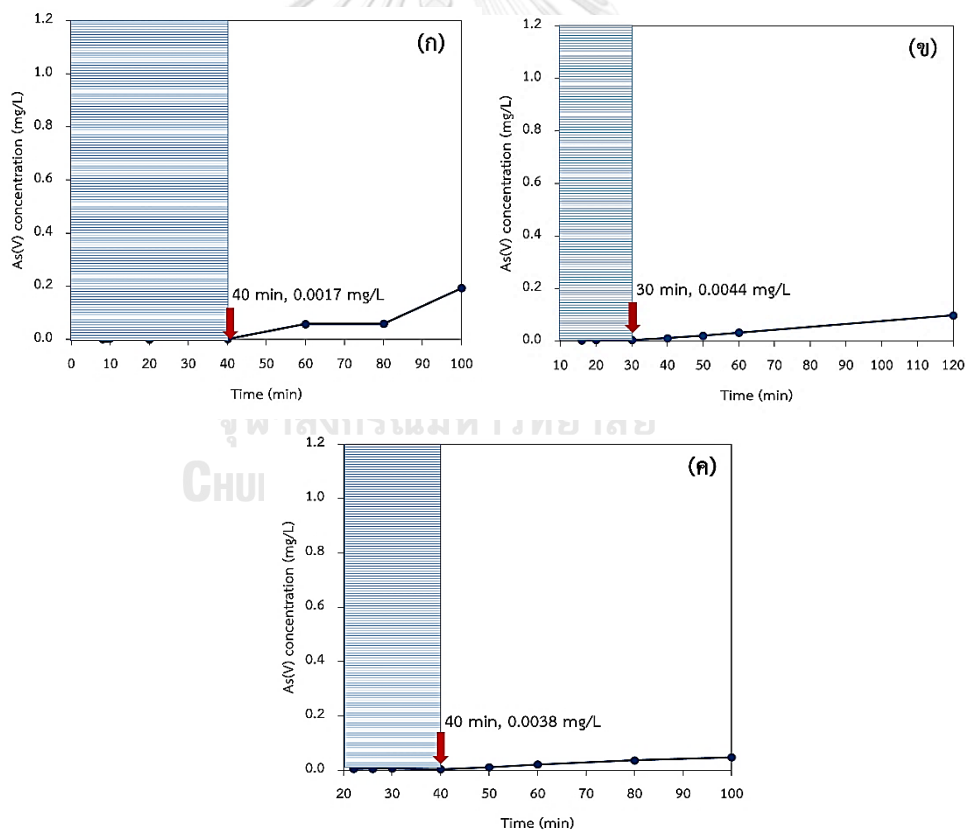
รูปที่ 4.36 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ I เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson ที่จำลองสถานการณ์ย้อนกลับ

ตารางที่ 4.10 ค่าคงที่อัตราและปริมาณ As(V) ที่ถูกดูดซับโดย Fe-BTC (coated) จากการใช้แบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson

Experimental condition	Thomas model				Yoon-Nelson model				
	K_T (mL/min/mg)	q_0 (mg/g)	S.D. (%)	R^2	K_{YN} (1/min)	τ (min)	q_0 (mg/g)	S.D. (%)	R^2
I	0.0051	11.97	13.6624	0.9206	0.0063	393.4603	11.40	1.6098	0.9206
II	0.0003	60.12	30.6721	0.8704	0.0004	5081.2500	52.60	6.2253	0.8704
III	0.0003	49.01	13.6582	0.7990	0.0004	6185.7500	42.89	1.5999	0.7990
IV	0.0030	16.34	32.8573	0.6400	0.0065	404.9846	17.60	3.4066	0.6400
V	0.0060	13.10	13.3957	0.6903	0.0136	133.6912	13.48	3.0008	0.6903

4.4.2.4 ความจุทะลุ

การศึกษาความจุทะลุของภาวะทดสอบ I-V พบว่า ภาวะทดสอบ I II และ III สามารถบำบัดสารหนูไม่ให้เกินมาตรฐานน้ำใต้ดิน ($[As] < 0.01 \text{ mg/L}$ (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543)) ได้ในเวลา 40 30 และ 40 นาทีแรก ตามลำดับ ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.37 (ก-ค) และเมื่อหาความจุทะลุของทั้ง 3 สภาวะการทดสอบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.16 0.31 และ 0.28 mg/g ตามลำดับ การคำนวณหาค่าความจุทะลุ แสดงในตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาผลการคำนวณความจุทะลุทำให้ทราบว่า ภาวะทดสอบ I มีประสิทธิภาพในการกำจัด As(V) มากที่สุด แต่เนื่องจากการหาความจุทะลุเพียงช่วงแรกของการบำบัด ดังนั้นการเลือกภาวะทดสอบ II ในการทดสอบในระบบการไหลต่อเนื่องโดยอาศัยแบบจำลอง Yoon-Nelson จึงมีความเหมาะสมมากกว่า และยังสามารถคาดการณ์ประสิทธิภาพการกำจัด As(V) ได้ทั้งระบบ อย่างไรก็ตาม ภาวะทดสอบ IV และ V มีค่าสารหนูเกินมาตรฐานตั้งแต่ในช่วงแรกที่เก็บตัวอย่างสารขาออก



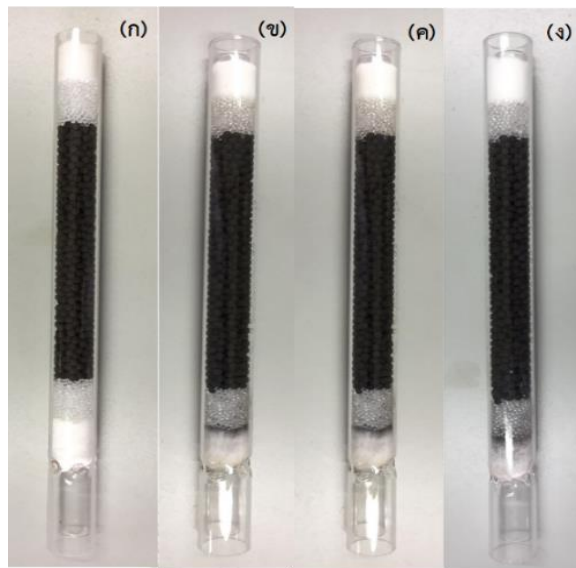
รูปที่ 4.37 ความจุทะลุของ (ก) ภาวะทดสอบ I (ข) ภาวะทดสอบ II และ (ค) ภาวะทดสอบ III

ตารางที่ 4.11 ความจุทะลุจากการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) ในภาวะทดสอบ I II และ III

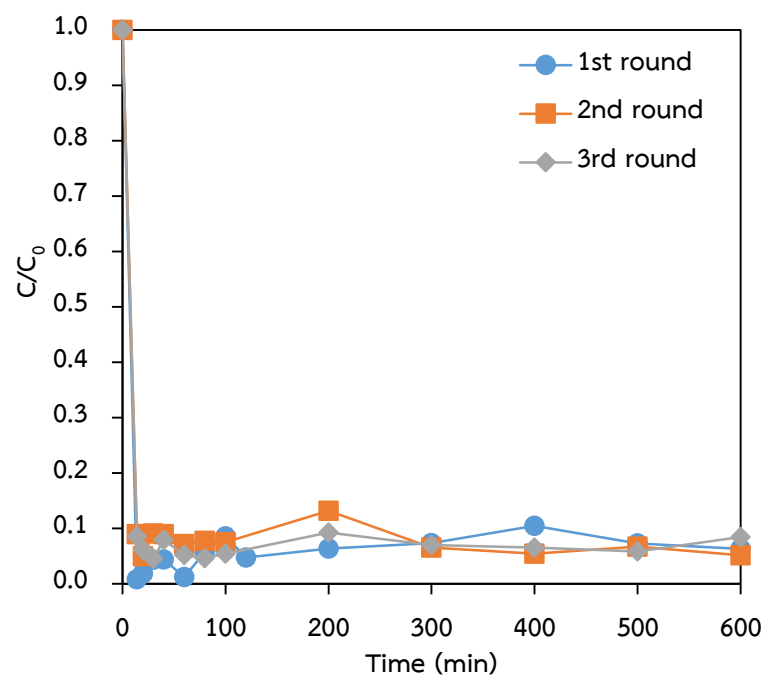
Condition	C ₀ (mg/L)	Breakthrough time (min)	Flow rate (mL/min)	Adsorbent weight (g)	Breakthrough capacity (mg/g)
I	1.17	40	10	0.4038	1.1590
II	1.1855	30	5	0.5726	0.3106
III	1.1620	40	5	0.8389	0.2773

4.4.3 จำนวนรอบของการใช้ซ้ำ (Reuse cycle number)

จากการศึกษาการออกซิเดชัน-ดูดซับ ของ As(III) โดย K-OMS2 (coated) ภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง พบว่าภาวะทดสอบ II (ความยาวเบด 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min ความเข้มข้น As(III) 1 mg/L) เป็นภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงได้นำภาวะดังกล่าวมาทดสอบประสิทธิภาพในการใช้ซ้ำ รูปที่ 4.38 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะ K-OMS2 (coated) ภายในคอลัมน์ ซึ่งผ่านการใช้งาน 3 รอบๆ ละ 600 นาที เปรียบเทียบกับคอลัมน์ก่อนการใช้งาน (รูปที่ 4.38(ก)) ซึ่งพบว่าการใช้งานในรอบที่ 1 และ 2 (รูปที่ 4.38(ข-ค)) K-OMS2 (coated) มีลักษณะพื้นผิวเรียบอย่างชัดเจน ใกล้เคียงกับ K-OMS2 (coated) ในคอลัมน์ก่อนการใช้งาน แต่เมื่อผ่านการใช้งานในรอบที่ 3 จะสังเกตเห็นพื้นผิวสีขาวของเม็ดเซรามิกอย่างชัดเจนในบางส่วนของคอลัมน์ เนื่องมาจากการหลุดของผง K-OMS2 บริเวณพื้นผิว และเมื่อนำมาศึกษาจำนวนรอบของการใช้ซ้ำ จำนวน 3 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.39 พบว่าคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ภายใต้ภาวะทดสอบ II สามารถใช้ซ้ำได้โดยยังคงประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ As(III) ได้ดีและมีความคงที่ตลอดการทดสอบในระบบ



รูปที่ 4.38 ลักษณะคอลัมน์ K-OMS2 (coated) เมื่อ (ก) ยังไม่ผ่านการใช้งาน (ข) ผ่านการใช้ซ้ำ 1 รอบ (ค) ผ่านการใช้ซ้ำ 2 รอบ และ (ง) ผ่านการใช้ซ้ำ 3 รอบ



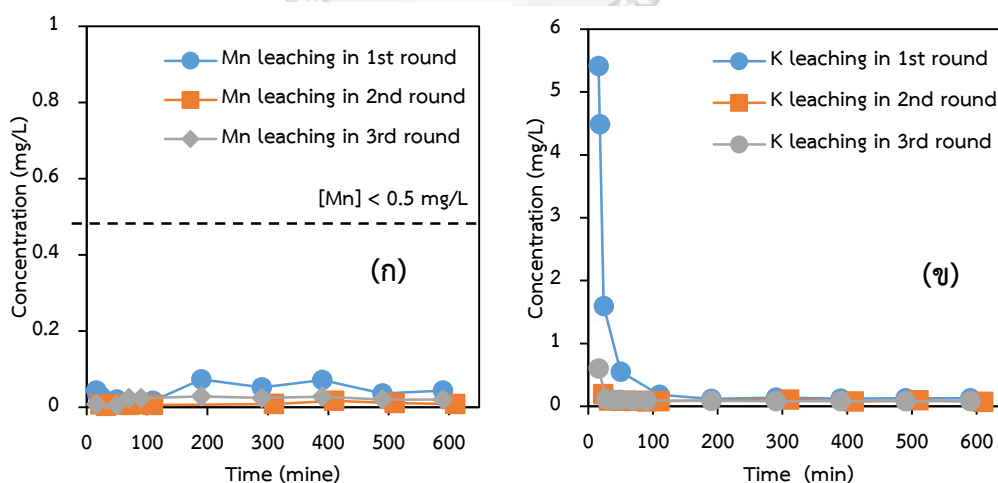
รูปที่ 4.39 C/C_0 ของคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ภายใต้ภาวะทดสอบ II ที่มีการใช้งานซ้ำจำนวน 3 รอบ

4.4.4 การชะละลายของ Mn K และ Fe

4.4.4.1 การชะละลายของ Mn และ K ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated)

การทดสอบการชะละลายของ Mn และ K จากการใช้งานคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ซ้ำจำนวน 3 รอบๆ ละ 600 นาที ภายใต้ภาวะทดสอบ II ในระบบการไหลต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 4.40 เมื่อพิจารณาการชะละลายของ Mn ในรูปที่ 4.40(ก) พบว่ามีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ Mn ในน้ำใต้ดิน ($[Mn] < 0.5 \text{ mg/L}$) (คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2543) ตลอดการทดสอบทั้ง 3 รอบ โดยการชะละลายของ Mn ในซ้ำ 1 มีค่าสูงกว่า (0.01-0.07 mg/L) ซ้ำ 2 (0.00-0.02 mg/L) และ 3 (0.00-0.03 mg/L) ซึ่งที่ซ้ำ 2 และ 3 จะพบชะละลายของ Mn ในอัตราที่ต่ำและค่อนข้างคงที่

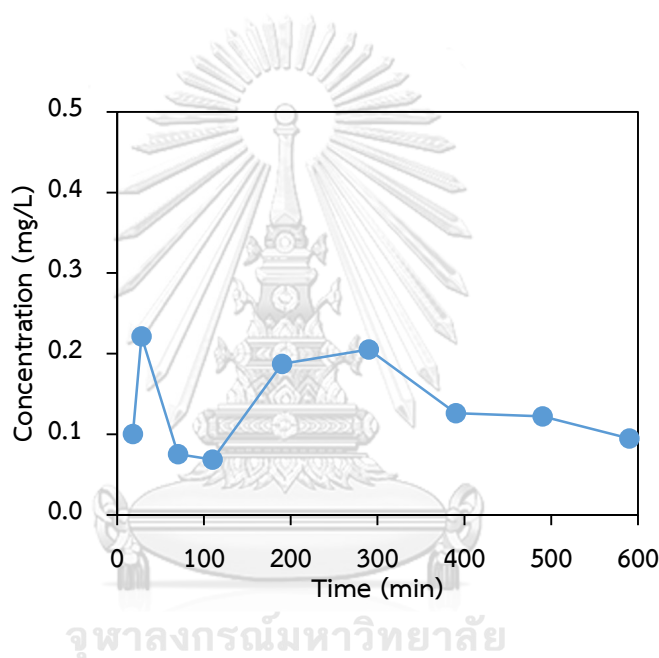
สำหรับการชะละลายของ K แสดงในรูปที่ 4.40(ข) พบว่าการชะละลายในซ้ำ 1 มีปริมาณค่อนข้างสูงในช่วงเริ่มต้นจนถึง 110 นาที (0.55-5.42 mg/L) หลังจากนั้นการชะละลายของ K จึงลดลงจนค่อนข้างคงที่ ในขณะที่การชะละลายของ K ในซ้ำ 2 และ 3 มีปริมาณน้อยและไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้ในมาตรฐานในน้ำใต้ดินไม่มีการระบุความเข้มข้นของ K ไว้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการชะละลายของ Mn และ K พบว่าการชะละลายของ K มีค่าสูงกว่า Mn ในทุกรอบของการซ้ำ เนื่องจากลักษณะการอยู่ของ Mn และ K ในโครงสร้างของ K-OMS2 มีความแตกต่างกัน โดย Mn จะทำพันธะโคเวเลนต์เมทัลลอกซิเจนกับ O ซึ่งมีความแข็งแรง ในขณะที่ K จะอยู่ในโพรงที่เป็นช่องว่างของโครงสร้างจึงมีแรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนกว่าและหลุดออกมาได้ง่ายกว่า (Fischel et al., 2015, Sriskandakumar et al., 2009, Wang et al., 2015)



รูปที่ 4.40 การชะละลายของ (ก) Mn และ (ข) K จากการใช้คอลัมน์ K-OMS2 (coated) ในภาวะทดสอบ II

4.4.4.2 การชะละลายของ Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated)

การทดสอบการชะละลายของ Fe จากการใช้งานคอลัมน์ Fe-BTC (coated) จำนวน 1 รอบเป็นเวลา 600 นาที ภายใต้ภาวะทดสอบ II ในระบบการไหลต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 4.41 พบปริมาณการชะละลายอยู่ในช่วง 0.07-0.20 mg/L ทั้งนี้ในมาตรฐานในน้ำใต้ดินไม่มีการระบุความเข้มข้นของ Fe ไว้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก Fe-BTC (coated) ทำหน้าที่ในการดูดซับซึ่งจะมีพื้นที่ที่ใช้ในการดูดซับลดลงหรือหมดลง และจะไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้จนกว่าจะมีการ Regeneration การทดสอบการชะละลายของ Fe การใช้งานคอลัมน์ Fe-BTC (coated) จึงทำการทดสอบเพียงรอบเดียว



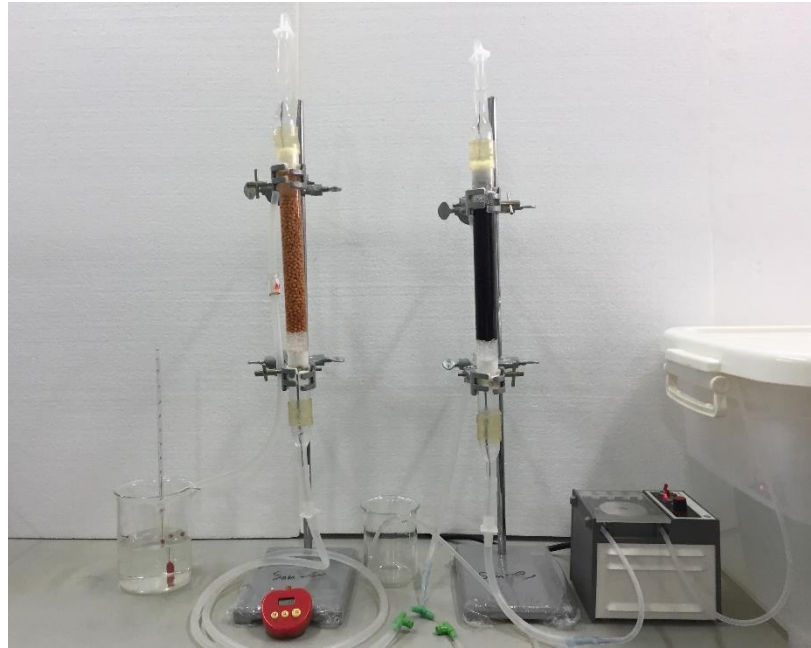
รูปที่ 4.41 การชะละลายของ Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) ในภาวะการทดสอบ II

4.4.5 การทดสอบประสิทธิภาพ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) พร้อมกัน ในระบบการไหลต่อเนื่อง

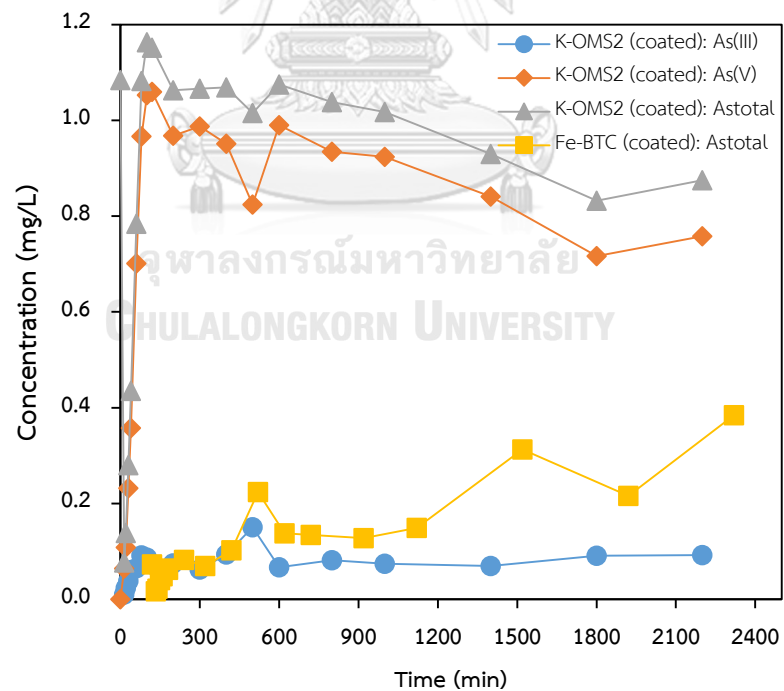
จากการหาภาวะทดสอบภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องที่เหมาะสมของคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ซึ่งพบว่าที่ภาวะทดสอบ II (ความยาวเบด 15 cm อัตราการไหล 5 mL/min ความเข้มข้น As(III) เริ่มต้น 1 mg/L) มีความเหมาะสมที่สุด จึงใช้ภาวะทดสอบดังกล่าวมาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด As_{total} จาก As (III) เริ่มต้น เมื่อต่อคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เข้าด้วยกันในระบบการไหลต่อเนื่อง ลักษณะการต่อทั้งสองคอลัมน์เข้าด้วยกัน แสดงในรูปที่ 4.42

ผลการศึกษาโดยใช้สภาวะดังกล่าว ที่ pH เริ่มต้น 7 อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 2,200 นาที พบว่าคอลัมน์แรกซึ่งได้แก่ K-OMS2 (coated) มีปริมาณ As(III) ที่ลดลงและมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจาก 120 นาที และยังสามารถในการเปลี่ยน As(III) ให้เป็น As(V) ได้ระดับหนึ่ง ซึ่งตรงกับผลการศึกษาแบบคอลัมน์ K-OMS2 (coated) เดี่ยว ในภาวะทดสอบ II ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ผลการทดสอบครั้งนั้นถูกนำมาใช้ในการคาดการณ์และออกแบบการทดสอบในการต่อทั้งสองคอลัมน์เข้าด้วยกัน เมื่อภาวะการทำงานของคอลัมน์ K-OMS2 (coated) มีความคงที่หลังจาก 120 นาทีผ่านไป จะพบ As(III) ที่เป็นสารขาเข้าถูกออกซิไดซ์โดย K-OMS2 (coated) เปลี่ยนเป็น As(V) มากกว่า 95% ในขาออก จึงทำการต่อสารขาออกของคอลัมน์แรกเข้ากับคอลัมน์ที่สองซึ่งได้แก่ Fe-BTC (coated) เพื่อให้ Fe-BTC (coated) ทำหน้าที่ดูดซับ As(V) ต่อไป และติดตามสารขาออกของคอลัมน์ที่สองเป็นปริมาณ As_{total} ที่ทั้งระบบสามารถบำบัดได้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.43 โดยพบว่าการต่อทั้งสอง คอลัมน์เข้าด้วยกันเพื่อบำบัด As(III) มีความเป็นไปได้ และพบ As_{total} ที่ค่อยๆ เบรคทรูออกมาจากคอลัมน์ที่สอง นอกจากนี้ผลการติดตาม pH ของสารละลายในระบบในช่วงเวลา 2,200 นาที พบว่า pH ของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ K-OMS2 มีค่าใกล้เคียงกับ pH เริ่มต้น (pH 7) และ pH ของสารละลายที่ออกจากคอลัมน์ Fe-BTC (coated) มีค่าประมาณ 5.5 ซึ่งอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ As(V) บน Fe-BTC (coated) ลดลง

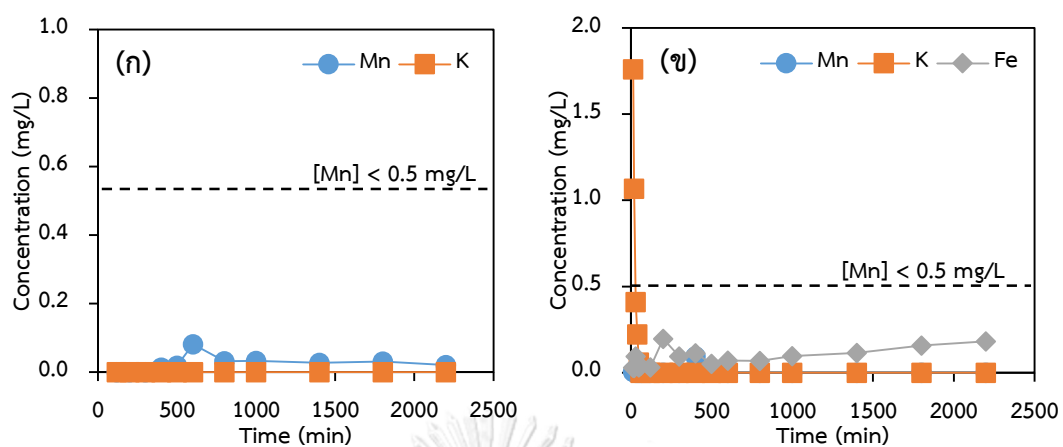
รูปที่ 4.44(ก) แสดงปริมาณการชะละลายของ Mn และ K จากคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ซึ่งพบว่ามีปริมาณ Mn ถูกชะละลายเล็กน้อย และไม่พบการชะละลายของ K รูปที่ 4.44(ข) แสดงปริมาณการชะละลายของ Mn K และ Fe จากคอลัมน์ Fe-BTC (coated) พบว่ามีปริมาณ K ถูกชะละลายในปริมาณมากในช่วง 40 นาทีแรก (0.06-1.76 mg/L) เนื่องจากลักษณะการอยู่ของ K ในโครงสร้างทำให้สามารถหลุดได้ง่ายจากคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และถูกตรวจพบที่สารขาออกคอลัมน์ Fe-BTC (coated) หลังจาก 40 นาทีจึงไม่พบการชะละลายของ K อีก ในขณะที่ Mn พบในปริมาณที่ไม่แตกต่างจากสารขาออกในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) นอกจากนี้ยังพบว่า Fe ถูกชะละลายออกมาในปริมาณน้อย เนื่องจากมีโครงสร้างที่ยึดเกาะกับ BTC ด้วยพันธะโคออดิเนตโควาเลนต์ที่แข็งแรง (Shahid and Nijmeijer, 2014)



รูปที่ 4.42 ลักษณะการต่อคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เข้าด้วยกันเพื่อใช้ใน
ภาวะทดสอบ II



รูปที่ 4.43 กราฟเบรคทรูของ As(III) As(V) และ Astotal เมื่อต่อคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) เข้าด้วยกันภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องในภาวะทดสอบ II



รูปที่ 4.44 การชะละลายของ (ก) Mn และ K ในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และการชะละลายของ (ข) Mn K Fe ในคอลัมน์ Fe-BTC (coated) จากการต่อคอลัมน์ทั้งสองเข้าด้วยกันภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องในภาวะทดสอบ II

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- การขึ้นรูปวัสดุรูพรุนแมงกานีสออกไซด์ (Manganese oxide octahedral molecular sieve ชนิด K-OMS2) และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ (Iron-based metal-organic framework ชนิด Fe-BTC) บนเม็ดเซรามิก ทำได้สำเร็จเป็นครั้งแรกผ่านเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล โดยใช้ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- อัตราส่วนของการเคลือบ K-OMS2:เม็ดเซรามิก และ Fe-BTC:เม็ดเซรามิกที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ 1:10 1:50 และ 1:100 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM/EDS และ Micro-XRF พบว่า อัตราส่วนการเคลือบ 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

- การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ Nitrogen adsorption-desorption isotherm พบว่า เฟสของ K-OMS2 และ Fe-BTC เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการขึ้นรูปโดยพบเฟส Cryptomelane Manganese dioxide และ Corundum ซึ่งเป็นของเม็ดเซรามิกที่ใช้เป็นวัสดุรองรับ และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเหลือ $0.517 \text{ m}^2/\text{g}$ สำหรับ K-OMS2 (coated) และ $0.000 \text{ m}^2/\text{g}$ สำหรับ Fe-BTC (coated)

- การหาประจุที่ผิว พบว่าสารทั้งสองชนิดมีประจุที่ผิวเป็นลบที่ pH 6-8 และเข้าสู่ภาวะสมดุลภายใน 24 ชั่วโมง โดยมีค่า $\text{pH}_{\text{pzc}} = 5$

- ผลการทดสอบการออกซิไดซ์ As(III) โดย K-OMS2 (coated) และการดูดซับ As(V) โดย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 5-8 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ $\text{pH } 5 > 7 > 6 > 8$ และ $8 > 7 > 6 > 5$ ตามลำดับ และมีจลนพลศาสตร์เป็นแบบ Pseudo second order และ Pseudo first order ตามลำดับ

- การทดสอบภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่อง พบว่าการขึ้นรูปด้วยการเคลือบ K-OMS2 และ Fe-BTC บนเม็ดเซรามิกมีความเป็นไปได้ในการใช้งานโดยภาวะทดสอบเหมาะสมได้แก่ ภาวะที่ II (ความเข้มข้นเริ่มต้น As(V) 1 mg/L ความยาวเบด 15 cm และอัตราการไหล 5 mL/min) ในทั้ง 2 คอลัมน์

- การศึกษาที่ละคอลัมน์ K-OMS2 (coated) ยังคงมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ As(III) เมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ 3 ครั้ง และมีการชะละลายของ Mn ที่ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำใต้ดิน (0.5 mg/L) สำหรับการชะละลายสูงสุดของ K มีค่าประมาณ 5.4 mg/L

- Fe-BTC (coated) มีจลนพลศาสตร์การดูดซับเข้ากับแบบจำลองยูนิ-เนลสัน ที่มี q_0 สูงที่สุด เท่ากับ 52.60 mg/g ($R^2 = 0.8704$ และ S.D. = 6.2253) และมีการชะละลายของ Fe ไม่เกิน 0.23 mg/L นอกจากนี้ความจุทะลุของภาวะทดสอบ I II และ III สามารถบำบัดสารหนูไม่ให้เกินมาตรฐาน (0.01 mg/L) ได้ในเวลา 40 30 และ 40 นาทีแรก ตามลำดับ ซึ่งมีค่า Breakthrough capacity เท่ากับ 1.16 0.31 และ 0.28 mg/g ตามลำดับ

- การศึกษาโดยการต่อทั้ง 2 คอลัมน์เข้าด้วยกัน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 2,200 นาที ระบบยังสามารถบำบัด As_{total} ได้ประมาณ 60% และมีการชะละลายของ Mn K และ Fe ต่ำ และมี pH ขาออกเท่ากับ 5.5

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การเคลือบผงวัสดุรูพรุนบนวัสดุทรงกลมแม่แบบด้วยการเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกล อาจส่งผลต่อโครงสร้าง สมบัติทางกายภาพและเคมี รวมทั้งประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุหลังการขึ้นรูป จากการศึกษาครั้งนี้ถึงแม้จะใช้วัสดุรูพรุนที่มีความเสถียรและแข็งแรง อย่าง K-OMS2 ที่มีโครงสร้างเป็นแท่งขนาดนาโน และ Fe-BTC ที่เป็นโครงข่ายโลหะ-อินทรีย์ ผลการทดสอบหลังจากขึ้นรูปนั้นพบว่า สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุเช่น เฟส พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุน มีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงของวัสดุ ดังนั้นปัจจัยที่ควรคำนึงถึงเมื่อนำเทคนิคการเขย่าหมุนรอบเชิงกลไปใช้ได้แก่

- ชนิด โครงสร้าง และสมบัติของวัสดุที่จะขึ้นรูป
- ชนิด สมบัติ รูปทรง และขนาดของวัสดุแม่แบบ
- ความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการเคลือบ
- การใช้สารประสาน
- การอบหรือเผาสารหลังการเคลือบ

- K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) จากการศึกษาที่มีการแยกการบรรจุในคอลัมน์ ทั้งนี้เพื่อรักษาสมบัติและอายุการใช้งานของวัสดุทั้งสองซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นหากจะมีการรวม K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ไว้ในคอลัมน์เดียวกัน หรือจะทำการขึ้นรูป K-OMS2 และ Fe-BTC ไว้ด้วยกันบนวัสดุแม่แบบ นั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม และคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการศึกษาและแนวทางการใช้งานประกอบ

- การทดสอบภายใต้ระบบการไหลต่อเนื่องครั้งนี้ พบว่า สภาวะที่ II ได้แก่ การใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น $As(V)$ 1 mg/L ความยาวเบด 15 cm และอัตราการไหล 5 mL/min เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดทั้งในคอลัมน์ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) อย่างไรก็ตาม หากการศึกษาไม่มี

ข้อจำกัดด้านเวลาและการใช้เครื่องวิเคราะห์ (ICP-OES) จะสามารถหาสถานะการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าความจุทะลุที่ดีกว่านี้หรือดีที่สุดและใช้ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ให้เต็มประสิทธิภาพได้ นอกจากนี้ หากมีความสนใจจะใช้งาน K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated) ในระบบการไหลต่อเนื่องอย่างที่มีประสิทธิภาพควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่

- ขนาดของ K-OMS2 (coated) และ Fe-BTC (coated)
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความยาว และจำนวนคอลัมน์
- อัตราการไหล และความเข้มข้นของสารที่ต้องการบำบัด
- pH และอุณหภูมิ ของสารขาเข้าและออก
- สารอินทรีย์ โลหะ และไอออนอื่นๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของ K-OMS2 (coated)

และ Fe-BTC (coated)

- สภาพของน้ำต้องการหลังการบำบัด

- การศึกษานี้พบว่า การดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) ในระบบการไหลต่อเนื่องมีจลนพลศาสตร์การดูดซับเข้ากับแบบจำลองยูน-เนลสัน ภายใต้ภาวะทดสอบ II ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสม มีค่า $R^2 = 0.8704$ และ $S.D. = 6.2253$ นั้น โดยสมการที่ได้จากแบบจำลองยูน-เนลสันสามารถนำไปใช้ในการคาดการณ์ประสิทธิภาพการบำบัดต่อไปได้ หากมีปัจจัยอื่นๆ เปลี่ยนแปลงภายในระบบ เช่น ความเข้มข้นของสารขาเข้า อัตราการไหล หรือปริมาณ Fe-BTC ที่ใช้ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- Adams, I., F.W, A., Hassan, L. G., S.A, M. and H.U, I. (2010). Intraparticle Diffusion and Intraparticulate Diffusivities of Herbicide on Derived Activated Carbon. 2: 74-86.
- Addiego, W. P., Liu, W. and Boger, T. (2001). Iron oxide-based honeycomb catalysts for the dehydrogenation of ethylbenzene to styrene. Catalysis Today 69: 25-31.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Arsenic [online]. 2007 Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=22&tid=3> [20 January 2018]
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. ATSDR's Substance Priority List [online]. 2017 Available from: <https://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html> [15 December 2017]
- Akhtar, F., Andersson, L., Ogunwumi, S., Hedin, N. and Bergström, L. (2014). Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders. Journal of the European Ceramic Society 34: 1643-1666.
- Akpomie, K. G. and Dawodu, F. A. (2016). Acid-modified montmorillonite for sorption of heavy metals from automobile effluent. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences 5: 1-12.
- Babaeivelni, K. and Khodadoust, A. P. (2016). Removal of arsenic from water using manganese (III) oxide: Adsorption of As(III) and As(V). J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng 51: 277-288.
- Babu, K. F. et al. (2010). Electrocatalytic activity of Basolite™ F300 metal-organic-framework structures. Electrochemistry Communications 12: 632-635.
- Balasubramanian, N. and Madhavan, K. (2001). Arsenic Removal from Industrial Effluent through Electrocoagulation. Chemical Engineering & Technology 24: 519-521.

- Baldovino-Medrano, V. G. et al. (2015). Role of shaping in the preparation of heterogeneous catalysts: Tableting and slip-casting of oxidation catalysts. Catalysis Today 246: 81-91.
- Banerjee, S. and Chattopadhyaya, M. C. (2017). Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product. Arabian Journal of Chemistry 10: S1629-S1638.
- Begerow, J., Dunemann, L. and Sur, R. (2012). Arsenic species (As(III), As(V), monomethylarsonic acid, dimethylarsinic acid) [Biomonitoring Methods, 2000]. 7, The MAK Collection for Occupational Health and Safety: 97-117.
- Bissen, M., Vieillard-Baron, M.-M., Schindelin, A. J. and Frimmel, F. H. (2001). TiO₂-catalyzed photooxidation of arsenite to arsenate in aqueous samples. Chemosphere 44: 751-757.
- Chaudhry, S. A., Zaidi, Z. and Siddiqui, S. I. (2017). Isotherm, kinetic and thermodynamics of arsenic adsorption onto Iron-Zirconium Binary Oxide-Coated Sand (IZBOCS): gling and process optimization. Journal of Molecular Liquids 229: 230-240.
- Chen, X., Shen, Y.-F., Suib, S. L. and O'young, C. L. (2002). Characterization of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve (M-OMS-2) Materials with Different Metal Cation Dopants. Chemistry of Materials 14: 940-948.
- Chintakovid, W., Visoottiviseth, P., Khokiattiwong, S. and Lauengsuchonkul, S. (2008). Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. Chemosphere 70: 1532-1537.
- Cook, W. G. and Olive, R. P. (2012). Pourbaix diagrams for the iron–water system extended to high- subcritical and low- supercritical conditions. Corrosion Science 55: 326-331.
- Corum, K., Abbaspour Tamijani, A. and Mason, S. (2018). Density Functional Theory Study of Arsenate Adsorption onto Alumina Surfaces. Minerals 8: 3-18.

- Dmitrieva, I. B., Tikhomolova, K. P., Chukhno, A. S., Prokopovich, P. P. and Starov, V. M. (2007). Investigation of the electro-surface properties of NiO and Fe₂O₃ in azole solutions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 300: 315-320.
- Driehaus, W., Seith, R. and Jekel, M. (1995). Oxidation of arsenate(III) with manganese oxides in water treatment. Water Research 29: 297-305.
- Du, M., Li, L., Li, M. and Si, R. (2016). Adsorption mechanism on metal organic frameworks of Cu-BTC, Fe-BTC and ZIF-8 for CO₂ capture investigated by X-ray absorption fine structure. RSC Advances 6: 62705-62716.
- Dziubek, J. (2017). Arsenic removal from industrial wastewater. EDP Sciences 17: 1-8.
- El-Kamash, A. M. (2008). Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs⁺ and Sr²⁺ ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations. J Hazard Mater 151: 432-445.
- Elizalde-González, M. P., Mattusch, J. and Wennrich, R. (2001). Application of natural zeolites for preconcentration of arsenic species in water samples. Journal of Environmental Monitoring 3: 22-26.
- Feng, L. et al. (2014). MnO₂ prepared by hydrothermal method and electrochemical performance as anode for lithium-ion battery. Nanoscale Res Lett 9: 290.
- Fischel, M. H., Fischel, J. S., Lafferty, B. J. and Sparks, D. L. (2015). The influence of environmental conditions on kinetics of arsenite oxidation by manganese-oxides. Geochem Trans 16: 15.
- Freiding, J., Patcas, F.-C. and Kraushaar-Czarnetzki, B. (2007). Extrusion of zeolites: Properties of catalysts with a novel aluminium phosphate sintermatrix. Applied Catalysis A: General 328: 210-218.
- Garces, H. F. et al. (2014). Formation of Platinum (Pt) Nanocluster Coatings on K-OMS-2 Manganese Oxide Membranes by Reactive Spray Deposition Technique (RSDT) for Extended Stability during CO Oxidation. Advances in Chemical Engineering and Science 04: 23-35.

- Garcia, E. R. et al. (2014). Adsorption of Azo-Dye Orange II from Aqueous Solutions Using a Metal-Organic Framework Material: Iron- Benzenetricarboxylate. Materials (Basel) 7: 8037-8057.
- Gregg, S. J. and Sing, K. S. W. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. 2. London: Academic press inc.
- Iyer, A. et al. (2012). Water Oxidation Catalysis using Amorphous Manganese Oxides, Octahedral Molecular Sieves (OMS-2), and Octahedral Layered (OL-1) Manganese Oxide Structures. The Journal of Physical Chemistry C 116: 6474-6483.
- Iyer, A. et al. (2010). Nanoscale manganese oxide octahedral molecular sieves (OMS-2) as efficient photocatalysts in 2-propanol oxidation. Applied Catalysis A: General 375: 295-302.
- Khan, N. A., Hasan, Z. and Jhung, S. H. (2013). Adsorptive removal of hazardous materials using metal-organic frameworks (MOFs): a review. J Hazard Mater 244-245: 444-456.
- Kim, M.-J. and Nriagu, J. (2000). Oxidation of arsenite in groundwater using ozone and oxygen. Science of The Total Environment 247: 71-79.
- Kołodziejńska, D. et al. (2010). Chromium and Arsenic Removal in the Presence of Complexing Agent of New Generation. Wastewater treatment: 111-114.
- Kumar, P. S., Flores, R. Q., Sjostedt, C. and Onnby, L. (2016). Arsenic adsorption by iron-aluminium hydroxide coated onto macroporous supports: Insights from X-ray absorption spectroscopy and comparison with granular ferric hydroxides. J Hazard Mater 302: 166-174.
- Lambert, T. N. et al. (2009). Synthesis and Characterization of Titania-Graphene Nanocomposites. The Journal of Physical Chemistry C 113: 19812-19823.
- Lenoble, V., Bouras, O., Deluchat, V., Serpaud, B. and Bollinger, J.-C. (2002). Arsenic Adsorption onto Pillared Clays and Iron Oxides. Journal of Colloid and Interface Science 255: 52-58.

- Lenoble, V., Laclautre, C., Serpaud, B., Deluchat, V. and Bollinger, J. C. (2004). As(V) retention and As(III) simultaneous oxidation and removal on a MnO₂-loaded polystyrene resin. Sci Total Environ 326: 197-207.
- Lu, P. and Zhu, C. (2010). Arsenic Eh–pH diagrams at 25°C and 1 bar. Environmental Earth Sciences 62: 1673-1683.
- Luekittisup, P. et al. (2015). Removal of Chlorinated Chemicals in H₂Feedstock Using Modified Activated Carbon. Journal of Chemistry 2015: 1-9.
- Luo, J., Zhang, Q., Huang, A. and Suib, S. L. (2000). Total oxidation of volatile organic compounds with hydrophobic cryptomelane- type octahedral molecular sieves. Microporous and Mesoporous Materials 35-36: 209-217.
- Majano, G., Ingold, O., Yulikov, M., Jeschke, G. and Pérez-Ramírez, J. (2013). Room-temperature synthesis of Fe–BTC from layered iron hydroxides: the influence of precursor organisation. CrystEngComm 15: 9885-9892.
- Millanar, J. M., Yodsa-Nga, A., Luna, M. D. D. and Wantala, K. Thermal Catalytic Oxidation of Toluene by K-OMS 2 Synthesized via Novel Uncalcined Route. ใน International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering (BCEE-2014) March 17-18, 2014 Dubai (UAE), 2014.
- Mohan, D. and Pittman, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. Journal of Hazardous Materials 142: 1-53.
- Nandasiri, M. I., Jambovane, S. R., Mcgrail, B. P., Schaefer, H. T. and Nune, S. K. (2016). Adsorption, separation, and catalytic properties of densified metal-organic frameworks. Coordination Chemistry Reviews 311: 38-52.
- O'day. (2006). Chemistry and Mineralogy of Arsenic. Elements 2: 77-83.
- Paseta, L., Simón-Gaudó, E., Gracia-Gorría, F. and Coronas, J. (2016). Encapsulation of essential oils in porous silica and MOFs for trichloroisocyanuric acid tablets used for water treatment in swimming pools. Chemical Engineering Journal 292: 28-34.

- Pettine, M., Campanella, L. and Millero, F. J. (1999). Arsenite oxidation by H_2O_2 in aqueous solutions. Geochimica et Cosmochimica Acta 63: 2727-2735.
- Phanthasri, J. et al. (2018). Enhancement of arsenite removal using manganese oxide coupled with iron (III) trimesic. Applied Surface Science 427: 545-552.
- Qiu, G. et al. (2011). Hydrothermal Synthesis of Manganese Oxide Nanomaterials and Their Catalytic and Electrochemical Properties. Chemistry of Materials 23: 3892-3901.
- Rahman, I. M., Begum, Z. A., Sawai, H., Maki, T. and Hasegawa, H. (2013). Decontamination of spent iron-oxide coated sand from filters used in arsenic removal. Chemosphere 92: 196-200.
- Rau, I., Gonzalo, A. and Valiente, M. (2003). Arsenic(V) adsorption by immobilized iron mediation. Modeling of the adsorption process and influence of interfering anions. Reactive and Functional Polymers 54: 85-94.
- Rotaru, P. et al. (2005). The influence of the tableting pressure upon the textural and diffusional properties of a $Fe_2O_3-Cr_2O_3$ catalyst. Microporous and Mesoporous Materials 83: 159-164.
- Sadaf, S. and Bhatti, H. N. (2013). Evaluation of peanut husk as a novel, low cost biosorbent for the removal of Indosol Orange RSN dye from aqueous solutions: batch and fixed bed studies. Clean Technologies and Environmental Policy 16: 527-544.
- Saputra, E. et al. (2013). Manganese oxides at different oxidation states for heterogeneous activation of peroxymonosulfate for phenol degradation in aqueous solutions. Applied Catalysis B: Environmental 142-143: 729-735.
- Schurz, F. et al. (2009). Octahedral molecular sieves of the type K-OMS-2 with different particle sizes and morphologies: Impact on the catalytic properties in the aerobic partial oxidation of benzyl alcohol. Applied Catalysis A: General 355: 42-49.

- Sekine, T. and Nakatani, K. (2002). Intraparticle Diffusion and Adsorption Isotherm for Sorption in Silica Gel Studied by Single- Microparticle Injection and Microabsorption Methods. Langmuir 18: 694-697.
- Seredych, M., Rossin, J. A. and Bandosz, T. J. (2011). Changes in graphite oxide texture and chemistry upon oxidation and reduction and their effect on adsorption of ammonia. Carbon 49: 4392-4402.
- Shahid, S. and Nijmeijer, K. (2014). High pressure gas separation performance of mixed-matrix polymer membranes containing mesoporous Fe(BTC) . Journal of Membrane Science 459: 33-44.
- Sharma, V. K. and Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation. Environment International 35: 743-759.
- Shih, Y.-J., Huang, R.-L. and Huang, Y.-H. (2015). Adsorptive removal of arsenic using a novel akhtenskite coated waste goethite. Journal of Cleaner Production 87: 897-905.
- Sing, K. S. W. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional). Pure and Applied Chemistry 54: 2201-2218.
- Smedley, P. L. and Kinniburgh, D. G. (2001). United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking Water. British Geological Survey: Wallingford.
- Song, W. et al. (2015). Effect of treatment with different bases on the catalytic properties of TS-1/SiO₂ extrudates in propylene epoxidation. Microporous and Mesoporous Materials 212: 48-55.
- Sriskandakumar, T. et al. (2009). Green Decomposition of Organic Dyes Using Octahedral Molecular Sieve Manganese Oxide Catalysts. The Journal of Physical Chemistry A 113: 1523-1530.
- Stillwell, W. D. (1957). Preformed Catalysts and Techniques of Tableting. Industrial & Engineering Chemistry 49: 245-249.

- Sultana, S. et al. (2017). Synthesis and catalytic performances of K-OMS-2, Fe/K-OMS-2 and Fe-K-OMS-2 in post plasma-catalysis for dilute TCE abatement. Catalysis Today:
- Taty-Costodes, V. C., Fauduet, H., Porte, C. and Ho, Y. S. (2005). Removal of lead (II) ions from synthetic and real effluents using immobilized *Pinus sylvestris* sawdust: adsorption on a fixed-bed column. J Hazard Mater 123: 135-144.
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T. and Subramanian, K. S. (2003). Arsenic Removal from Drinking Water using Iron Oxide-Coated Sand. Water, Air, and Soil Pollution 142: 95-111.
- Townsend, H. E. (1970). Potential-pH diagrams at elevated temperature for the system Fe-H₂O. Corrosion Science 10: 343-358.
- Visoottiviset, P., Francesconi, K. and Sridokchan, W. (2002). The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. Environmental Pollution 118: 453-461.
- Wang, C., Ma, J., Liu, F., He, H. and Zhang, R. (2015). The Effects of Mn²⁺ Precursors on the Structure and Ozone Decomposition Activity of Cryptomelane-Type Manganese Oxide (OMS-2) Catalysts. The Journal of Physical Chemistry C 119: 23119-23126.
- Wei, M. et al. (2015). The facile synthesis of a magnetic OMS-2 catalyst for decomposition of organic dyes in aqueous solution with peroxymonosulfate. New Journal of Chemistry 39: 6395-6403.
- Williams, M., Fordyce, F., Pajitprapapon, A. and Charoenchaisri, P. (1996). Arsenic contamination in surface drainage and groundwater in part of the southeast Asian tin belt, Nakhon Si Thammarat Province, southern Thailand. Environmental Geology, 21: 16-33.
- World Health Organization. Arsenic [online]. 2017 Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/en/> [2 February 2018]

- Wu, M. H., Shi, J. and Deng, H. P. (2018). Metal doped manganese oxide octahedral molecular sieve catalysts for degradation of diclofenac in the presence of peroxymonosulfate. Arabian Journal of Chemistry:
- Wu, Z., You, L., Xiang, H. and Jiang, Y. (2006). Comparison of dye adsorption by mesoporous hybrid gels: understanding the interactions between dyes and gel surfaces. J Colloid Interface Sci 303: 346-352.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S. and Ang, H. M. (2015). Fixed-bed dynamic column adsorption study of methylene blue (MB) onto pine cone. Desalination and Water Treatment 55: 1026-1039.
- Yang, F., Liu, Y., Gao, L. and Sun, J. (2010). pH-Sensitive Highly Dispersed Reduced Graphene Oxide Solution Using Lysozyme via an in Situ Reduction Method. The Journal of Physical Chemistry C 114: 22085-22091.
- Yin, H., Kong, M., Gu, X. and Chen, H. (2017). Removal of arsenic from water by porous charred granulated attapulgite-supported hydrated iron oxide in batch and column modes. Journal of Cleaner Production 166: 88-97.
- Yodsa-Nga, A., Millanar, J. M., Neramittagapong, A., Khemthong, P. and Wantala, K. (2015). Effect of manganese oxidative species in as-synthesized K-OMS 2 on the oxidation of benzene. Surface and Coatings Technology 271: 217-224.
- Zhao, M. and Liu, P. (2009). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by modified expanded graphite powder. Desalination 249: 331-336.
- Zhu, B.-J. et al. (2012). Iron and 1,3,5-Benzenetricarboxylic Metal–Organic Coordination Polymers Prepared by Solvothermal Method and Their Application in Efficient As(V) Removal from Aqueous Solutions. The Journal of Physical Chemistry C 116: 8601-8607.
- Zukal, A., Opanasenko, M., Rubeš, M., Nachtigall, P. and Jagiello, J. (2015). Adsorption of pentane isomers on metal-organic frameworks Cu- BTC and Fe- BTC. Catalysis Today 243: 69-75.

กรมควบคุมมลพิษ. (2541). โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. 1, กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท.

กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. โครงการศึกษาการปนเปื้อนและการวางเครือข่ายเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารพิษในแหล่งน้ำใต้ดินในพื้นที่อำเภอทับคล้อ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร และอำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์ [ออนไลน์]. 2554 แหล่งที่มา: <http://www.dgr.go.th/newproject/54/> [2 สิงหาคม 2560]

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและการป้องกันในเรื่องสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ [ออนไลน์]. 2551 แหล่งที่มา: <http://chemlab.pkru.ac.th/images/stories/download/> [23 มกราคม 2561]

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [ออนไลน์]. 2543 แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/law/3_16_water.pdf?CFID=2229327&CFTOKEN=17561810 [4 สิงหาคม 2560]

คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน [ออนไลน์]. 2547 แหล่งที่มา: http://infofile.pcd.go.th/law/9_1_soil.pdf?CFID=2229327&CFTOKEN=17561810 [2 พฤศจิกายน 2560]

จักรภพ พันธศรี. (2560). การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอาร์เซนิตโดยใช้แมงกานีสออกไซด์ร่วมกับวัสดุโครงข่ายโลหะ-สารอินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2555). โครงการสำรวจการกระจายตัวและแหล่งที่มาการปนเปื้อนโลหะหนักในเขตพื้นที่แหล่งแร่ทองคำภูทับฟ้า ต.เขาหลวง อ.วังสะพุง จ.เลย. 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท จรัสสินทวงค์ การพิมพ์ จำกัด.

สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2559). โครงการตรวจวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมบริเวณพื้นที่แหล่งแร่ทองคำ จังหวัดพิจิตร เพชรบูรณ์ และพิษณุโลก. กรุงเทพมหานคร: กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2541). สารหนู (Arsenic). 2. กรุงเทพมหานคร: บริษัท อินทิเกรเต็ด โปรโมชัน เทคโนโลยี จำกัด.



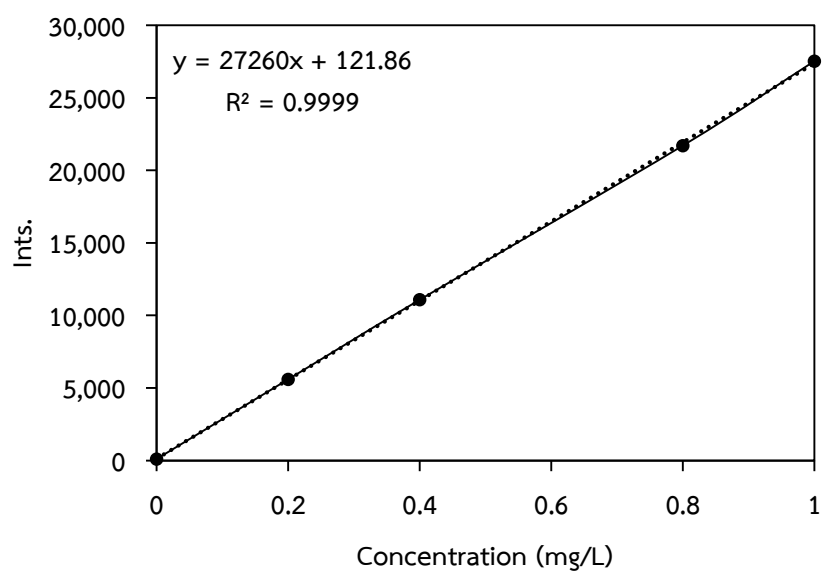
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตาราง ก.1 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของสารหนู ความเข้มข้น 0-1 mg/L

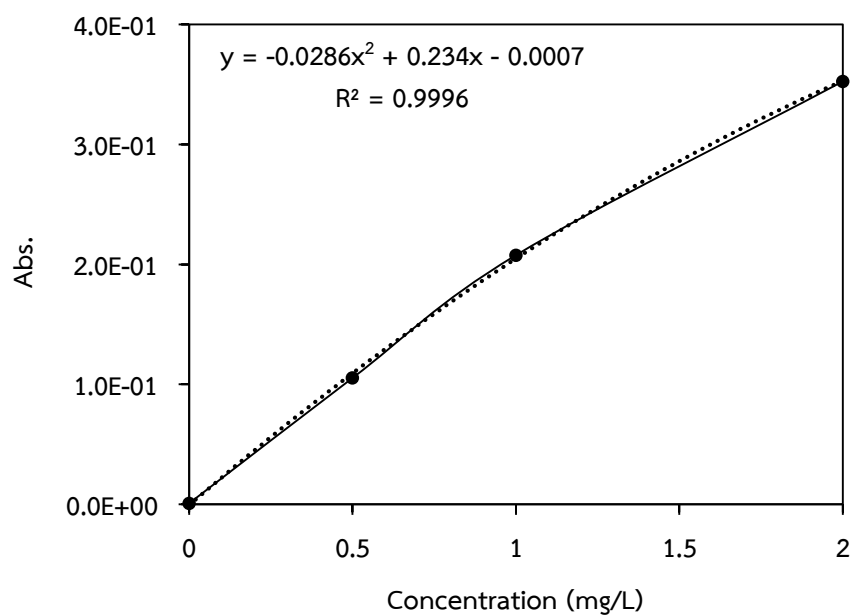
Ints.	Concentration (mg/L)
110	0
5600	0.2
11085	0.4
21708	0.8
27531	1



รูปที่ ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานของสารหนู ความเข้มข้น 0-1 mg/L

ตาราง ก.2 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของ Mn ความเข้มข้น 0-1 mg/L

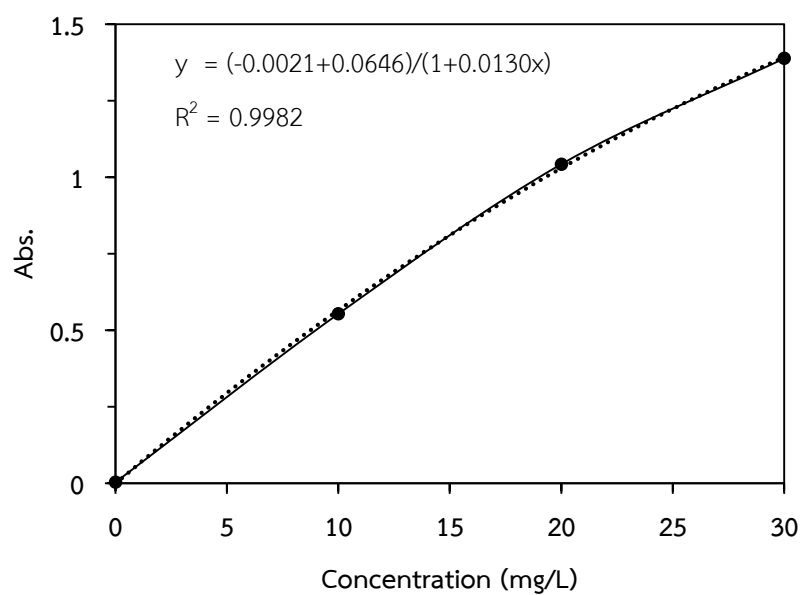
Abs.	Concentration (mg/L)
-0.00044	0
0.10321	0.5
0.19874	1
0.3417	2



รูปที่ ก.2 แสดงกราฟมาตรฐานของ Mn ความเข้มข้น 0-1 mg/L

ตาราง ก.3 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของ K ความเข้มข้น 0-30 mg/L

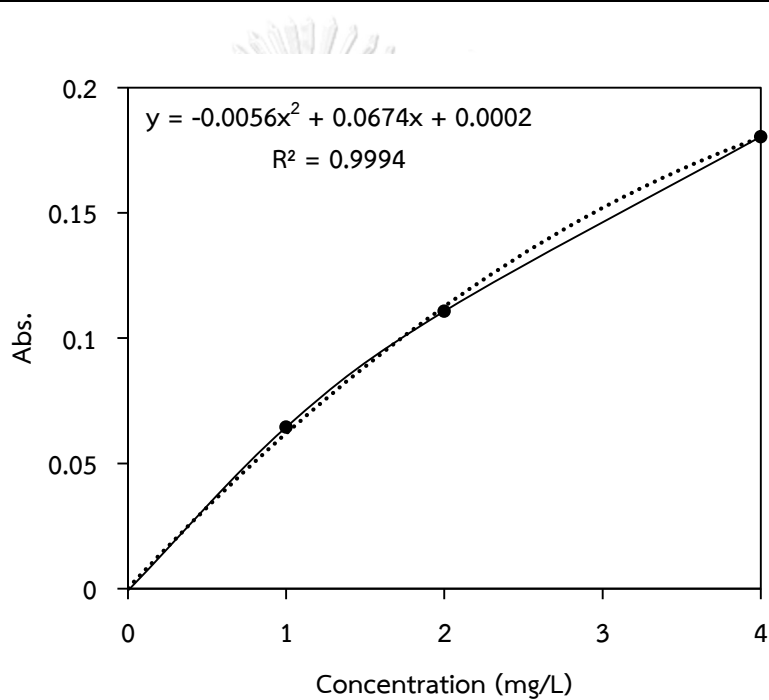
Abs.	Concentration (mg/L)
0.00283	0
0.55324	10
1.0423	20
1.3879	30



รูปที่ ก.3 แสดงกราฟมาตรฐานของ K ความเข้มข้น 0-30 mg/L

ตาราง ก.4 ข้อมูลกราฟมาตรฐานของ Fe ความเข้มข้น 0-4 mg/L

Abs	Concentration (mg/L)
-0.00073	0
0.06448	1
0.11077	2
0.18041	4



รูป ก.4 แสดงกราฟมาตรฐานของ Fe ความเข้มข้น 0-4 mg/L



ตาราง ข.1 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพเรซินแลกเปลี่ยนประจุสำหรับ As(III)

ความเข้มข้น As(III) เริ่มต้น 4.9525 ppm				
ปริมาณเรซิน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.5 g	4.713	4.716	4.693	4.707333
1 g	4.304	4.327	4.288	4.306333
2 g	3.563	3.651	3.559	3.591

ตาราง ข.2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพเรซินแลกเปลี่ยนประจุสำหรับ As(V)

ความเข้มข้น As(V) เริ่มต้น 3.394 ppm				
ปริมาณเรซิน	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	Average
0.5 g	0.6788	0.9523	0.7238	0.784967
1 g	0.4975	0.346	0.2398	0.3611
2 g	0.0492	0.0418	0.0333	0.041433

ตาราง ข.3 ข้อมูลการทดลองประจุผิวที่เป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ K-OMS2 ในน้ำ DI

เวลา	ชั่วโมง	pH 5		pH 6		pH 7		pH 8	
		ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH
15:20	0	5.2	0	6	0	7	0	8.2	0
16:20	1	5.2	0	6	0	6.4	-0.6	7	-1.2
17:20	2	5.2	0	5.5	-0.5	6.4	-0.6	6.4	-1.8
18:20	3	5.2	0	5.5	-0.5	6	-1	6.4	-1.8
15:20	24	5.2	0	5.5	-0.5	5.7	-0.3	6	-2.2
15:20	48	5.2	0	5.5	-0.5	5.7	-0.3	6	-2.2
15:20	72	5.2	0	5.5	-0.5	5.7	-0.3	6	-2.2

ตาราง ข.4 ข้อมูลการทดลองประจุผิวที่เป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ Fe-BTC ในน้ำ DI

เวลา	ชั่วโมง	pH 5		pH 6		pH 7		pH 8	
		ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH
15:20	0	5.2	0	6	0	7	0	8.2	0
16:20	1	5.2	0	5.7	-0.3	6.4	-0.6	6.4	-1.8
17:20	2	5.2	0	5.2	-0.8	5.7	-1.3	6	-2.2
18:20	3	5.2	0	5.2	-0.8	5.2	-1.3	5.7	-2.5
15:20	24	5.2	0	5.2	-0.8	5.2	-1.3	5.5	-2.7
15:20	48	5.2	0	5.2	-0.8	5.2	-1.3	5.5	-2.7
15:20	72	5.2	0	5.2	-0.8	5.2	-1.3	5.5	-2.7

ตาราง ข.5 ข้อมูลการทดลองประจุผิวที่เป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ K-OMS2 (coated)

Time (min)	pH 5		pH 6		pH 7		pH 8	
	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH
0	5.2	-	6	-	7.2	-	8.2	-
5	5.2	0	6	0	6.8	-0.4	7.6	-0.6
10	5.2	0	5.7	-0.3	6.8	-0.4	7.8	-0.4
15	5.2	0	5.7	-0.3	6.8	-0.4	7.8	-0.4
30	5.2	0	5.4	-0.3	6.4	-0.8	7.6	-0.6
60	5.2	0	5.4	-0.3	6.4	-0.8	7.8	-0.4
90	5.2	0	5.7	-0.3	6.8	-0.4	7.8	-0.4
120	5.2	0	5.7	-0.3	6.6	-0.6	7.8	-0.4
180	5.2	0	5.7	-0.3	6.6	-0.6	7.8	-0.4
72 (h)	5.2	0	5.7	-0.3	6.8	-0.4	7.8	-0.4

ตาราง ข.6 ข้อมูลการทดลองประจุผิวที่เป็นศูนย์ (Point of Zero Charge, pH_{pzc}) ของ Fe-BTC (coated)

Time	pH 5		pH 6		pH 7		pH 8	
	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH	ค่า pH	ΔpH
0	5.2	-	6	-	7.2	-	8.2	-
5	5.2	0	5.7	-0.3	7	-0.2	7.8	-0.4
10	5.2	0	5.7	-0.3	7	-0.2	7.8	-0.4
15	5.2	0	5.7	-0.3	7	-0.2	7.8	-0.4
30	5.2	0	5.7	-0.3	7	-0.2	7.6	-0.6
60	5.2	0	5.7	-0.3	6.8	-0.4	7.8	-0.4
90	5.2	0	5.7	-0.3	6.6	-0.6	7.6	-0.6
120	5.2	0	5.7	-0.3	6.4	-0.8	7.4	-0.8
180	5.2	0	5.7	-0.3	5.7	-1.5	7.4	-0.8
48 (h)	5.2	0	5.4	-0.6	5.7	-1.5	5.7	-2.5
120 (h)	5.2	0	5.2	-0.8	5.2	-2	5.2	-3



ตาราง ข.7 ข้อมูลการกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 5

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		SD	Average
	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀		
0	4.9525	1	4.9525	1	0	1
5	3.5547848	0.71777583	3.3724232	0.6809537	0.0260372	0.6993648
10	3.1584016	0.63773884	3.07102	0.6200949	0.0124761	0.6289169
15	2.4998736	0.50477004	2.431488	0.4909617	0.0097639	0.4978659
30	2.108556	0.42575588	2.1541464	0.4349614	0.0065093	0.4303586
60	1.1245632	0.2270698	1.3778432	0.2782117	0.0361627	0.2526407
90	0.7128566	0.14393873	0.79428608	0.1603808	0.0116263	0.1521598
120	0.4452662	0.08990737	0.35180592	0.071036	0.0133441	0.0804717
180	0.1281597	0.02587777	0.2241528	0.0452605	0.0137057	0.0355692

ตาราง ข.8 ข้อมูลการกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 6

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		SD	AV
	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀		
0	4.9525	1	4.9525	1	0	1
5	3.362292	0.678908	3.4040832	0.687346431	0.005966853	0.683127229
10	2.8202728	0.5694645	2.5910544	0.5231811	0.032727286	0.546322786
15	2.0085104	0.4055549	1.99458	0.402742049	0.001988951	0.40414845
30	2.0933592	0.4226874	1.96292	0.396349319	0.018623815	0.409518344
60	1.1701536	0.2362753	1.2018136	0.242668067	0.004520343	0.239471701
90	0.9535992	0.1925491	0.88432712	0.178561761	0.009890511	0.185555408
120	0.4913632	0.0992152	0.52276992	0.105556773	0.004484181	0.102385979
180	0.2298516	0.0464112	0.2241528	0.045260535	0.000813662	0.045835881

ตาราง ข.9 ข้อมูลการกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 7

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		SD	Average
	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀		
0	4.9525	1	4.9525	1	0	1
5	3.5953096	0.7259585	3.115344	0.629044725	0.068528406	0.677501625
10	2.8063424	0.5666517	3.3065704	0.66765682	0.071421426	0.617154245
15	2.9988352	0.6055195	2.6961656	0.544404967	0.043214483	0.574962221
30	2.228864	0.4500483	2.0971584	0.423454498	0.018804629	0.436751378
60	1.0523784	0.2124944	1.21979648	0.246299138	0.023903576	0.229396757
90	0.9384024	0.1894805	0.8079632	0.163142494	0.018623815	0.176311519
120	0.6306672	0.1273432	0.49984808	0.100928436	0.018678059	0.114135818
180	0.2002178	0.0404276	0.17881568	0.036106144	0.003055752	0.038266887

ตาราง ข.10 ข้อมูลการกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 8

Time (min)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		SD	Average
	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀		
0	4.9525	1	4.9525	1	0	1
5	3.5357888	0.7139402	3.4420752	0.6950177	0.0133802	0.704479
10	3.1204096	0.6300676	2.8987896	0.5853184	0.0316424	0.607693
15	2.31118	0.4666694	2.6366448	0.5323866	0.0464691	0.499528
30	1.8920016	0.3820296	1.747632	0.3528787	0.0206128	0.3674542
60	1.152424	0.2326954	1.3689784	0.2764217	0.0309191	0.2545585
90	0.8560864	0.1728594	0.8934452	0.1804029	0.005334	0.1766312
120	0.690188	0.1393615	0.609645	0.1230984	0.0114998	0.13123
180	0.25923208	0.0523437	0.2621448	0.0529318	0.0004159	0.0526377

ตาราง ข.11 ข้อมูลการดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 5 6 7 และ 8

Time (min)	pH 5		pH 6		pH 7		pH 8	
	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀	Concentration (mg/L)	C/C ₀
0	5.334	1	5.334	1	5.334	1	5.334	1
5	5.256	0.985377	4.933	0.924822	5.126	0.961005	4.637	0.869329
10	5.131	0.961942	4.475	0.838958	4.691	0.879453	4.003	0.750469
15	4.964	0.930634	3.923	0.735471	4.343	0.814211	3.456	0.647919
30	4.616	0.865392	2.864	0.536933	3.339	0.625984	2.167	0.406262
60	4.11	0.770529	1.767	0.331271	2.114	0.396325	0.9502	0.17814
90	3.701	0.693851	1.232	0.230971	1.424	0.266967	0.4052	0.075966
120	3.363	0.630484	0.8818	0.165317	0.9236	0.173153	0.2581	0.048388
180	2.889	0.54162	0.5221	0.097882	0.2527	0.047375	0.1225	0.022966

ตาราง ข.12 ข้อมูลการคำนวณประสิทธิภาพกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 5

Time (min)	Concentration (mg/L)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	4.9525000	0.000000	0.0000000
5	3.4636040	2.965928	2.9659283
10	3.1147108	3.660935	0.6950064
15	2.4656808	4.953823	1.2928884
30	2.1313512	5.619818	0.6659952
60	1.2512032	7.373101	1.7532829
90	0.7535713	8.364400	0.9912986
120	0.3985361	9.071641	0.7072414
180	0.1761562	9.514629	0.4429878

ตาราง ข.13 ข้อมูลการคำนวณประสิทธิภาพกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 6

Time (min)	Concentration (mg/L)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	4.9525000	0.000000	0.0000000
5	3.3831876	3.126120	3.1261203
10	2.7056636	4.475770	1.3496494
15	2.0015452	5.878396	1.4026263
30	2.0281396	5.825419	-0.0529769
60	1.1859836	7.503021	1.6776016
90	0.9189632	8.034934	0.5319132
120	0.5070665	8.855445	0.8205113
180	0.2270022	9.413342	0.5578970

ตาราง ค.14 ข้อมูลการคำนวณประสิทธิภาพกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 7

Time (min)	Concentration (mg/L) at pH 5	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	4.9525	0.0000	0.0000
5	3.3553	3.1753	3.1753
10	3.0565	3.7695	0.5942
15	2.8475	4.1849	0.4154
30	2.1630	5.5457	1.3608
60	1.1361	7.5873	2.0416
90	0.8732	8.1100	0.5227
120	0.5653	8.7222	0.6122
180	0.1895	9.4692	0.7470

ตาราง ข.15 ข้อมูลการคำนวณประสิทธิภาพกำจัด As(III) ด้วย K-OMS2 (coated) แบบกะ ที่ pH 8

Time (min)	Concentration (mg/L)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ประสิทธิภาพกำจัด As(III) (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	4.95250000	0.0000	0.0000
5	3.48893200	2.9155	2.9155
10	3.00959960	3.8703	0.9548
15	2.47391240	4.9374	1.0671
30	1.81981680	6.2404	1.3030
60	1.26070120	7.3542	1.1138
90	0.87476580	8.1230	0.7688
120	0.64991648	8.5709	0.4479
180	0.26068844	9.3462	0.7754

ตาราง ข.16 ข้อมูลการคำนวณความจุการดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 5

Time (min)	Concentration (mg/L)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	5.33400	0.00000	0.00000
5	5.25600	0.15569	0.15569
10	5.13100	0.40519	0.24950
15	4.96400	0.73852	0.33333
30	4.61600	1.43313	0.69461
60	4.11000	2.44311	1.00998
90	3.70100	3.25948	0.81637
120	3.36300	3.93413	0.67465
180	2.88900	4.88024	0.94611

ตาราง ข.17 ข้อมูลการคำนวณความจุการดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 6

Time (min)	Concentration (mg/L)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	5.3340	0.0000	0.0000
5	4.9330	0.8036	0.8036
10	4.4750	1.7214	0.9178
15	3.9230	2.8277	1.1062
30	2.8640	4.9499	2.1222
60	1.7670	7.1483	2.1984
90	1.2320	8.2204	1.0721
120	0.8818	8.9222	0.7018
180	0.5221	9.6431	0.7208

ตาราง ข.18 ข้อมูลการคำนวณความจุการดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 7

Time (min)	Concentration (mg/L)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	5.334	0.000000	0.000000
5	5.126	0.416834	0.416834
10	4.691	1.288577	0.871743
15	4.343	1.985972	0.697395
30	3.339	3.997996	2.012024
60	2.114	6.452906	2.454910
90	1.424	7.835671	1.382766
120	0.9236	8.838477	1.002806
180	0.2527	10.182966	1.344489

ตาราง ข.19 ข้อมูลการคำนวณความจุการดูดซับ As(V) ด้วย Fe-BTC (coated) แบบกะ ที่ pH 8

Time (min)	Concentration (mg/L)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นเริ่มต้น) (mg/g)	ความจุการดูดซับ (คิดจากความเข้มข้นแต่ละช่วงเวลา) (mg/g)
0	5.334	0.0000	0.0000
5	4.637	1.3940	1.3940
10	4.003	2.6620	1.2680
15	3.456	3.7560	1.0940
30	2.167	6.3340	2.5780
60	0.9502	8.7676	2.4336
90	0.4052	9.8576	1.0900
120	0.2581	10.1518	0.2942
180	0.1225	10.4230	0.2712



ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการทดสอบเบื้องต้นของ K-OMS2 (coated) ในการกำจัด AS(III) 5 mg/L

Time (min)	Concentration (mg/L)	C/C ₀
0	5.152	1
3	3.3002384	0.640574
15	4.6261592	0.897935
30	5.1897072	1.007319
45	5.4429872	1.05648
90	5.7722512	1.12039
120	5.895092	1.144234
180	6.0166664	1.167831

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการทดสอบเบื้องต้นของ Fe-BTC (coated) ในการกำจัด AS(V) 3 mg/L

Time (min)	Concentration (mg/L)	C/C ₀
0	2.427	1
4	1.888	0.777915
15	1.838	0.757314
30	1.912	0.787804
45	1.944	0.800989
60	1.951	0.803873
90	1.969	0.81129
120	1.973	0.812938
180	2.013	0.829419

ตาราง ค.3 ข้อมูล K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) ในภาวะทดสอบ I

Time (min)	Concentration (mg/L)						pH
	As(III) after resin	Calculated As(III) after resin	As total	As(V)	As(V) lost	Oxidation(%)	
0	1.0480	1.0480	1.0480	0.0000	0.0000	0.0000	7.0
8	0.3051	0.3864	0.0216	-0.3648	1.0264	-132.7461	5.2
9	0.3563	0.4512	0.0232	-0.4280	1.0248	-138.6277	5.2
20	0.1048	0.1327	0.1338	0.0011	0.9142	-87.1296	5.2
40	0.1071	0.1356	1.0490	0.9134	-0.0010	87.2489	5.5
60	0.1488	0.1884	1.0820	0.8936	-0.0340	88.5076	6.4
80	0.2078	0.2632	1.0640	0.8008	-0.0160	77.9429	6.4
130	0.1748	0.2214	1.0670	0.8456	-0.0190	82.5032	6.4
170	0.1213	0.1536	1.0490	0.8954	-0.0010	85.5330	6.8
300	0.1380	0.1748	1.0350	0.8602	0.0130	80.8432	6.8
500	0.1646	0.2084	1.0250	0.8166	0.0230	75.7205	6.8
600	0.2490	0.3153	1.0010	0.6857	0.0470	60.9415	6.8

ตาราง ค.4 ข้อมูล K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) ในภาวะทดสอบ II

time (min)	Concentration (mg/L)						oxidation(%)	pH
	As(III) after resin	calculated As(III) after resin	As total	As(V)	As(V) lost			
0	1.0070	1.0070	1.0070	0.0000	0.0000	0.0000	7.0	
14	0.0066	0.0084	0.0967	0.0883	0.9103	-81.6245	7.0	
20	0.0150	0.0190	0.1639	0.1449	0.8431	-69.3343	6.8	
30	0.0347	0.0439	0.3291	0.2852	0.6779	-39.0014	6.6	
40	0.0350	0.0443	0.4767	0.4324	0.5303	-9.7243	6.6	
60	0.0098	0.0124	0.5543	0.5419	0.4527	8.8569	6.6	
80	0.0457	0.0579	0.8879	0.8300	0.1191	70.5984	6.6	
100	0.0681	0.0862	1.1300	1.0438	-0.1230	115.8648	6.4	
120	0.0378	0.0479	1.1840	1.1361	-0.1770	130.4002	6.6	
200	0.0506	0.0641	1.0520	0.9879	-0.0450	102.5740	6.6	
300	0.0583	0.0738	1.0360	0.9622	-0.0290	98.4279	6.8	
400	0.0832	0.1054	1.0410	0.9356	-0.0340	96.2895	6.8	
500	0.0582	0.0737	1.0060	0.9323	0.0010	92.4822	6.8	
600	0.0502	0.0636	0.9907	0.9271	0.0163	90.4495	6.8	

ตาราง ค.5 ข้อมูล K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) ในภาวะทดสอบ III

Time (min)	Concentration (mg/L)					Oxidized As(V) at outlet	Oxidation (%)
	As(III) after resin	Calculated As(III) . after resin	As total	As(V)	As(V) lost		
0	1.077	1.0770	1.0770	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22	0.0106	0.0134	0.0828	0.0694	0.9942	-0.9248	-85.8704
26	0.0114	0.0144	0.1002	0.0858	0.9768	-0.8910	-82.7332
30	0.0149	0.0189	0.1463	0.1274	0.9307	-0.8033	-74.5840
40	0.0162	0.0205	0.2208	0.2003	0.8562	-0.6559	-60.9021
60	0.0369	0.0467	0.3948	0.3481	0.6822	-0.3341	-31.0242
80	0.0399	0.0505	0.7140	0.6635	0.3630	0.3005	27.8989
100	0.0553	0.0700	0.9891	0.9191	0.0879	0.8312	77.1744
120	0.0765	0.0969	1.1940	1.0971	-0.1170	1.2141	112.7317
200	0.0461	0.0584	1.1865	1.1281	-0.1095	1.2376	114.9136
300	0.0646	0.0818	1.0970	1.0152	-0.0200	1.0352	96.1180
400	0.0823	0.1042	1.0880	0.9838	-0.0110	0.9948	92.3654
500	0.0523	0.0662	1.0850	1.0188	-0.0080	1.0268	95.3359
600	0.0795	0.1007	1.0760	0.9753	0.0010	0.9743	90.4662



ตาราง ค.6 ข้อมูลการใช้ซ้ำของ K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) และการชะละลายของ Mn และ K
ซ้ำที่ 1

Time (min)	Concentration (mg/L)						Oxidation (%)	pH	Mn (mg/L)	K (mg/L)
	As(III) after resin	Calculated As(III) after resin	C/C ₀	As total	As(V)	As(V) lost				
0	1.0070	1.0070	1.0000	1.0070	0.0000	0.0000	0.0000	7.0	-	-
14	0.0066	0.0084	0.0083	0.0967	0.0883	0.9103	-81.6245	7.0	0.0431	5.415
20	0.0150	0.0190	0.0189	0.1639	0.1449	0.8431	-69.3343	6.8	0.0312	4.488
30	0.0347	0.0439	0.0436	0.3291	0.2852	0.6779	-39.0014	6.6	0.0272	1.596
40	0.0350	0.0443	0.0440	0.4767	0.4324	0.5303	-9.7243	6.6	0.0199	0.5484
60	0.0098	0.0124	0.0123	0.5543	0.5419	0.4527	8.8569	6.6	0.0167	0.183
80	0.0457	0.0579	0.0575	0.8879	0.8300	0.1191	70.5984	6.6	0.0731	0.1151
100	0.0681	0.0862	0.0856	1.1300	1.0438	-0.1230	115.8648	6.4	0.0516	0.1352
120	0.0378	0.0479	0.0475	1.1840	1.1361	-0.1770	130.4002	6.6	0.071	0.1
200	0.0506	0.0641	0.0636	1.0520	0.9879	-0.0450	102.5740	6.6	0.0354	0.1
300	0.0583	0.0738	0.0733	1.0360	0.9622	-0.0290	98.4279	6.8	0.0433	0.1
400	0.0832	0.1054	0.1046	1.0410	0.9356	-0.0340	96.2895	6.8	-	-
500	0.0582	0.0737	0.0732	1.0060	0.9323	0.0010	92.4822	6.8	-	-
600	0.0502	0.0636	0.0631	0.9907	0.9271	0.0163	90.4495	6.8	-	-



ตาราง ค.7 ข้อมูลการใช้ซ้ำของ K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) และการชะละลายของ Mn และ K
ซ้ำที่ 2

Time (min)	Concentration (mg/L)						Oxidation (%)	Time (min)	Mn (mg/L)	K (mg/L)
	As(III) after resin	Calculated As(III) after resin	C/C ₀	As total	As(V)	As(V) lost				
0	1.0370	1.0370	1.0000	1.0370	0.0000	0.0000	0.0000	-	-	-
14	0.0734	0.0930	0.0896	0.9457	0.8527	0.0913	73.4278	23	0.0076	0.1919
20	0.0408	0.0517	0.0498	0.9972	0.9455	0.0398	87.3415	32	0.0032	0.0903
30	0.0743	0.0941	0.0907	1.0060	0.9119	0.0310	84.9476	50	0.0068	0.0853
40	0.0736	0.0932	0.0899	1.0010	0.9078	0.0360	84.0688	70	0.0059	0.0864
60	0.0588	0.0745	0.0718	1.0150	0.9405	0.0220	88.5762	90	0.0072	0.0753
80	0.0635	0.0804	0.0775	1.0250	0.9446	0.0120	89.9309	110	0.0057	0.0803
100	0.0616	0.0780	0.0752	1.0150	0.9370	0.0220	88.2343	310	0.0082	0.1046
200	0.1080	0.1368	0.1319	1.0160	0.8792	0.0210	-	410	0.0168	0.0769
300	0.0534	0.0676	0.0652	1.0250	0.9574	0.0120	91.1643	510	0.0103	0.0958
400	0.0444	0.0562	0.0542	1.0040	0.9478	0.0330	88.2133	610	0.0078	0.0736
500	0.0551	0.0698	0.0673	1.0090	0.9392	0.0280	87.8709	-	-	-
600	0.0422	0.0534	0.0515	1.0080	0.9546	0.0290	89.2534	-	-	-

ตาราง ค.8 ข้อมูลการใช้ซ้ำของ K-OMS2 (coated) ในการกำจัด As(III) และการชะละลายของ Mn และ K
ซ้ำที่ 3

Time (min)	Concentration (mg/L)						Oxidation (%)	Time (min)	Mn (mg/L)	K (mg/L)
	As(III) after resin	Calculated As(III) after resin	C/C ₀	As total	As(V)	As(V) lost				
0	1.049	1.049	1	1.049	0.0000	0.0000	0.0000	-	-	-
14	0.0708	0.0897	0.0854	1.5810	1.4913	-0.5320	192.8826	16	0.0068	0.6011
20	0.051	0.0646	0.0615	1.2230	1.1584	-0.1740	127.0175	28	-0.0003	0.111
30	0.0378	0.0479	0.0456	1.0480	1.0001	0.0010	95.2460	38	-0.0025	0.1014
40	0.0655	0.0829	0.0790	1.0350	0.9521	0.0140	89.4233	50	0.0048	0.1014
60	0.0432	0.0547	0.0521	1.0470	0.9923	0.0020	94.4034	70	0.0234	0.0936
80	0.0385	0.0488	0.0464	1.0450	0.9962	0.0040	94.5895	90	0.0235	0.0942
100	0.045	0.0570	0.0543	1.0740	1.0170	-0.0250	99.3338	190	0.0279	0.0887
200	0.0765	0.0969	0.0923	1.0480	0.9511	0.0010	90.5739	290	0.024	0.0813
300	0.0579	0.0733	0.0698	1.0530	0.9797	-0.0040	93.7727	390	0.027	0.0818
400	0.0542	0.0686	0.0654	1.0580	0.9894	-0.0090	95.1727	490	0.0194	0.0801
500	0.0486	0.0615	0.0586	1.0710	1.0095	-0.0220	98.3273	590	0.0197	0.0823
600	0.07	0.0886	0.0845	1.0480	0.9594	0.0010	91.3586	-	-	-

ตาราง ค.9 ข้อมูลของ Fe-BTC (coated) ในการดูดซับ As(V) ภาวะทดสอบ I

Time (min)	As(V) (mg/L)	Adsorption (%)	Time (min)	pH
0	1.1700	100.0000	0	6.0
8	0.0023	0.1966	11	5.2
9	0.0034	0.2906	15	5.2
10	0.0050	0.4274	30	5.5
20	0.0010	0.0855	50	5.5
40	0.0017	0.1453	70	5.5
60	0.0578	4.9402	90	5.5
80	0.0588	5.0256	120	5.5
100	0.1932	16.5128	160	5.5
130	0.3351	28.6410	190	5.5
170	0.3878	33.1453	230	5.5
200	0.4342	37.1111	290	5.5
250	0.5401	46.1624	340	5.5
300	0.5324	45.5043	390	5.5
350	0.6018	51.4359		
400	0.5674	48.4957		
450	0.7800			
500	0.8000			
600	0.9300			
700	0.9700			
800	1.0500			
900	1.1250			
1000	1.1700			

ตาราง ค.10 ข้อมูลของ Fe-BTC (coated) ในการดูดซับ As(V) ภาวะทดสอบ II

Time (min)	As(V) (mg/L)	Adsorption (%)	Time (min)	pH	Fe (mg/L)
0	1.1855	100.0000	0	6.0	
16	0.0033	0.2784	18	5.5	0.1002
20	0.0041	0.3458	28	5.5	0.2216
30	0.0044	0.3712	70	5.5	0.0753
40	0.0116	0.9785	110	5.5	0.0686
50	0.0207	1.7461	190	5.5	0.1872
60	0.0325	2.7415	290	5.5	0.2052
120	0.0984	8.3003	390	5.5	0.1263
200	0.1659	13.9941	490	5.5	0.1223
310	0.2000	16.8705	590	5.5	0.0946
400	0.2254	19.0131			
500	0.2339	19.7301			
600	0.2511	21.1809			
1000	0.3200				
2000	0.4300				
3000	0.5200				
4000	0.5900				
5000	0.6600				
6000	0.7200				
7000	0.7900				
8000	0.8400				
9000	0.8900				
10000	0.9300				
15000	1.1000				
18000	1.1800				

ตาราง ค.11 ข้อมูลของ Fe-BTC (coated) ในการดูดซับ As(V) ภาวะทดสอบ III

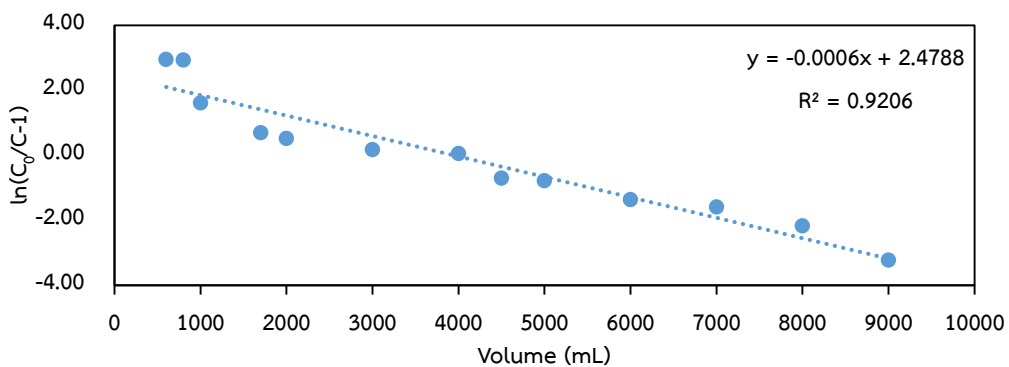
Time (min)	Concentration (mg/L)	Adsorption (%)	Time (min)	pH
0	1.1620	100.0000	0	6.0
22	0.0049	0.4217	24	5.8
26	0.0056	0.4819	28	5.8
30	0.0063	0.5422	36	5.5
40	0.0038	0.3270	70	5.5
50	0.0111	0.9552	90	5.5
60	0.0207	1.7814	110	5.5
80	0.0363	3.1239	190	5.5
100	0.0477	4.1050	290	5.5
120	0.0603	5.1893	390	5.5
200	0.1117	9.6127	490	5.5
300	0.1389	11.9535	590	5.5
400	0.1359	11.6954		
500	0.1551	13.3477		
600	0.1534	13.2014		
1000	0.2200			
2000	0.3250			
3000	0.4000			
4000	0.4700			
5000	0.5350			
6000	0.5900			
7000	0.6400			
8000	0.6900			
10000	0.7800			
12000	0.8600			
14000	0.9400			
20000	1.1500			

ตาราง ค.12 ข้อมูลของ Fe-BTC (coated) ในการดูดซับ As(V) ภาวะทดสอบ IV

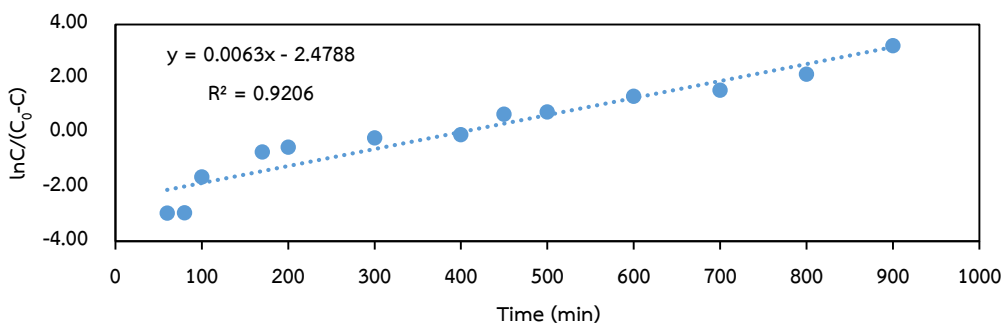
Time (min)	Concentration (mg/L)	Adsorption (%)	Time (min)	pH
0	2.3155	100	0	6.0
5	0.1049	4.5303	5	5.5
11	0.0984	4.2496	11	5.5
20	0.3419	14.7657	20	5.2
40	0.7895	34.0963	40	5.5
60	1.0390	34.0963	60	5.5
80	1.2290	44.8715	80	5.5
100	1.3370	53.0771	100	5.5
120	1.4640	57.7413	120	5.2
180	1.7050	63.2261	180	5.5
240	1.8330	79.1622	240	5.5
300	1.7870	77.1756	300	5.5

ตาราง ค.13 ข้อมูลของ Fe-BTC (coated) ในการดูดซับ As(V) ภาวะทดสอบ V

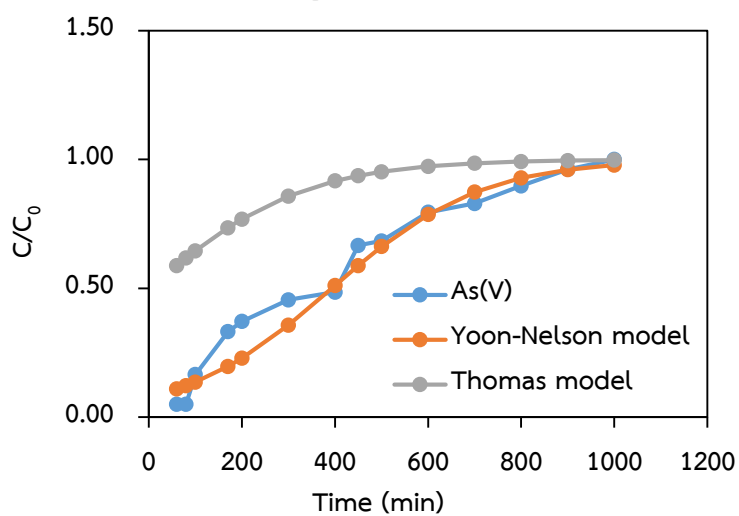
Time (min)	Concentration (mg/L)	Adsorption (%)	Time (min)	pH
0	2.3540	100	0	6.0
8	0.0488	2.0731	8	5.5
10	0.0437	1.8564	10	5.5
20	0.0562	2.3874	20	5.5
40	0.395	16.7799	40	5.5
60	0.5811	24.6856	60	5.5
80	0.2299	9.7664	80	5.2
100	0.7429	31.5590	100	5.5
200	0.9803	41.6440	200	5.5
300	1.161	49.3203	300	5.5
400	1.334	56.6695	400	5.5
500	1.438	61.0875	500	5.5
600	1.332	56.5845	600	5.5



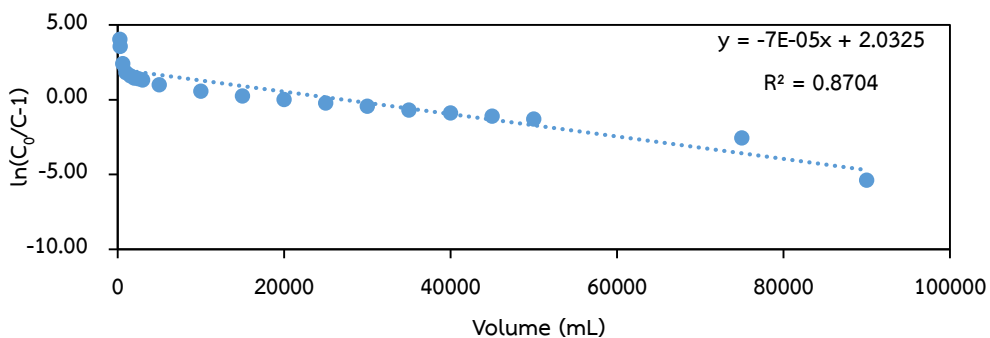
รูปที่ ค.1 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ I



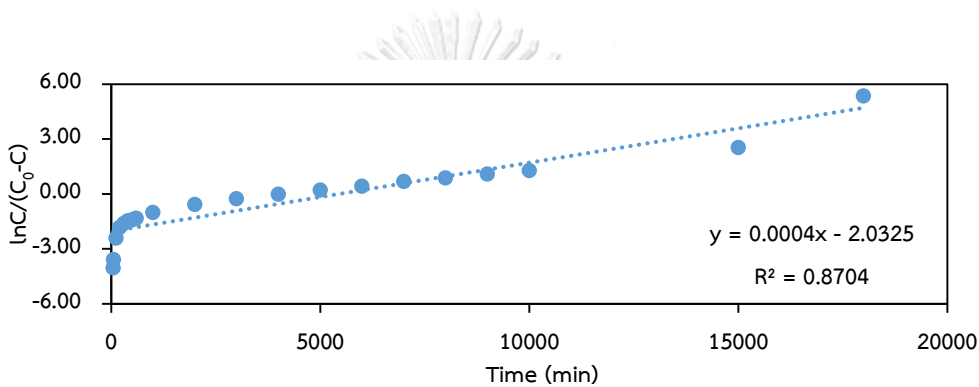
รูปที่ ค.2 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ I



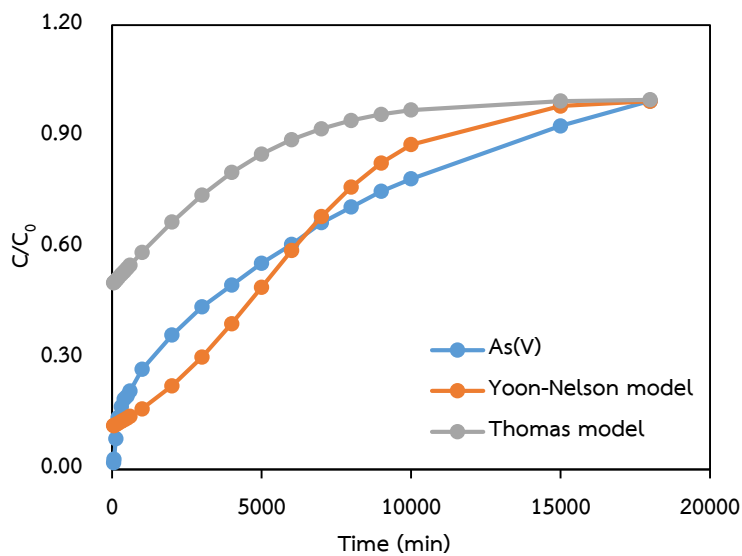
รูปที่ ค.3 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ I เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson



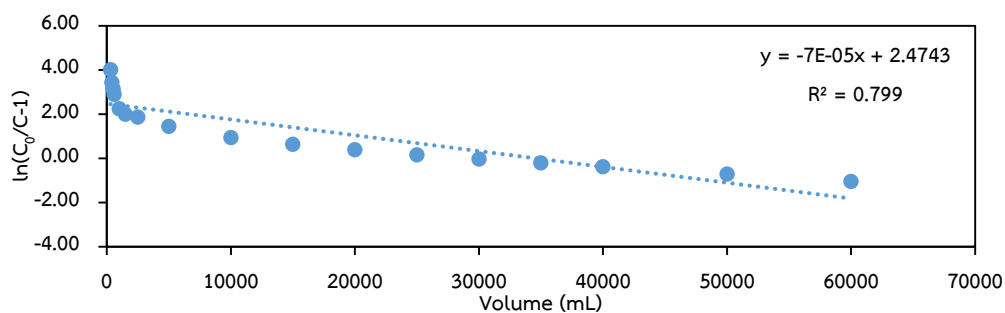
รูปที่ ค.4 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ II



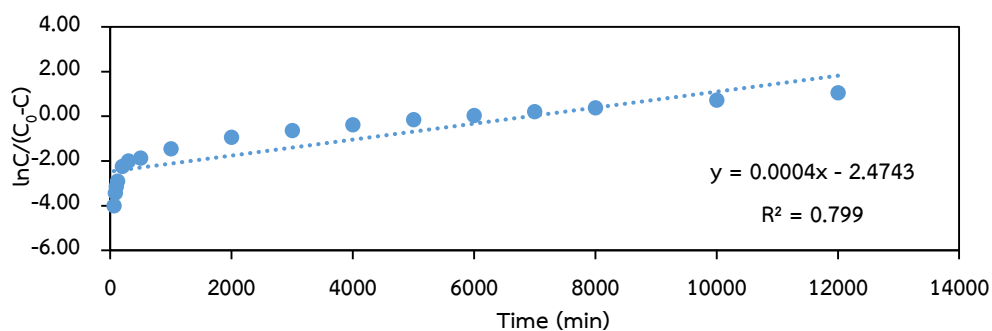
รูปที่ ค.5 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ II



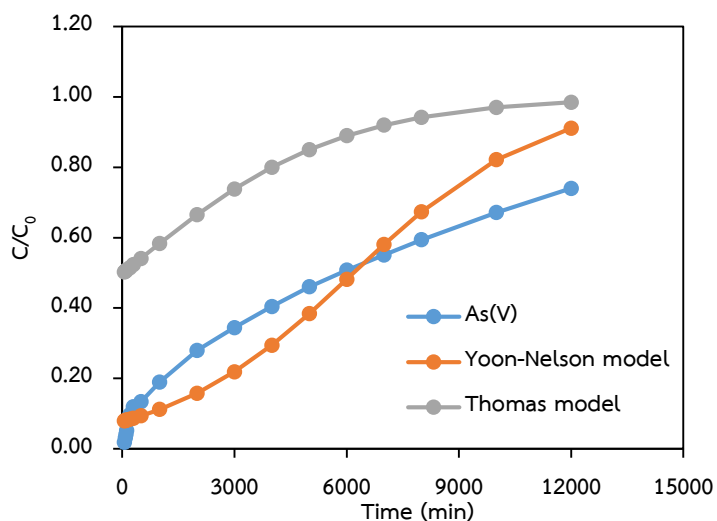
รูปที่ ค.6 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ II เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson



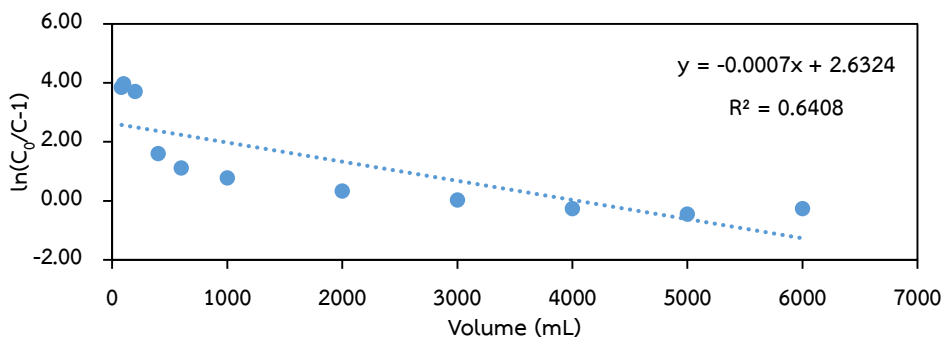
รูปที่ ค.7 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ III



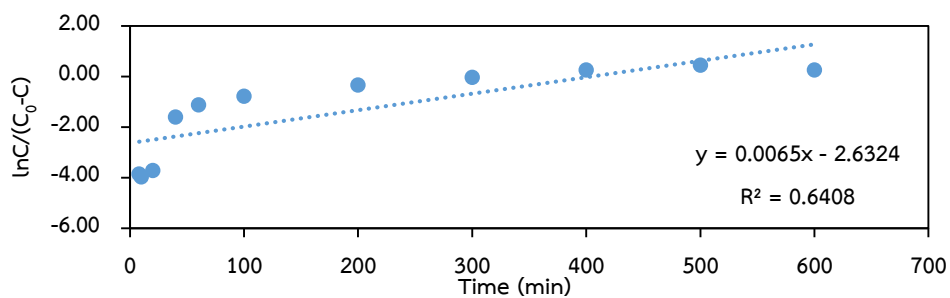
รูปที่ ค.8 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ III



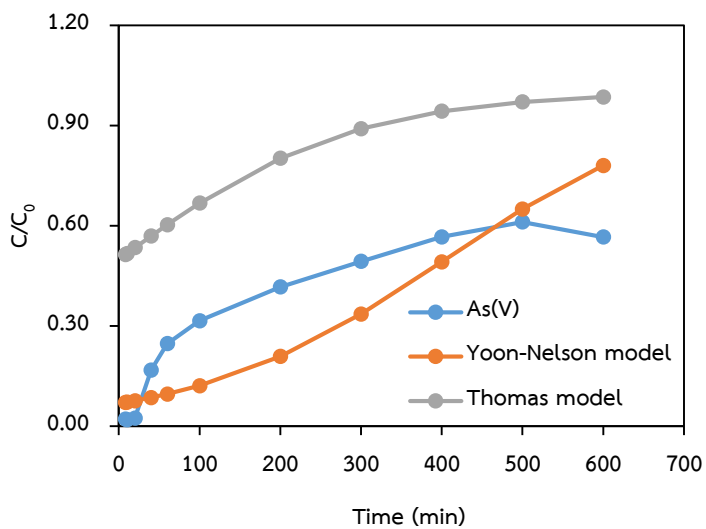
รูปที่ ค.9 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ III เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson



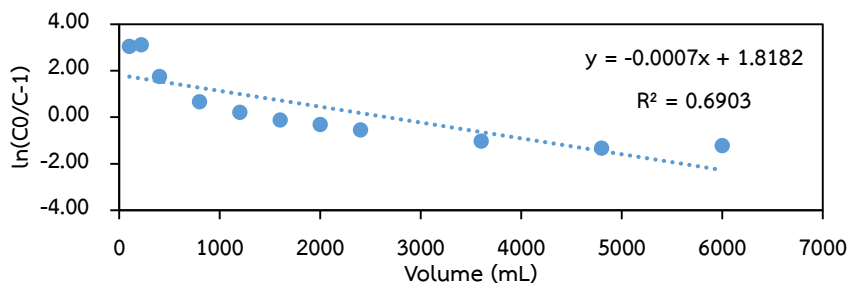
รูปที่ ค.10 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ IV



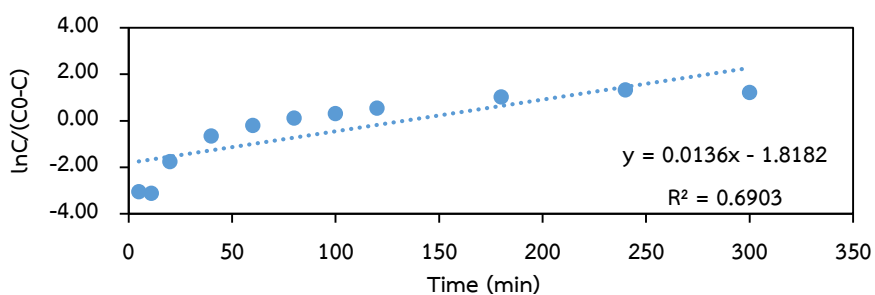
รูปที่ ค.11 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ IV



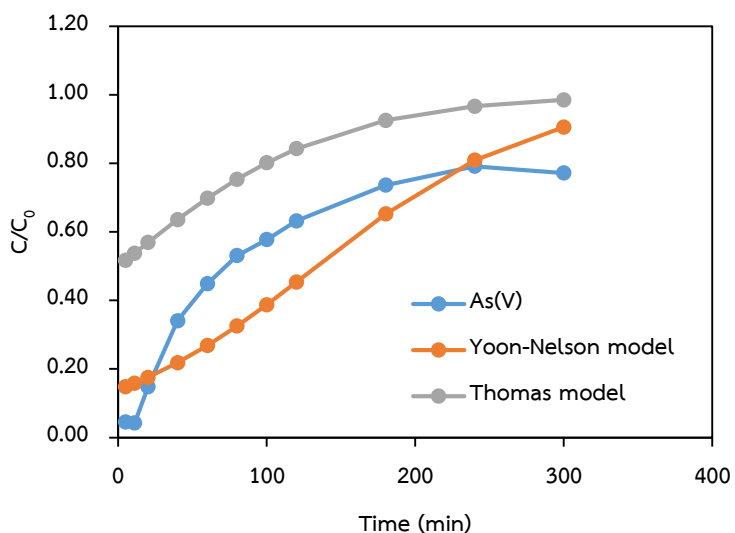
รูปที่ ค.12 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ IV เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson



รูปที่ ค.13 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Thomas ในภาวะทดสอบ V



รูปที่ ค.14 กราฟที่ได้จากการพลอตสมการเส้นตรงตามแบบจำลอง Yoon-Nelson ในภาวะทดสอบ V



รูปที่ ค.15 กราฟเบรคทรูของ As(V) จากภาวะทดสอบ V เปรียบเทียบกับแบบจำลอง Thomas และแบบจำลอง Yoon-Nelson



นิชาภา สุพรรณฝ้าย, จักรภพ พันธศรี, วิษณุ แทนบุญช่วย, มงคลชัย อิศวดิษฐเลิศ และ ภูมรินทร์ คำเดชศักดิ์. การศึกษาพื้นผิวแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนวัสดุบนเม็ดเซรามิก. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56, 17-24. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: 2561.

นิชาภา สุพรรณฝ้าย, จักรภพ พันธศรี, วิษณุ แทนบุญช่วย, มงคลชัย อิศวดิษฐเลิศ และ ภูมรินทร์ คำเดชศักดิ์. การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุบนแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ด้วยเทคนิคไมโครเอกซอาร์เอฟ. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ "มศว วิจัย" ครั้งที่ 11, 957-964. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2561.

Supannafai, N., Phanthasri, J., Tanboonchuy, V., Assawadithalerd, M., and Khamdahsag, P. Surface charge effects of manganese oxide octahedral molecular sieve-coated ceramic balls on arsenite oxidation. In the 2nd International Conference on Bioresources, Energy, Environment, and Materials Technology. Gangwon Province, Korea, 2018.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนิชาภา สุพรรณฝ้าย เกิดเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 3535 ณ โรงพยาบาล ชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ ปัจจุบันศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ปริญญาตรีจบจากสาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำเร็จการศึกษปริญญาตรี พ.ศ. 2558

ประสบการณ์ทำงาน เคยทำงานที่บริษัท คอนติเนนเทล-ฟาร์ม ในตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ เป็นเวลา 6 เดือน ทำหน้าที่วิเคราะห์วัตถุดิบในการสังเคราะห์ยา

ผลงานด้านวิชาการ ได้แก่ การประชุมระดับชาติมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56 เรื่อง “การศึกษาพื้นผิวของแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ที่เคลือบบนเม็ดเซรามิก” วันที่ 30 มกราคม-2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561

การประชุมระดับชาติมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ “มศว วิจัย ครั้งที่ 11” เรื่อง “การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนแมงกานีสออกไซด์และโครงข่ายเหล็ก-อินทรีย์ด้วยเทคนิคไมโครเอกซ์อาร์เอฟ” วันที่ 29-30 มีนาคม พ.ศ. 2561

และการประชุมระดับนานาชาติ ประเทศเกาหลี “the 2nd International Conference on Bioresources, Energy, Environment, and Materials Technology” เรื่อง “Surface charge effects of manganese oxide octahedral molecular sieve-coated ceramic balls on arsenite oxidation” วันที่ 11-13 มิถุนายน พ.ศ. 2561