



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การดัดแปรผิวนาโนซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสำหรับการดูดซับอาร์ซีเนต

Modification of silica nanoparticles from rice husk with iron-copper oxides for arsenate adsorption

ชื่อนิสิต นางสาวชิตชนก โพธิ์ศรี

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การดัดแปรผิวนาโนซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วย
ออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสำหรับการดูดซับอาร์ซีเนต

Modification of silica nanoparticles from rice husk with iron-copper oxides for arsenate adsorption

โดย

นางสาวชิตชนก โพธิ์ศรี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

โครงการ การตัดแปรมีวนาโนซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสำหรับการ
การดูดซับอาร์ซีเนต

โดย นางสาวชิตชนก โพธิ์ศรี

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

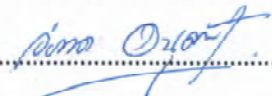
คณะกรรมการสอบโครงการ


..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม)


..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วิภาค อนุตรศักดิ์)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

..... หัวหน้าภาควิชาเคมี

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

วันที่ เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การดัดแปรผิวนาโนซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง
สำหรับการดูดซับอาร์ซีนิต

ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวชิตชนก โพธิ์ศรี เลขประจำตัว 5633064623

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบ จากนั้นดัดแปรซิลิกาที่ได้ด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับอาร์ซีนิตในน้ำเสีย พิสูจน์เอกลักษณ์ซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยเทคนิค FTIR, SEM, TEM, XRD, XRF, PSD และ N_2 adsorption ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าแกลบเป็นซิลิกาอสัณฐานมีความบริสุทธิ์สูงถึง 97% ขนาดอนุภาคของซิลิกามีค่าประมาณ 52 ไมโครเมตร ปริมาตรของโพรงเท่ากับ 0.323 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวทั้งหมดคิดเป็น 671 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรง 1.93 นาโนเมตร ซึ่งการดัดแปรซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบทำได้โดยนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มาตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและทองแดง และพิสูจน์เอกลักษณ์วัสดุที่ได้ด้วยเทคนิค SEM, EDS และ XRD สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์ซีนิตของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าปริมาณอาร์ซีนิตสูงสุดที่ถูกดูดซับบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีค่าเท่ากับ 9.3 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยกระบวนการดูดซับเกิดได้ดีภายใต้สภาวะพีเอชเท่ากับ 3 และใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 24 ชั่วโมง การเข้าสู่สมดุลเป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบอันดับสองเทียม และไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นไปตามสมดุลการดูดซับของแบบจำลองฟรุนดลิช และสามารถใช้ซิลิกาที่ดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงในการกำจัดอาร์ซีนิตในน้ำเสียตัวอย่างจริง

คำสำคัญ: การดูดซับ, อาร์ซีนิต, ออกไซด์ของเหล็กและทองแดง, ซิลิกา, เถ้าแกลบ

Project Title Modification of silica nanoparticles from rice husk with iron-copper oxides
for arsenate adsorption
Student Name Miss Chidchanok Phosri Student ID 5633064623
Advisor Name Assistant Professor Apichat Imyim, Ph.D.
Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2016

Abstract

In the research, silica particles were prepared from rice husk ash and then they were modified with iron-copper oxides for arsenate adsorption in wastewater. The prepared silica was characterized by FTIR, SEM, TEM, XRD, XRF, PSD and N₂ adsorption. The results exhibited that silica was amorphous and showed approximately 97% purity. Particles size of silica was about 52 μm . The surface area, pore volume, and pore diameters of silica are 671 m^2/g , 0.323 cm^3/g , and 1.93 nm, respectively. The modification of silica with iron-copper oxides was prepared by co-precipitation technique between silica and iron-copper oxides. The modified silica was characterized by SEM, EDS and XRD. For removal efficiency of arsenate by the modified adsorbent. The results exhibited that the maximum arsenate adsorption capacity is 9.3 mg/g at pH 3. The adsorption isotherm data gave better fit to the Freundlich model. Adsorption equilibrium time was 24 hours and kinetic data was fitted with pseudo-second-order kinetic model. Finally, the modified adsorbent was applied to remove arsenate from real wastewater samples with satisfactory results.

Keywords: adsorption, arsenate, iron-copper oxides, silica, rice husk ash

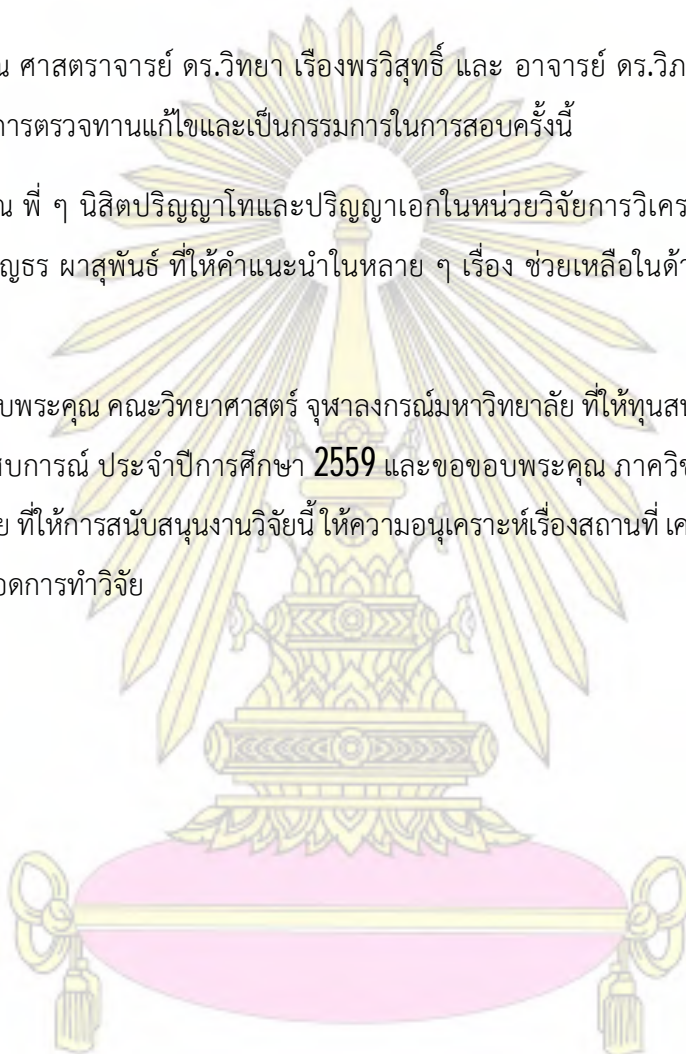
กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ไม่สามารถประสบผลสำเร็จ หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ในการทำวิจัย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ และ อาจารย์ ดร.วิภาค อนุตรศักดิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าในการตรวจทานแก้ไขและเป็นกรรมการในการสอบครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกในหน่วยวิจัยการวิเคราะห์เชิงสภาวะแวดล้อม (EARU) โดยเฉพาะพี่วิริยุทธ ผาสุพันธ์ ที่ให้คำแนะนำในหลาย ๆ เรื่อง ช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2559 และขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ อำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ.....	1
1.2 แนวเหตุผลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	4
1.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 2 การทดลอง	15
2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	15
2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	16
2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	16
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	16
2.5 การเตรียมรีเอเจนต์.....	16
2.6 วิธีการทดลอง	17
บทที่ 3 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	22
3.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบ.....	22
3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ	23
3.3 การดัดแปรซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง	29
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง	29
3.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีนิตในสารละลายโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปร ด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง	32

3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงใน
 น้ำตัวอย่างจริง.....38

บทที่ 4 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ40

 4.1 สรุปผลการทดลอง.....40

 4.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ.....41

เอกสารอ้างอิง.....42

ประวัติผู้วิจัย.....46



สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1.1	กรดซิลิสิก (silicic acid).....	5
รูปที่ 1.2	โครงสร้างของซิลิกา.....	6
รูปที่ 1.3	สปีชีส์ของอาร์ซีเนตที่พีเอชต่าง ๆ ของสารละลาย	7
รูปที่ 1.4	Type I Adsorption Isotherm.....	12
รูปที่ 1.5	Type II Adsorption Isotherm.....	12
รูปที่ 1.6	Type III Adsorption Isotherm.....	13
รูปที่ 1.7	Type IV Adsorption Isotherm.....	13
รูปที่ 1.8	Type V Adsorption Isotherm.....	14
รูปที่ 3.1	เก้าแก้ว (a) สารละลายโซเดียมซิลิเกตก่อน (b) และหลังการสะเทินกับกรดไฮโดรคลอริก (c) ซิลิกา ที่เตรียมจากเก้าแก้วก่อนบด (d) และหลังบด (e).....	22
รูปที่ 3.2	IR Spectrum ของเก้าแก้ว (a) และซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว (b).....	23
รูปที่ 3.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้วที่กำลังขยาย (a) 80,000 เท่า และ (b) 100,000 เท่า	24
รูปที่ 3.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว.....	24
รูปที่ 3.5	XRD patterns ของเก้าแก้ว (a) และ ซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว (b).....	25
รูปที่ 3.6	Particle size distribution ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว	26
รูปที่ 3.7	Nitrogen adsorption desorption isotherm ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว.....	27
รูปที่ 3.8	BJH pore size distribution ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้ว.....	28
รูปที่ 3.9	ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงก่อนบด (a) และหลังบด (b)	29
รูปที่ 3.10	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้วผ่านการตัดแปร ด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงที่กำลังขยาย (a) 80,000 เท่า และ (b) 100,000 เท่า	29
รูปที่ 3.11	ภาพถ่าย EDS elemental mapping ของซิลิกาที่เตรียมจากเก้าแก้วผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ ของเหล็กและทองแดง.....	30
รูปที่ 3.12	XRD patterns (a) ของออกไซด์ของเหล็กและทองแดง และ (b) ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วย ออกไซด์ของเหล็กและทองแดง.....	31
รูปที่ 3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ ประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ของอาร์ซีเนต.....	32
รูปที่ 3.14	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (ชั่วโมง) และประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ของอาร์ซีเนต.....	33

รูปที่ 3.15 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (ชั่วโมง) และค่า $\log(q_e - q_t)$ ของอาร์ซีเนต.....34

รูปที่ 3.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (ชั่วโมง) และ ค่า t/q_t (นาที-กรัมต่อมิลลิกรัม) ของอาร์ซีเนต34

รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่ถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ค่าปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนต (มิลลิกรัมต่อกรัม).....35

รูปที่ 3.18 ไอโซเทิร์มการดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง สร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์.....36

รูปที่ 3.19 ไอโซเทิร์มการดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง สร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองฟรุนดลิช37

รูปที่ 3.20 น้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 1(a), 2(b) และ 3(c).....38



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
ตารางที่ 2.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	16
ตารางที่ 3.1	ชนิดและปริมาณของธาตุในถ้ำเกลือและซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำเกลือ.....	26
ตารางที่ 3.2	พื้นที่ผิว ปริมาตรของโพรงและขนาดโพรงของซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำเกลือ.....	28
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรของจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order.....	35
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรของไอโซเทิร์มการดูดซับของแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรุนดลิช.....	37
ตารางที่ 3.5	แสดงปริมาณความเข้มข้นของอาร์ซีนิตทั้งก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย ออกไซด์ของเหล็กและทองแดงและประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ในน้ำตัวอย่างจริง.....	38



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันพบปัญหาการปนเปื้อนของสารหนูหรืออาร์เซนิกในแหล่งน้ำจำนวนมาก โดยสาเหตุการปนเปื้อนของสารหนูมาจากอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง กระจกและการผลิตเซรามิก [1] ที่ปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำและพื้นดิน สารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่เสถียรมี 2 รูปแบบ คือ อาร์เซนไนต์ ($As(III)$) และอาร์ซีเนต ($As(V)$) หากร่างกายได้รับสารหนูในปริมาณมากหรือมีการสะสมในร่างกาย จะส่งผลเสียต่อสุขภาพโดยจะทำให้เกิดโรคมะเร็งของปอด ผิวหนัง ไต ตับ และทำลายการทำงานของระบบหัวใจ หลอดเลือดและประสาท [2] ซึ่งองค์การอนามัยโลกกำหนดระดับการปนเปื้อนสูงสุดของสารหนูในน้ำดื่มเท่ากับ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร [3] การกำจัดสารหนูออกจากแหล่งน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญ ในปัจจุบันมีกำจัดสารหนูหลากหลายวิธี ตัวอย่างเช่น การแลกเปลี่ยนไอออน [4] กระบวนการนาโนฟิลเทรชัน [5] การออสโมซิสผันกลับ [6] การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี [7] และการดูดซับ ซึ่งการดูดซับเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีต้นทุนต่ำและเป็นวิธีที่ง่ายสามารถใช้ได้ในบ้านเรือนตลอดจนอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

ในการดูดซับอาร์ซีเนต มีการใช้ตัวดูดซับหลากหลาย เช่น เหล็ก แอกติเวเตดอะลูมินา โพลีเมอร์ไฮบริด ออกไซด์ของแมงกานีส ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมและเหล็ก [8] เป็นต้น แต่ตัวดูดซับที่กล่าวมาข้างต้นนี้มักมีราคาสูง สัเคราะห์ได้ยาก บางชนิดไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือใช้แล้วเป็นการเพิ่มของเสีย ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นตัวดูดซับที่มีราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นที่ต้องการในปัจจุบัน ตัวดูดซับที่ได้จากวัสดุทางธรรมชาติอย่างถ้ำกลบจึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ [9]

ถ้ำกลบหรือถ้ำกลบถูกมองว่าเป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ในปีหนึ่ง ๆ มีปริมาณถ้ำกลบสูงถึงประมาณ 2.9×10^7 ตันทั่วโลก [10] การใช้ประโยชน์จากถ้ำกลบวิธีหนึ่งคือการใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งถ้ำกลบจะให้ปริมาณซีเถ้าหรือถ้ำกลบสูงกว่าปกติถึง 20% เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่น ๆ โดยในถ้ำกลบจะมีซิลิกามากถึง 92-95% ในปัจจุบันนิยมนำซิลิกามาปรับปรุงให้อยู่ในระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจากนาโนซิลิกาเป็นอนุภาคที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงเป็นผลให้นาโนซิลิกามีประสิทธิภาพในการดูดซับมาก [11] แต่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์ซีเนต มากยิ่งขึ้นกระบวนการดัดแปรผิวของนาโนซิลิกาจึงถูกนำมาใช้ โดยนิยมดัดแปรผิวของนาโนซิลิกาด้วยออกไซด์ของโลหะต่าง ๆ เช่น เหล็ก ไททาเนียม แมกนีเซียม เซอร์โคเนียม และทองแดง เป็นต้น จากโลหะที่กล่าวมาข้างต้นมีการศึกษาออกไซด์ของเหล็กมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์ซีเนต มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โลหะอีก

ชนิดที่น่าสนใจคือทองแดงเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์ซีเนตสูงในช่วงความเป็นกรดเบสที่แตกต่างจากเหล็ก [12] จึงเป็นเหตุจูงใจให้ผู้วิจัยสนใจการดัดแปรผิวนาโนซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเพื่อการดูดซับอาร์ซีเนตในแหล่งน้ำต่าง ๆ

1.2 แนวเหตุผลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซิลิกาถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เซรามิก ยาง ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวดูดซับ แต่เนื่องจากซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากสารเคมี มีราคาค่อนข้างสูง ขั้นตอนการสังเคราะห์ทำได้ยากและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นซิลิกาที่ได้จากวัสดุทางธรรมชาติอย่างเถ้าแกลบ จึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี นอกจากนี้ยังมีการรายงานเกี่ยวกับการแยกซิลิกาในเถ้าแกลบมาใช้งานด้วยวิธีที่หลากหลาย

Jing และคณะ [13] ทำการศึกษาการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าวด้วยระบบฟลูอิดIZED BED (fluidized bed) ผ่านการเผาเถ้าแกลบข้าวที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส โดยเถ้าแกลบและเถ้าแกลบข้าวที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้ถูกพาเข้าสู่ส่วนที่สอง ในส่วนที่สองนี้จะเป็นการนำเถ้าแกลบข้าวที่ยังผ่านการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์กลับมาเผาอีกครั้งเพื่อให้ได้เถ้าแกลบที่ผ่านกระบวนการเผาไหม้จนสมบูรณ์ในปริมาณที่มากขึ้น จากนั้นนำเถ้าแกลบที่ได้เข้าสู่กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นออกโดยการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกำจัดกากคาร์บอนด้วยการคั่ว (roasting) จะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากถึง 98% และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 110 ตารางเมตรต่อกรัม

Liou [14] ศึกษาการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยวิธีการสลายตัวด้วยความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอล (nonisothermal decomposition) ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน พบว่าเถ้าแกลบที่ถูกกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นโดยการล้างด้วยกรดก่อนนำไปเผา ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่ดีกว่าน้ำ ปริมาตรรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราการให้ความร้อนในการเผาไหม้ โดยซิลิกาที่ได้จะมีพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาคเท่ากับ 235 ตารางเมตรต่อกรัม 60 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 5.4 นาโนเมตร

Yalcin และ Sevinc [15] ศึกษาการใช้กรดและด่างในกระบวนการปรับสภาพเถ้าแกลบก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิสูงด้วยสารเคมี (chemical treatment) โดยทำการรีฟลักซ์เปรียบเทียบชนิดของกรดและเบสก่อนนำไปเผา ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก 3% กรดซัลฟิวริก 10% และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3% หลังจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำการเปรียบเทียบซิลิกาที่ผ่านการล้างและไม่ผ่านการล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบว่าซิลิกาที่ให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงที่สุดคือซิลิกาที่ได้จากการล้างเถ้าแกลบด้วยกรดไฮโดรคลอริก 3% โดยซิลิกาที่ได้มีความบริสุทธิ์มากถึง 99.66% มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 321 ตารางเมตรต่อกรัม มีขนาดอนุภาคเท่ากับ

0.030 ถึง 100 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 4.5 ไมโครเมตร นอกจากนี้ปริมาตรรูพรุนของซิลิกาจะมีค่าเท่ากับ 4.7297 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

Jaroenworuluck และคณะ [16] ศึกษาการสังเคราะห์นาโนซิลิกาจากแก้วแกลบผ่านกระบวนการโซลเจล พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดอนุภาค โดยการรีฟลักซ์แก้วแกลบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 9 ชั่วโมง และเจือจางด้วยน้ำ จากนั้นนำไปสะเทินด้วยกรดซัลฟิวริกจะได้ซิลิกา และล้างซิลิกาด้วยน้ำเพื่อกำจัดเกลือโซเดียมซัลเฟตออก พบว่าซิลิกาที่ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 273.4 ตารางเมตรต่อกรัม มีขนาดรูพรุนและขนาดอนุภาคเท่ากับ 10.57 นาโนเมตรและ 19.8 นาโนเมตร ตามลำดับ

Liou และ Yang [9] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์นาโนซิลิกาที่สกัดจากแก้วแกลบด้วยสารละลายเบส โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ได้จากการละลายซิลิกาในแก้วแกลบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 0.15 โมลต่อลิตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบชนิดของกรดที่ใช้ในการสะเทินสารละลายโซเดียมซิลิเกตคือ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดซिटริก และกรดออกซาลิก พบว่ากรดไฮโดรคลอริกให้ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมากกว่ากรดชนิดอื่น พีเอชที่เหมาะสมในการเกิดนาโนซิลิกาเท่ากับ 3 อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50 °C เวลาที่เหมาะสมคือ 12 ชั่วโมง นาโนซิลิกาที่ได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 634 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.811 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

การกำจัดอาร์ซีเนตในน้ำเสียโดยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง มีต้นทุนต่ำและเป็นวิธีที่ง่าย โดยมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับอาร์ซีเนตด้วยตัวดูดซับที่หลากหลาย เช่น

Loeppert และคณะ [17] ศึกษาการดูดซับอาร์ซีเนตและอาร์ซีเนต บนตัวดูดซับออกไซด์ของเหล็ก พบว่าออกไซด์ของเหล็กที่สังเคราะห์ได้มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Ferrihydrite) พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 4.6 ซึ่งในช่วงพีเอชนี้อาร์ซีเนตจะอยู่ในรูปของ H_2AsO_4^- การดูดซับเกิดผ่านการยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้จลนพลศาสตร์การดูดซับของอาร์ซีเนตเป็นแบบ parabolic diffusion และไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์

Reddy และ Martinson [18] ทำการศึกษาการดูดซับอาร์ซีเนตและอาร์ซีเนตด้วยอนุภาคขนาดนาโนของออกไซด์ของทองแดง พบว่าออกไซด์ของทองแดงที่สังเคราะห์ได้มีสูตรโครงสร้างคือ $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ (paratacamite) มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 85 ตารางเมตรต่อกรัม และอนุภาคขนาดนาโนของออกไซด์ของทองแดงมีขนาดเท่ากับ 12 ถึง 18 นาโนเมตร พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีเนตเป็นช่วงกว้างตั้งแต่พีเอช 6 ถึง 10 และการ

ดูดซับอาร์ซีเนตจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ส่วนไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ และปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนตด้วยอนุภาคนาโนของออกไซด์ของทองแดงเท่ากับ 22.6 มิลลิกรัมต่อกรัม

Zhang และคณะ [19] ศึกษาการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายด้วยอนุภาคนาโนของออกไซด์ของเหล็กและทองแดง พบว่าอัตราส่วนระหว่างเหล็กต่อทองแดงที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเพื่อการดูดซับฟอสเฟตคือ 2 ต่อ 1 และพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับเท่ากับ 5 ซึ่งในช่วงพีเอชนี้ฟอสเฟตจะอยู่ในรูปของ $H_2PO_4^-$ การดูดซับเกิดผ่านกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์และการยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิต จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) และไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ ปริมาณการดูดซับของฟอสเฟตในสารละลายด้วยอนุภาคนาโนของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเท่ากับ 39.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งฟอสเฟตในช่วงการแตกตัวในพีเอชต่าง ๆ ใกล้เคียงกับอาร์ซีเนต

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว จึงเป็นเหตุผลให้ทางคณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำถ้ำกลบเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการใช้เป็นตัวดูดซับที่ได้จากวัสดุทางธรรมชาติเพื่อกำจัดอาร์ซีเนตออกจากน้ำเสีย โดยการนำถ้ำกลบมาสังเคราะห์เป็นนาโนซิลิกาแล้วดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์ซีเนตออกจากน้ำเสีย นอกจากนี้เป็นการลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้ตัวดูดซับที่ย่อยสลายได้ยากในปัจจุบันด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำกลบ
2. ดัดแปรซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง
3. ศึกษาการดูดซับอาร์ซีเนตในน้ำเสียโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำกลบ จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการดัดแปรผิวด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเพื่อนำไปใช้เป็นตัวดูดซับอาร์ซีเนตในน้ำเสีย ศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์ซีเนตของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงในระบบแบทช์ และศึกษาการใช้ประโยชน์จริงในการใช้ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงดูดซับอาร์ซีเนตในน้ำเสียตัวอย่างจริง

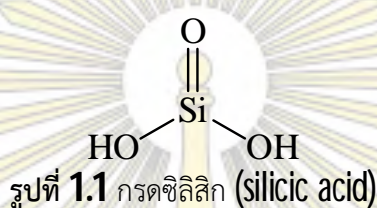
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

ได้ซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงที่มีความสามารถในการดูดซับอาร์ซีเนต

1.6 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 แกลบและเถ้าแกลบ [20]

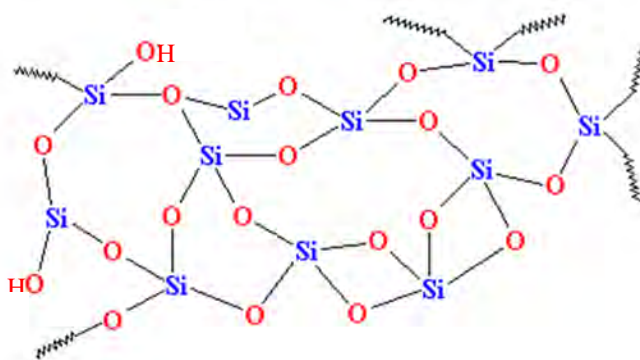
แกลบหรือเปลือกข้าวเป็นส่วนนอกสุดของเมล็ดข้าวทำหน้าที่ป้องกันและครอบคลุมด้านนอกทั้งหมด แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการสีข้าวโดยเมื่อสีเอาชั้นแกลบออกจะได้ข้าวกล้อง แกลบจะมีน้ำหนักประมาณ 28% ของข้าวเปลือก องค์ประกอบทางเคมีของแกลบจะแตกต่างกันไปในสภาพภูมิศาสตร์และภูมิอากาศ โดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอนและซิลิกา ซึ่งซิลิกาในแกลบได้มาจากการดูดซึมกรดซิลิสิก (silicic acid) จากดินผ่านทางรากของข้าวและนำสะสมในชั้นผนังเซลล์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง



ส่วนใหญ่แกลบจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากสามารถให้พลังงานจากการเผาไหม้ได้ใกล้เคียงกับไม้ จึงสามารถนำมาทดแทนเชื้อเพลิงจากไม้ได้เป็นอย่างดี หลังจากการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงแล้วจะได้เถ้าแกลบออกมาซึ่งมีปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่น ๆ โดยแกลบจะให้ปริมาณเถ้าออกมาประมาณ 20% ของแกลบ องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกามากถึง 92-95% เถ้าแกลบมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี มีจุดหลอมเหลวสูง มีความพรุน มีน้ำหนักเบาและมีพื้นที่ผิวภายนอกสูงมาก เนื่องจากเถ้าแกลบมีราคาถูกลงและหาง่าย หลายอุตสาหกรรมจึงนำเถ้าแกลบไปใช้ประโยชน์ ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีต อุตสาหกรรมการผลิตอิฐทนไฟ สารปรับปรุงดิน และบางอุตสาหกรรมนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

1.6.2 ซิลิกา [21]

ซิลิกาเป็นโครงสร้างร่างแหของกรดซิลิสิก (silicic acid) มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ โดยจะมีการจัดเรียงตัวของซิลิคอนและออกซิเจนเป็นแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ผิวของซิลิกาจะประกอบไปด้วยหมู่ silanol (Si-OH) หรือหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวซิลิกาและพันธะ siloxane (Si-O-Si) ซึ่งมีจำนวนมาก ทำให้ซิลิกามีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ซิลิกามีรูพรุนจำนวนมากและมีพื้นที่ผิวสูง มีความคงตัวทางเคมีและมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ซิลิกาจึงถูกนิยมนำไปใช้เป็นตัวดูดซับหรือเป็นตัวรองรับสารชนิดอื่นเพื่อใช้ในการดูดซับหรือเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปการดูดซับบนซิลิกาจะเป็นการดูดซับทางกายภาพเกิดผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (H-bond)



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของซิลิกา [22]

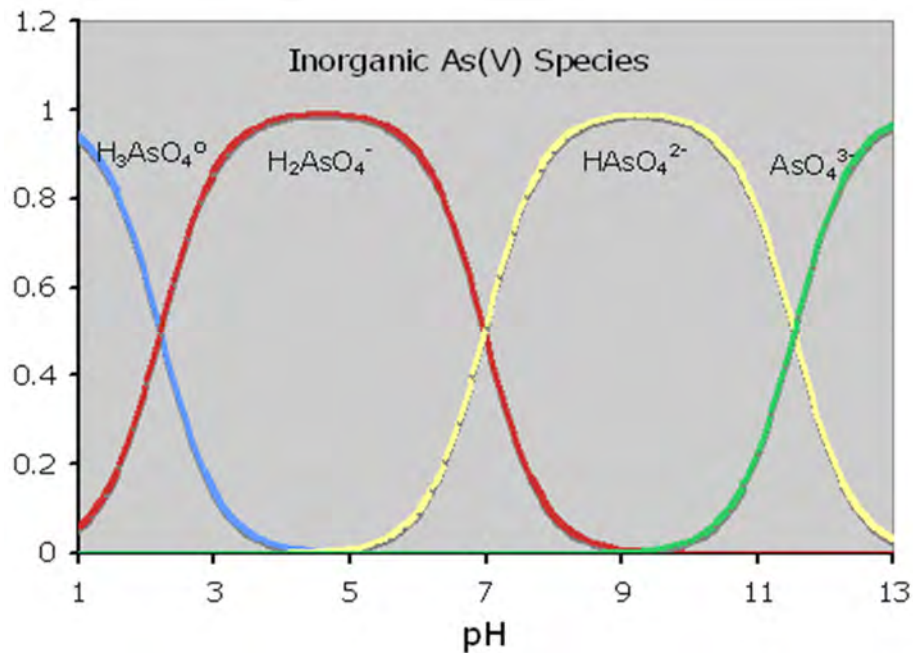
ซิลิกาแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ซิลิกาผลึก (crystalline silica) เป็นซิลิกาที่มีการจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ มีการจัดเรียงรูพรุนอย่างมีระเบียบ และซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) เป็นซิลิกาที่มีการจัดเรียงกันแบบไม่เป็นโครงร่างผลึก มีขนาดรูพรุนกระจายในช่วงกว้าง

1.6.3 ออกไซด์ของเหล็กและทองแดง (iron-copper oxides) [23]

ออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของทองแดงเป็นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิด เช่น ไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ ทำให้มีประจุบนพื้นผิวจำนวนมาก จึงสามารถนำไปใช้ในการดูดซับสารที่มีประจุได้ โดยออกไซด์ของเหล็กและออกไซด์ของทองแดงจะมีโครงสร้างแตกต่างกันไปตามการบรรจุออกซิเจนและไฮดรอกไซด์ในช่องเตตระฮีดรัลและช่องออกตะฮีดรัล เช่น ferrihydrite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) paratacamite [$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$] malachite [$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$] และ cuprite (Cu_2O)

1.6.4 อาร์ซีนิต [24,25]

อาร์เซนิกหรือสารหนูที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำที่เสถียรมี 2 รูปแบบ คือ อาร์ซีนิต (As(III)) และ อาร์ซีนิต (As(V)) โดยส่วนใหญ่จะพบอาร์เซนิกในแหล่งน้ำอยู่ในรูปของอาร์ซีนิตมากที่สุด ซึ่งมีอยู่ในหลายสปีชีส์ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลายดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 สปีชีส์ของอาร์ซีนิตที่พีเอชต่าง ๆ ของสารละลาย [26]



สมการที่ 1.1, 1.2 และ 1.3 แสดงการแตกตัวของกรดอาร์ซีนิก 3 ขั้นตอน ในธรรมชาติจึงพบอาร์ซีนิตอยู่ 4 สปีชีส์ (species) คือ H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-}

การสัมผัสกับสารหนูหรือได้รับสารหนูเข้าร่างกายอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพที่ได้หลากหลาย เช่น ทำให้เกิดโรคมะเร็งของปอด ผิวหนัง ไต ตับ และทำลายการทำงานของระบบหัวใจ หลอดเลือดและประสาท ซึ่งองค์การอนามัยโลกกำหนดระดับการปนเปื้อนของสารหนูในน้ำดื่มไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร

1.6.5 การดูดซับ

1.6.5.1 การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) [27] คือการดูดซับที่เกิดขึ้นผ่านแรงที่เกี่ยวข้องคือแรงระหว่างโมเลกุล หรือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรง

กระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) คุณลักษณะของการดูดซับทางกายภาพ ได้แก่

- เป็นปรากฏการณ์ที่เป็นลักษณะทั่วไปและเกิดขึ้นในระบบของแข็งกับแก๊สหรือของเหลวใด ๆ แม้ว่าจะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลมาเกิดขึ้นร่วมด้วย ซึ่งเกิดขึ้นจากสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ
- การรบกวนของการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในหรือ **electronic state** ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นได้น้อย
- คุณสมบัติของสารถูกดูดซับยังคงเหมือนเดิมเมื่อถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับแล้วและจะไม่ถูกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีเมื่อเกิดการหลุดออกจากตัวดูดซับ (**desorption**)
- การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย เนื่องจากความร้อนของการดูดซับจะแปรผันตรงกับความแรงของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับ การดูดซับประเภทนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
- การดูดซับเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับได้โดยตรงและสามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (**multilayer adsorption**)

1.6.5.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (**chemisorption**) [27] เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง คุณลักษณะของการดูดซับทางเคมี ได้แก่

- เป็นปรากฏการณ์ที่มีความจำเพาะเจาะจงทางเคมี
- คุณสมบัติทางเคมีของตัวถูกดูดซับอาจเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากเกิดการแตกตัวเมื่ออยู่บนผิวของตัวดูดซับหรือการเกิดปฏิกิริยาบนผิวตัวดูดซับ จะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีเมื่อเกิดการหลุดออกจากตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีนี้เป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้
- การดูดซับประเภทนี้ต้องการพลังงานกระตุ้น ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง
- การดูดซับประเภทนี้เป็นได้ทั้งกระบวนการคายความร้อนหรือดูดความร้อน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

- การดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เนื่องจากเกิดการดูดซับผ่านพื้นระเคมีบริเวณหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับเท่านั้น

1.6.5.3 ขั้นตอนการดูดซับ

กลไกการดูดซับเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลหรือการแพร่ของสารละลายไปสู่ตัวดูดซับซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ [21]

1. **Film diffusion** หรือ **external diffusion** คือการที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับ และผ่านชั้นฟิล์มของเหลวบนตัวดูดซับเข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ
2. **Internal diffusion** หรือ **intraparticle diffusion** คือเป็นการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ
3. **Mass action** คือการเกิดการดูดซับของสารหรือการหลุดออกของสารจากหมู่แอคทีฟบนผิวของตัวดูดซับ

1.6.5.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) [28] เป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบว่าอัตราการดูดซับเกิดขึ้นเร็วหรือช้าและทำให้ทราบว่าขั้นตอนไหนเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ (rate determining step) แบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับมีดังนี้

1.6.5.4.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง

สมมติฐานจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) คืออัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับจำนวนพื้นผิวที่ว่างของตัวดูดซับ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของสมการอัตราเร็วอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1.4)$$

เมื่อ q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ เวลา t (min)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ สมดุล

k_1 = Pseudo-first-order rate constant (min^{-1})

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order มีจุดตัดแกน $\log(q_e - q_t)$ เป็น $\log q_e$ และความชันนำมาหาค่า k_1 ได้

1.6.5.4.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสอง

สมมติฐานจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) คือ ขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับอาจเป็นขั้นตอนที่มีการดูดซับทางเคมีที่เกิดผ่านการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของสมการอัตราเร็วอันดับสองเป็นดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (1.5)$$

เมื่อ q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ เวลา t (min)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ สมดุล

k_2 = Pseudo-second-order rate constant (g/mg.min)

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order มีจุดตัดแกน t/q_t เป็น $1/k_2 q_e^2$ และค่าความชันนำมาหาค่า q_e ได้

1.6.5.5 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) [29] เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของสารละลายในภาวะสมดุล (C_e) ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทิร์มการดูดซับแบ่งออกได้ ดังนี้

1.6.5.5.1 ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ คือ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) โมเลกุลของสารถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน และเมื่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสาร ทำให้สามารถหาปริมาณสารสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ (q_m) พลังงานการดูดซับจะมีค่าเท่ากันและคงที่ในทุกบริเวณที่มีการดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับสารด้วยแรงกระทำที่ใกล้เคียงกัน (homogeneous surface) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทิร์มของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลพบว่า สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์ได้ดังสมการที่ 1.6

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (1.6)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

q_m = ปริมาณสารสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

K_L = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (L/mg)

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์มีจุดตัดแกน C_e/q_e เป็น $1/q_m K_L$ และมีความชัน เท่ากับ $1/q_m$

1.6.5.5.2 ไอโซเทิร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

สมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทิร์มแบบฟรุนดลิช คือ การดูดซับเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) การดูดซับเกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับสารด้วยแรงกระทำที่มีความแรงแตกต่างกัน (heterogeneous surface) โดยความสัมพันธ์ระหว่างของปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของสารละลายในภาวะสมดุล (C_e) เป็นความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล (exponential relationship) จากการศึกษาไอโซเทิร์มของฟรุนดลิชที่สภาวะสมดุลพบว่า สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองฟรุนดลิชดังสมการที่ 1.7

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (1.7)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

q_m = ปริมาณสารสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

K_F และ n = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช

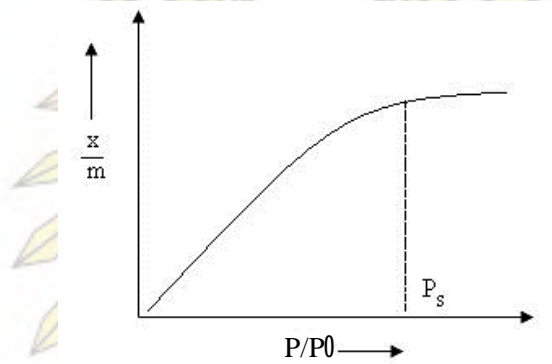
เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองฟรุนดลิช โดยมีจุดตัดแกน $\log q_e$ เป็น $\log K_F$ สามารถนำมาหาค่า K_F ได้ และความชันของกราฟเท่ากับ $1/n$

1.6.5.6 BET adsorption Isotherm [30,31]

ไอโซเทิร์มการดูดซับของ Brunauer-Emmett-Teller เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่กับความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) โดยความดันสัมพัทธ์สามารถเป็นได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ไอโซเทิร์มการดูดซับของ Brunauer-Emmett-Teller สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

(1) Type I Adsorption Isotherm

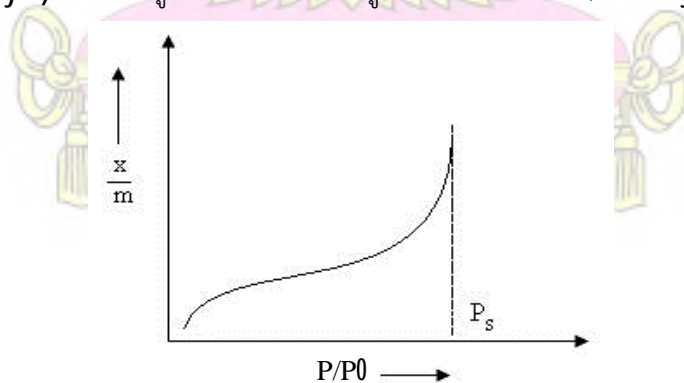
ไอโซเทิร์มของการดูดซับรูปแบบที่ 1 แสดงถึงการเกิดการดูดซับของสารดูดซับคุณสมบัติของโพรงแบบไมโครพอร์ส (ขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร) เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และสามารถอธิบายได้โดยใช้ Langmuir adsorption isotherm ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 Type I Adsorption Isotherm

(2) Type II Adsorption Isotherm

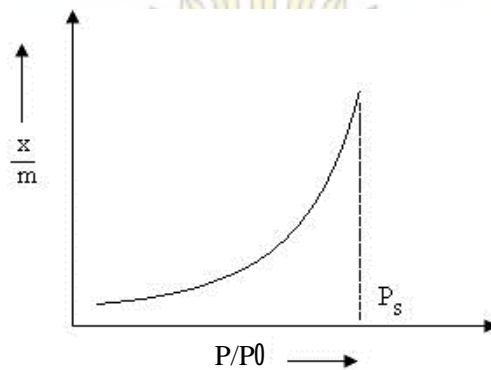
ไอโซเทิร์มของการดูดซับรูปแบบที่ 2 แสดงถึงการเกิดการดูดซับของสารดูดซับที่มีคุณสมบัติของโพรงไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือมีโพรงขนาดใหญ่ (macroporous) โดยการดูดซับจะเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 Type II Adsorption Isotherm

(3) Type III Adsorption Isotherm

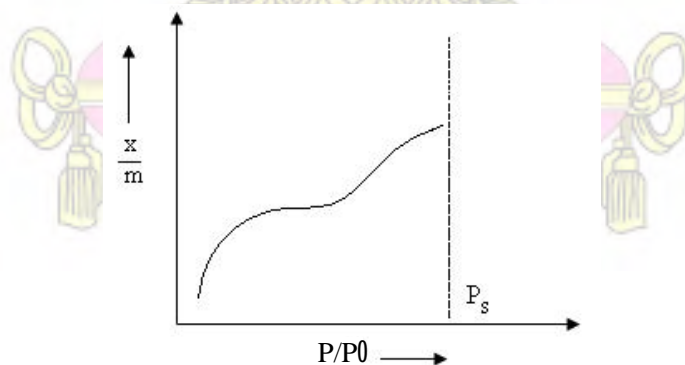
ไอโซเทิร์มของการดูดซับรูปแบบที่ 3 แสดงถึงการเกิดการดูดซับของสารดูดซับที่มีคุณสมบัติของโพรงไม่มีรูพรุน (nonporous) โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) เส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 แสดงให้เห็นว่าจำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นได้อย่างไม่จำกัด ดังแสดงในรูป 1.6



รูปที่ 1.6 Type III Adsorption Isotherm

(4) Type IV Adsorption Isotherm

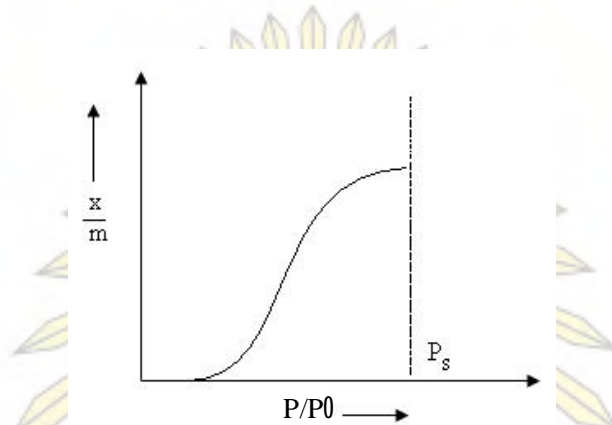
ไอโซเทิร์มของการดูดซับรูปแบบที่ 4 แสดงถึงการเกิดการดูดซับของสารดูดซับที่มีคุณสมบัติของโพรงแบบมีไซพอร์ส (ขนาด 2-50 นาโนเมตร) เป็นไอโซเทิร์มที่มีความคล้ายกับรูปแบบที่ 2 คือเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 Type IV Adsorption Isotherm

(5) Type V Adsorption Isotherm

ไอโซเทิร์มของการดูดซับรูปแบบที่ 5 แสดงถึงการเกิดการดูดซับของสารดูดซับที่มีคุณสมบัติของโพรงแบบมีไซพอร์ส (ขนาด 2-50 นาโนเมตร) เป็นไอโซเทิร์มรูปแบบพิเศษ เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย การคำนวณหาพื้นที่ผิวทำได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะดูดซับเสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.8 Type V Adsorption Isotherm



บทที่ 2

การทดลอง

วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินการเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีเอนต์ในสารละลายและในน้ำเสียตัวอย่าง โดยใช้ซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบซึ่งตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีดังนี้

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	รุ่น
Inductively coupled plasma optical emission spectrometer	iCAP 6500 DUO, Thermo Scientific
Fourier transformed infrared spectrometer	NICOLET 6700, Thermo Scientific
Scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometer	JSM-6610LV and X-MaxN 50
Transmission electron microscope	JEM-2100
X-ray fluorescence spectrometer	S8 Tiger
X-ray diffraction spectrometer	Dmax-2200 Ultima+, Rigaku
Laser particle size distribution analyzer	MALVERN, Mastersizer 3000
Hot plate stirrer	KiKA – WERKE
Micropipette	Brand
เครื่องชั่ง	TC-254, Denver Instrument Company
ตุ้บ	Memmert
Overhead mixer	ROTAX 6.8
pH meter	UltraBASIC-10, Denver

2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ผู้ผลิต
Sodium Hydroxide	MERCK
Hydrochloric acid 37% w/v	MERCK
Ferric chloride	Sigma-Aldrich
Copper(II) sulfate pentahydrate	Sigma-Aldrich
Arsenic standard solution	MERCK

2.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

แกลบข้าวเก็บจากโรงสีข้าว อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง

แกลบเตรียมได้จากการเผาแกลบข้าวในบรรยากาศ (free burning)

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีกเกอร์
2. ขวดกำหนดปริมาตร
3. กระชกนาฬิกา
4. ครกบด
5. ช้อนตักสาร
6. เดซิเคเตอร์
7. ตะแกรงวางหลอดทดลอง
8. หลอดพลาสติกพร้อมฝาปิด
9. หลอดหยด
10. กระดาษกรอง
11. กระดาษกรองเมมเบรนเนื้อไนลอน
12. Magnetic bar
13. Spatula
14. Syringe
15. Nylon Syringe Filter

2.5 การเตรียมรีเอเจนต์

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร
ซึ่ง sodium hydroxide 6.00 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนที่ต้มแล้ว ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติก
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร
ซึ่ง Sodium hydroxide 12.00 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนที่ต้มแล้ว ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติก

3. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
เติม hydrochloric acid 37% w/v ปริมาตร 9.85 มิลลิลิตร ลงในน้ำปราศจากไอออน ปรับ
ปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บในขวดพลาสติก

2.6 วิธีการทดลอง

2.6.1 การสังเคราะห์ซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

1. บดเถ้าแกลบด้วยการบดจนละเอียดระดับไมโครเมตร
2. ชั่งเถ้าแกลบที่ได้ 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 14.43 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์
3. นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกวนสารละลายด้วยความเร็วคงที่
4. ทิ้งสารละลายให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยใช้เครื่องบีบสุญญากาศ กรองซ้ำจนได้สารละลายใส
5. นำสารละลายส่วนที่กรองได้มากรองซ้ำด้วยเยื่อกรองเนื้อไนลอน โดยใช้เครื่องบีบสุญญากาศ
6. เจือจางสารละลายส่วนที่กรองได้จนมีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.15 โมลต่อลิตร
7. ปรับค่าพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก สารละลายจะเปลี่ยนเป็นอะควาเจล
8. นำอะควาเจลที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
9. นำเจลที่ได้มาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน เพื่อกำจัดเกลือออก
10. กรองของผสมด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยใช้เครื่องบีบสุญญากาศ
11. นำของแข็งที่ได้บนกระดาษกรอง ไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
12. นำของแข็ง (ซิลิกา) มาบดให้เป็นผงด้วยครกบด เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

2.6.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

พิสูจน์หาเอกลักษณ์ของซิลิกาด้วยเทคนิคต่อไปนี้

1. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
2. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transform Infrared spectrophotometer, FTIR)
4. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD)
5. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence ,XRF)

6. เทคนิคการวัดขนาดอนุภาคด้วยหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (Laser particle size distribution analyzer)
7. เทคนิคการดูดซับของไนโตรเจน (N_2 adsorption)

2.6.3 การดัดแปรของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

1. อบเพอร์ริคโลไรด์ที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. นำเพอร์ริคโลไรด์มาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในเดซิเคเตอร์ จากนั้นชั่งเพอร์ริคโลไรด์ 0.1000 กรัม ลงในปิเกตอร์
3. ชั่งซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ 1 กรัม ลงในปิเกตอร์
4. นำเพอร์ริคโลไรด์และซิลิกามาผสมรวมกันในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 3 มิลลิลิตร โดยกวนของผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วคงที่
5. เติมหอปเปอร์ซัลเฟตปริมาณ 0.084 กรัม ลงในของผสมในข้อ 4 กวนของผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วคงที่
6. ปรับค่าพีเอชของของผสมให้เท่ากับ 7.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลต่อลิตร
7. กวนของผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วคงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและตั้งของผสมทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. กรองของผสมด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 โดยใช้เครื่องปั๊มสุญญากาศ และล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออน
9. นำสารที่ได้บนกระดาษกรอง (ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง) ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. นำมาบดให้เป็นผงด้วยครกบด เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

2.6.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

พิสูจน์หาเอกลักษณ์ของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยเทคนิคต่อไปนี้

1. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD)

2.6.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีเนตในสารละลายโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

2.6.5.1 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

1. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลองพลาสติก
2. ปรับพีเอชสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ให้มีค่า 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก
3. ปิเปตสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) ที่พีเอชต่าง ๆ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองสารละลายด้วยเยื่อกรองเนื้อไนลอน ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง
6. นำสารละลายส่วนที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง ICP-OES
7. นำผลการทดลองไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับอาร์ซีเนตได้ดังสมการที่ 2.1

$$Q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \quad (2.1)$$

เมื่อ Q_e คือ ความสามารถในการดูดซับอาร์ซีเนตของซิลิกาที่ผ่านการตัดแปร ด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของอาร์ซีเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของอาร์ซีเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายอาร์ซีเนต (ลิตร)

W คือ น้ำหนักของซิลิกาที่ผ่านการตัดแปร ด้วยออกไซด์ของเหล็ก และทองแดง (กรัม)

8. นำผลการทดลองไปคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (% adsorption) ได้ดังสมการที่ 2.2

$$\% \text{ adsorption} = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในสารละลายเริ่มต้นก่อนการสกัด

C_f คือ ความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในสารละลายหลังการสกัดที่เวลาตรวจวัด

2.6.5.2 การศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

1. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลองพลาสติก
2. ปรับพีเอชสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่าเท่ากับ 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก
3. ปิเปตสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงอยู่
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360, 480, 720, 960, 1200, 1440 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
5. เก็บสารละลายภายในหลอดทดลองพลาสติกมากรองด้วยเยื่อกรองเนื้อไนลอน ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง
6. นำสารละลายส่วนที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง ICP-OES
7. นำผลการทดลองไปคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (% adsorption) และสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ของอันดับปฏิกิริยา

2.6.5.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

1. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง 0.01 กรัม ใส่ในหลอดทดลองพลาสติก
2. นำสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้น 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 5.0, 10, 15, 20, 25, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มาปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก
3. ปิเปตสารละลายอาร์ซีเนตความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงอยู่
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 300 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองสารละลายด้วยเยื่อกรองเนื้อไนลอน ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง
6. นำสารละลายส่วนที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง ICP-OES
7. นำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อหารูปแบบของไอโซเทิร์มของการดูดซับอาร์ซีเนต

2.6.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงในน้ำตัวอย่างจริง

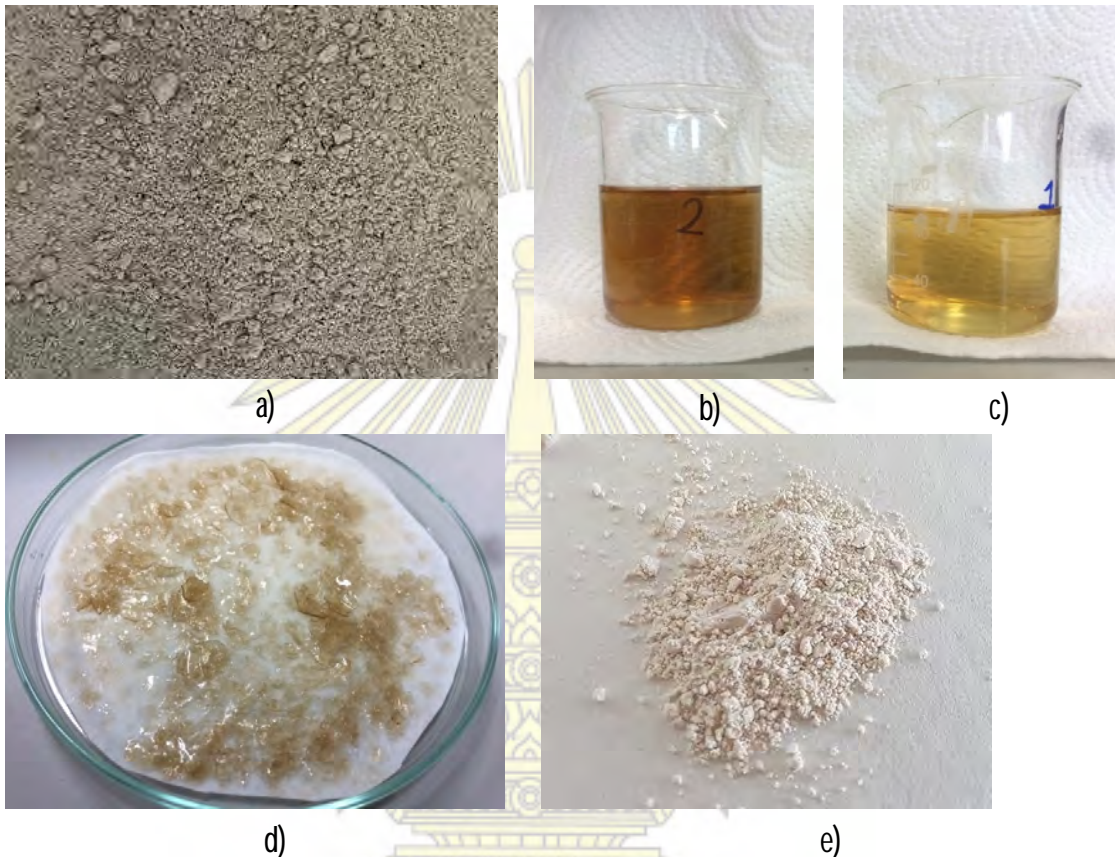
1. ชั่งซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง **0.01** กรัม ใส่ในหลอดทดลองพลาสติก
2. ปรับพีเอชน้ำตัวอย่างให้มีค่าเท่ากับ **3** ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก
3. ปิเปิดน้ำตัวอย่างปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงอยู่
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ **300 rpm** เป็นเวลา **24** ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. กรองสารละลายด้วยเยื่อกรองเนื้อไนลอน ทำการทดลองซ้ำสามครั้ง
6. นำสารละลายส่วนที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่เหลืออยู่ ด้วยเครื่อง ICP-OES
7. นำผลการทดลองไปคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ (**% adsorption**)



บทที่ 3

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากเถ้าแกลบ



รูปที่ 3.1 เถ้าแกลบ (a) สารละลายโซเดียมซิลิเกตก่อน (b) และหลังการสะเทินกับกรดไฮโดรคลอริก (c) ซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบก่อนบด (d) และหลังบด (e)

การสังเคราะห์ซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบทำได้โดยการละลายซิลิกาออกมาจากเถ้าแกลบและนำไปสังเคราะห์เป็นซิลิกา ขั้นตอนของการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบเริ่มด้วยการนำเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการเผาแล้วมาบดได้ดังรูปที่ 3.1(a) จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อละลายซิลิกาออกมาจากเถ้าแกลบ จะได้ซิลิกาอยู่ในรูปของโซเดียมซิลิเกตและสารละลายที่ได้เป็นของเหลวขุ่น สีดำ จากนั้นนำไปกรองเพื่อกำจัดคาร์บอนและสารอื่น ๆ ที่อาจมีในเถ้าแกลบ ได้สารละลายใส สีน้ำตาลเข้ม ดังรูปที่ 3.1(b) ขั้นตอนต่อมาคือสังเคราะห์เป็นซิลิกา โดยนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาสะเทินกับกรดไฮโดรคลอริกได้เป็นซิลิกาดังสมการ 3.1

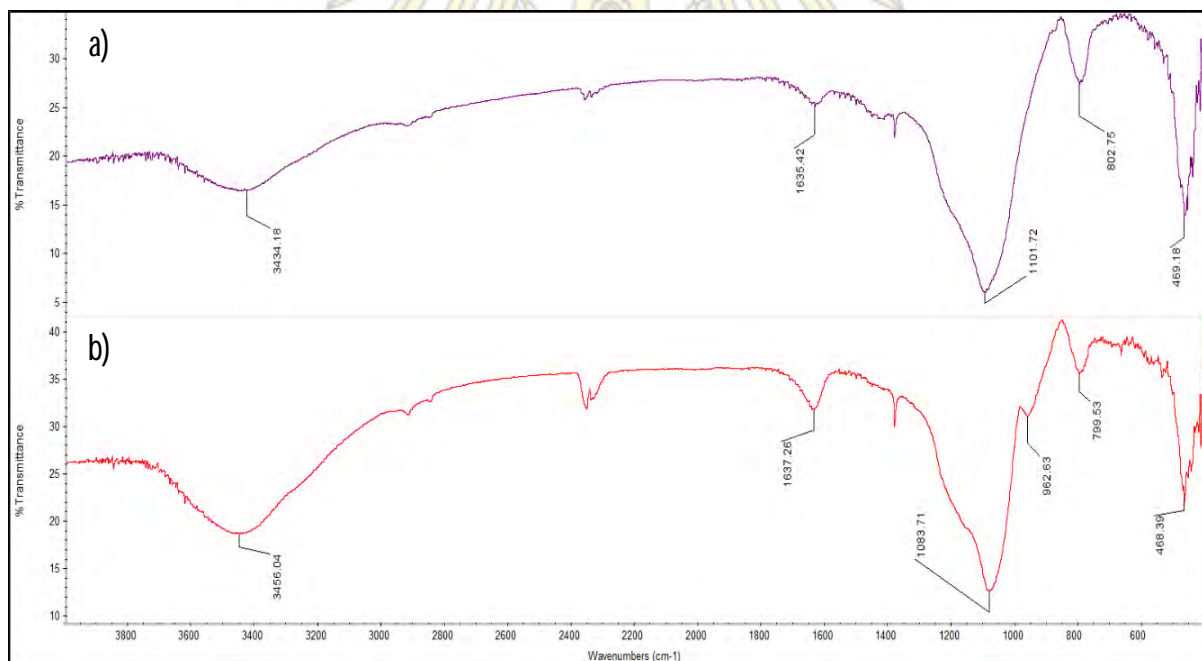


สารละลายเปลี่ยนเป็นอะควาเจลใส มีสีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 3.1(c) นำไปอบระเหยน้ำออกจะได้เป็นซิลิกาเจล จากนั้นล้างซิลิกาเจลที่ได้น้ำเพื่อกำจัดเกลือโซเดียมคลอไรด์ออก นำไปอบให้แห้งจะได้แผ่นซิลิกาบาง ๆ สีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 3.1(d) และเมื่อนำมาบดจะได้ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาว ละเอียดคล้ายแป้งดังรูปที่ 3.1(e)

3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

3.2.1 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรเมตรี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

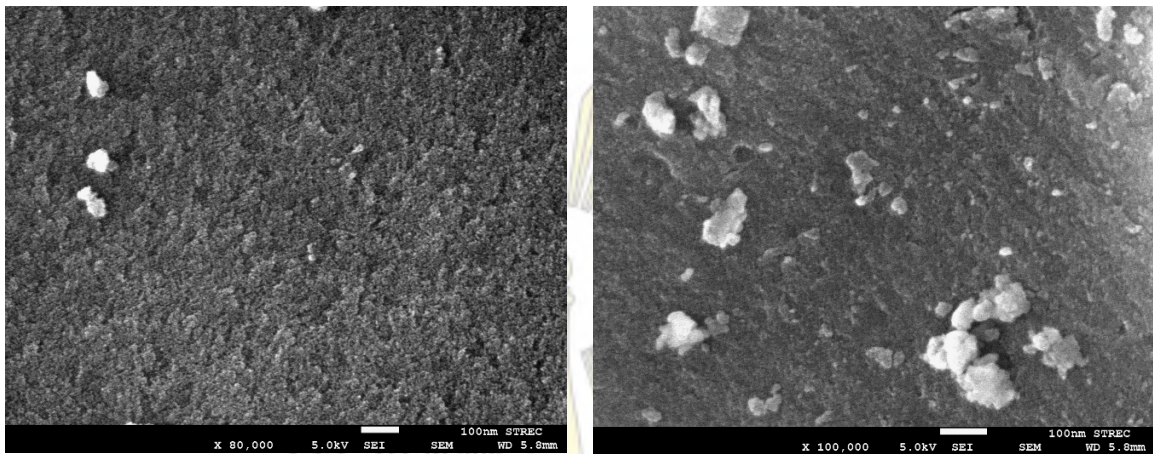
จากการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค FTIR เมื่อพิจารณา IR spectrum ของเถ้าแกลบและซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ ดังรูปที่ 3.2 พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยจะพบแถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 475 cm^{-1} ที่เกิดจากพันธะ siloxane (Si-O-Si stretching), แถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 800 cm^{-1} ที่เกิดจากพันธะ silanol (Si-OH stretching), แถบการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 1100 cm^{-1} ที่เกิดจากพันธะ Si-O และแถบการดูดกลืนแสงช่วง $3200-3700 \text{ cm}^{-1}$ ที่เกิดจาก O-H silanol stretching แสดงว่าสามารถสกัดซิลิกาที่มีในเถ้าแกลบออกมาได้



รูปที่ 3.2 IR Spectrum ของเถ้าแกลบ (a) และซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ (b)

3.2.2 ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เมื่อนำซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบมาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 80,000 เท่า และ 100,000 เท่า ได้ภาพดังรูปที่ 3.3 พบว่าลักษณะของซิลิกาที่ได้จะมีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขนาดที่แตกต่างกัน พื้นผิวมีความขรุขระมากและมีรูพรongจำนวนมาก



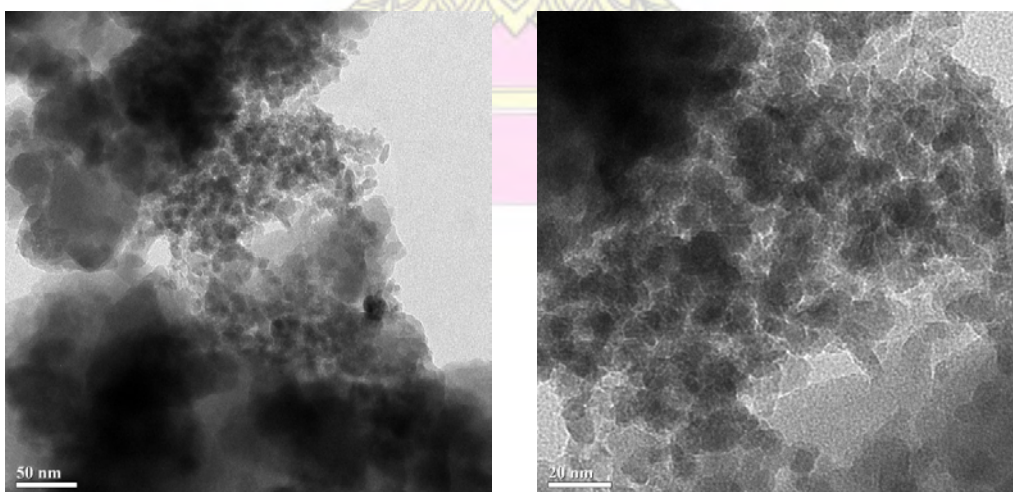
a)

b)

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบที่กำลังขยาย (a) 80,000 เท่า และ (b) 100,000 เท่า

3.2.3 ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

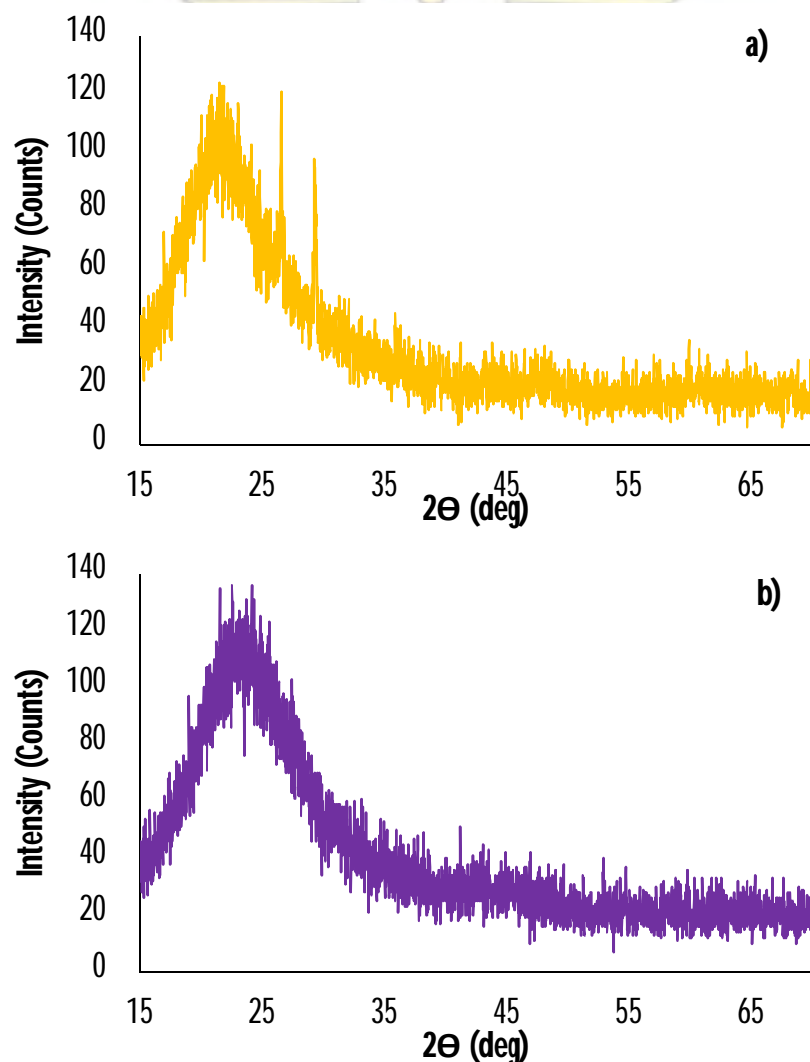
เมื่อนำซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบมาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านจะได้ภาพดังรูปที่ 3.4 พบว่าซิลิกาที่ได้มีรูปร่างจำนวนมากอยู่รวมกันอย่างหนาแน่นและขนาดของรูพรongอยู่ในระดับที่เล็กกว่า 10 นาโนเมตร



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

3.2.4 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแก้วแกลบและซิลิกาที่เตรียมจากแก้วแกลบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่า XRD patterns ของแก้วแกลบดังรูปที่ 3.5(a) จะปรากฏแถบที่มีความกว้างมาก (broad peak) ในช่วง 2θ เท่ากับ 16° ถึง 32° แสดงถึงความเป็นอสัณฐานของซิลิกา (Amorphous silica) ที่มีในแก้วแกลบ [9] นอกจากนี้ยังพบพีคที่มีลักษณะแหลม (sharp) เกิดขึ้นที่ประมาณ 2θ เท่ากับ 21.5° , 26.6° และ 29.3° แสดงถึงซิลิกาในรูปของผลึก (Crystalline Silica) [32] ซึ่งเกิดจากการเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง และเมื่อพิจารณา XRD patterns ของซิลิกาที่เตรียมจากแก้วแกลบดังรูปที่ 3.5(b) พบแถบที่มีความกว้างมาก (broad peak) ในช่วง 2θ เท่ากับ 16° ถึง 32° แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์ซิลิกาจากแก้วแกลบที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง และซิลิกาที่ได้เป็นซิลิกาอสัณฐานเพียงอย่างเดียว (amorphous silica)



รูปที่ 3.5 XRD patterns ของแก้วแกลบ (a) และ ซิลิกาที่เตรียมจากแก้วแกลบ (b)

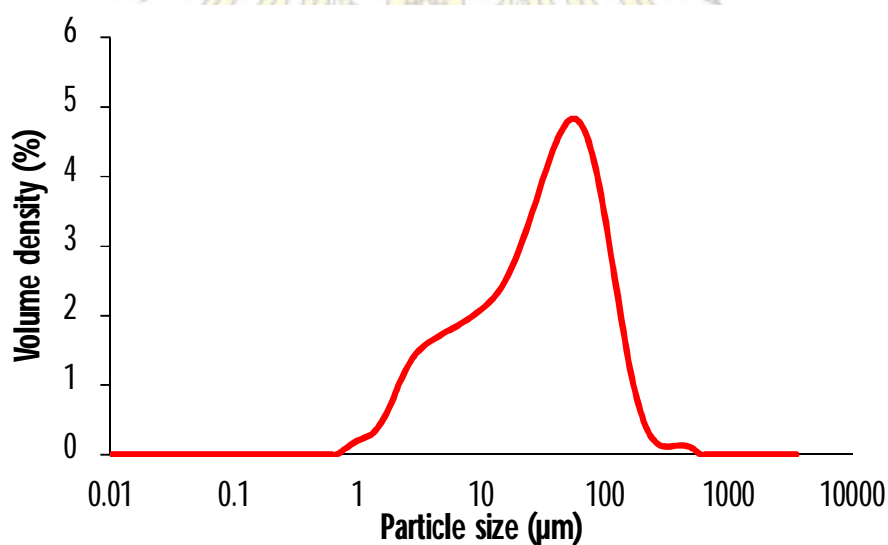
3.2.5 ศึกษาองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence, XRF)

จากการศึกษาองค์ประกอบธาตุของเถ้าแกลบและซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ ได้ผลดังตารางที่ 3.1 พบว่าในเถ้าแกลบมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากถึง 92% และมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะปริมาณเล็กน้อยอีกหลายชนิด เมื่อพิจารณาซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบพบว่าสามารถสกัดซิลิกาออกมาได้ปริมาณสูงถึง 97% นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดโลหะบางชนิดออกไปได้ด้วย

ตารางที่ 3.1 ชนิดและปริมาณของธาตุในเถ้าแกลบและซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

องค์ประกอบธาตุ (%)									
	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O
เถ้าแกลบ	92.0	2.64	1.95	0.931	0.889	0.588	0.378	0.231	0.116
ซิลิกาที่เตรียมได้	97.7	-	0.459	0.396	0.352	-	-	-	0.136

3.2.6 ศึกษาขนาดอนุภาคด้วยหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง (Laser particle size distribution analyzer)

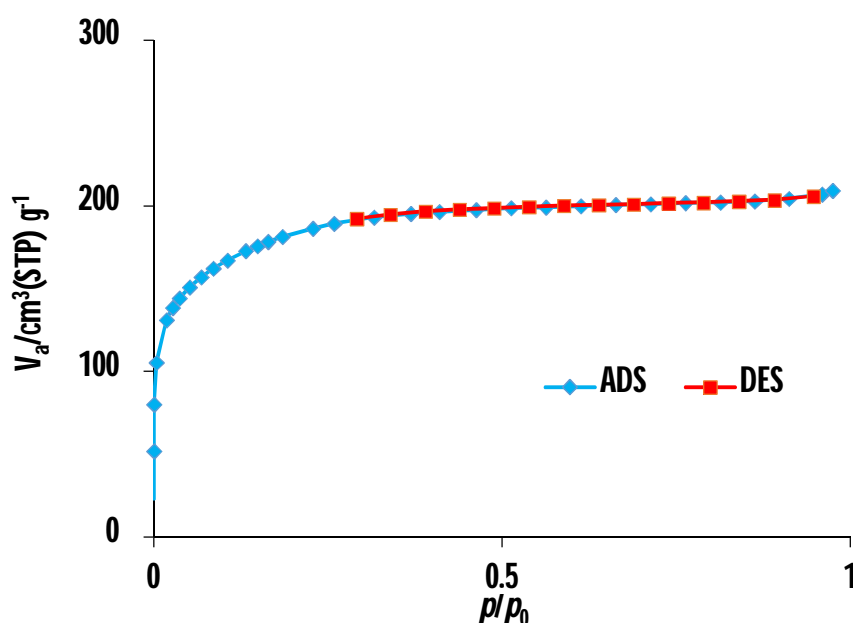


รูปที่ 3.6 Particle size distribution ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

จากการศึกษาขนาดอนุภาคของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยหลักการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง พบว่าขนาดของอนุภาคมีการกระจายตัวในช่วงกว้าง ตั้งแต่ 0.7 ถึง 516 ไมโครเมตร แต่โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดประมาณ 52 ไมโครเมตร

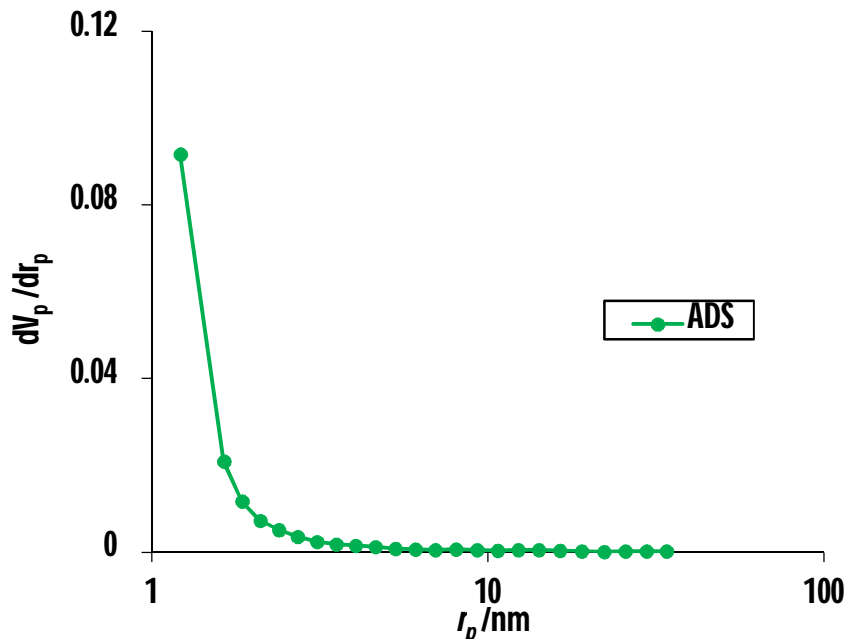
3.2.7 ศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดโพรงและการกระจายของโพรงด้วยเทคนิคการดูดซับของไนโตรเจน (N_2 adsorption)

เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ขนาดโพรงและการกระจายของโพรงของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิวหรือโพรงด้วยแก๊สไนโตรเจน สำหรับการหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ตามทฤษฎีของ BET (The Brunauer-Emmett-Teller) พิจารณาจาก Nitrogen adsorption desorption isotherm ดังรูปที่ 3.7 พบว่าซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบมีไอโซเทิร์มเป็น type I แสดงถึงการดูดซับชั้นเดียว (monolayer) และขนาดของโพรงมีคุณสมบัติเป็นแบบไมโครพอร์ส



รูปที่ 3.7 Nitrogen adsorption desorption isotherm ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

สำหรับขนาดโพรงและการกระจายขนาดโพรงของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบสามารถหาได้ตามทฤษฎีของ BJH (Barrett-Joyner-Halenda) พิจารณาจาก pore size distribution ดังรูปที่ 3.8 พบว่าการกระจายขนาดโพรงของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบมีการกระจายอยู่ในช่วงแคบ (narrow pore size distribution) โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดโพรงประมาณ 2 นาโนเมตร



รูปที่ 3.8 BJH pore size distribution ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

ตารางที่ 3.2 พื้นที่ผิว ปริมาตรของโพรงและขนาดโพรงของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ

Surface area	Adsorption pore volume	Adsorption pore diameter
671 m ² /g	0.3234 cm ³ /g	1.928 nm

จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2 พบว่าซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 671 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของโพรงการดูดซับประมาณ 0.3234 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงการดูดซับเป็น 1.928 นาโนเมตร จึงสามารถสรุปได้ว่าซิลิกาที่เตรียมได้มีคุณสมบัติโพรงเป็นแบบไมโครพอร์ส

3.3 การตัดแปรซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

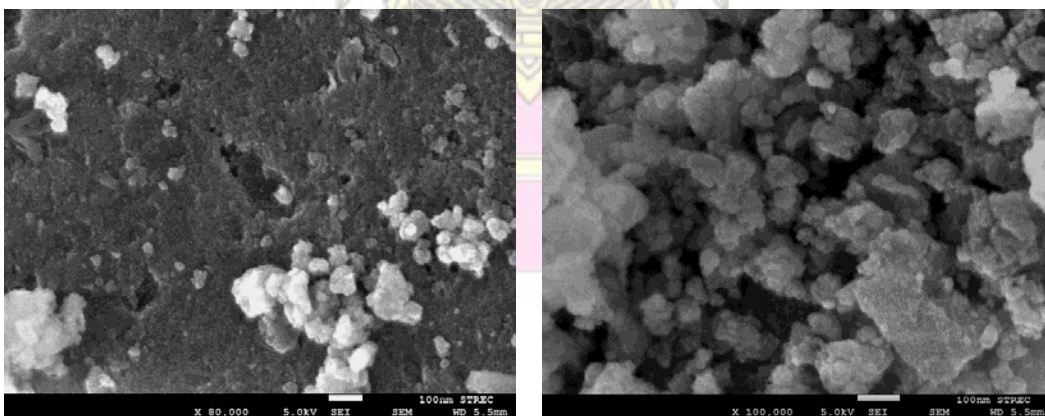


รูปที่ 3.9 ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงก่อนบด (a) และหลังบด (b)

การตัดแปรของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงทำได้โดยนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มาตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและทองแดง นำไปอบให้แห้งจะได้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีลักษณะเป็นแผ่นสีน้ำตาลแดงดังรูปที่ 3.9(a) จากนั้นนำมาบดจะได้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง สีน้ำตาลแดงอ่อน ดังรูปที่ 3.9(b)

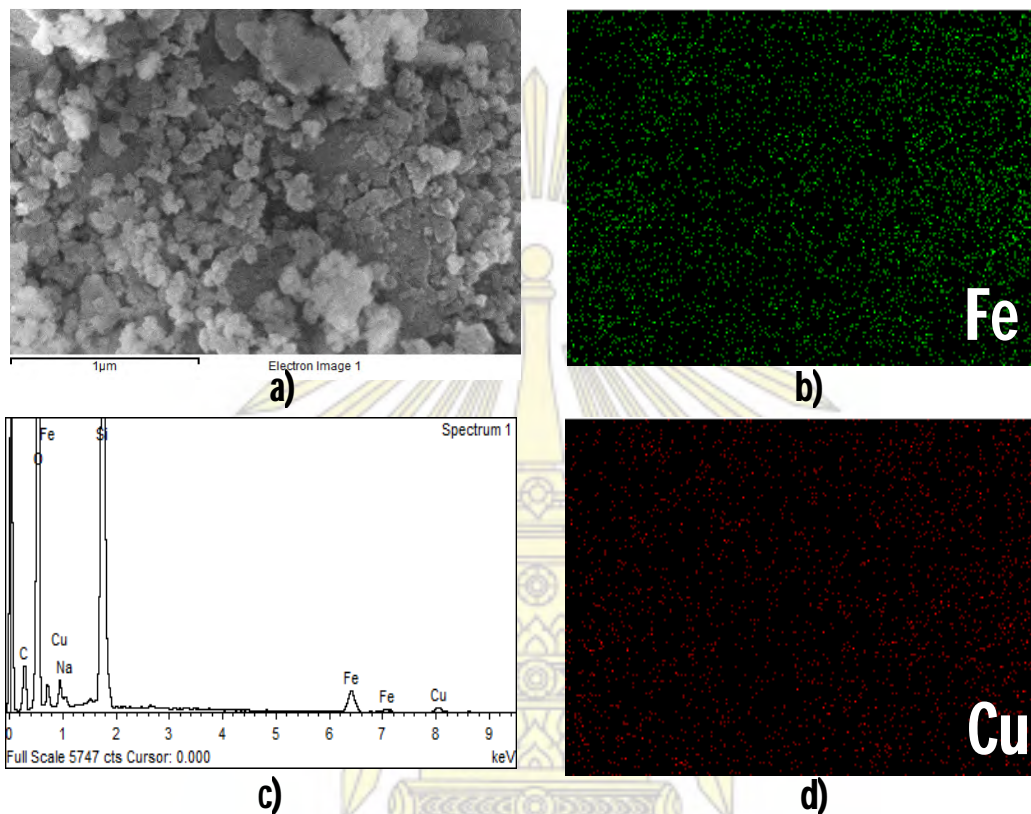
3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

3.4.1 ศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงที่กำลังขยาย (a) 80,000 เท่า และ (b) 100,000 เท่า

เมื่อนำซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 80,000 เท่า และ 100,000 เท่า ได้ดังรูปที่ 3.10 พบว่าอนุภาคออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเกาะอยู่บนผิวของซิลิกามีรูปร่างไม่แน่นอนและมีขนาดที่แตกต่างกัน โดยบางขนาดสามารถเข้าไปอยู่ในโพรงของซิลิกาได้

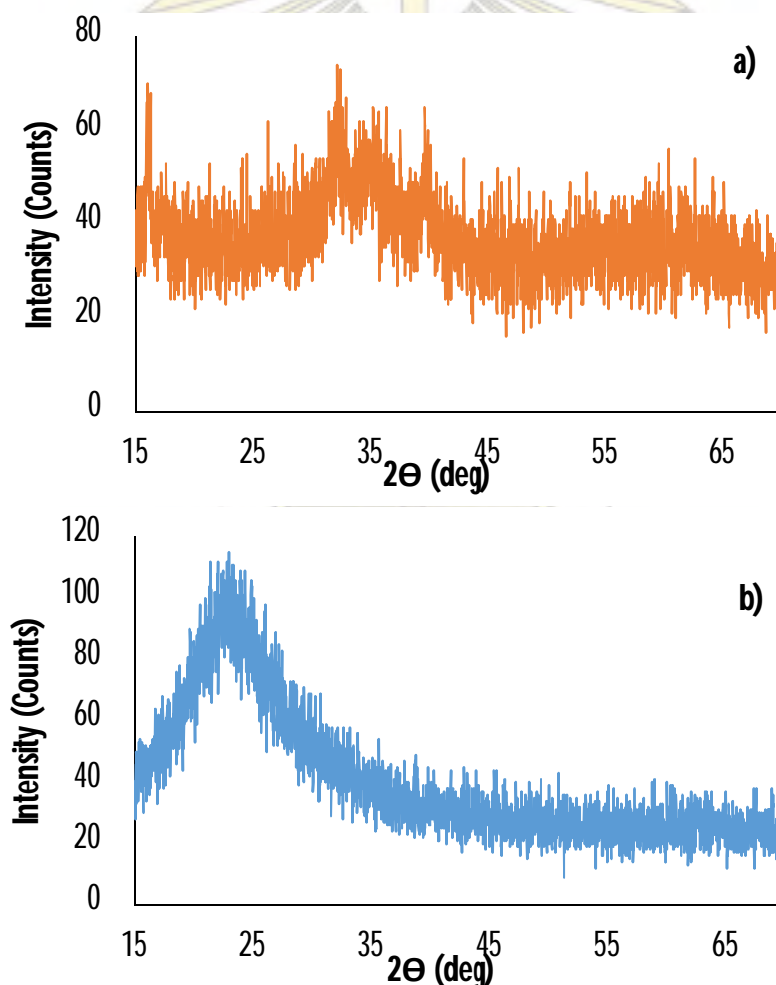


รูปที่ 3.11 ภาพถ่าย EDS elemental mapping ของซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำเกลือผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

จากการตรวจสอบธาตุที่มีด้วยเทคนิค EDS (Energy dispersive X-ray spectrometry) พบสัญญาณของธาตุ Fe, Cu, Si, O แสดงให้เห็นว่าผิวของซิลิกาถูกเคลือบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจริง และจากการทำ elemental mapping ของซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำเกลือผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง พบว่ามีเหล็กและทองแดงกระจายตัวอยู่บนผิวของซิลิกาที่เตรียมจากถ้ำเกลือโดยทั่วดังรูปที่ 3.11 (b) และ (d)

3.4.2 ศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของออกไซด์ของเหล็กและทองแดง และซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่า XRD patterns ของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงได้ ดังรูปที่ 3.12(a) ปรากฏแถบที่มีความกว้าง (broad peak) 2 แถบ ที่ประมาณ 2θ เท่ากับ 33.2° และ 62.4° ตามลำดับ แสดงถึงความเป็นผลึกของ ferrihydrite ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) [33] และปรากฏพีคที่ประมาณ 2θ เท่ากับ 16.3° , 32.3° และ 39.8° ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกของ Paratacamite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$) [19] และเมื่อพิจารณา XRD patterns ของซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง ดังรูปที่ 3.12(b) จะปรากฏแถบที่มีความกว้างมาก (broad peak) ในช่วง 2θ เท่ากับ 16° ถึง 32° แสดงถึงความเป็นอสัณฐานของซิลิกา (Amorphous silica) และไม่ปรากฏพีคที่แสดงถึงออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเนื่องจากอนุภาคของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีขนาดเล็กมาก



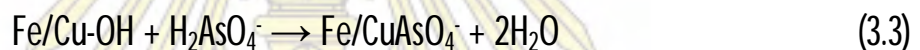
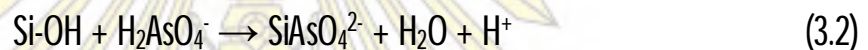
รูปที่ 3.12 XRD patterns (a) ของออกไซด์ของเหล็กและทองแดง และ (b) ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

3.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีเนตในสารละลายโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง

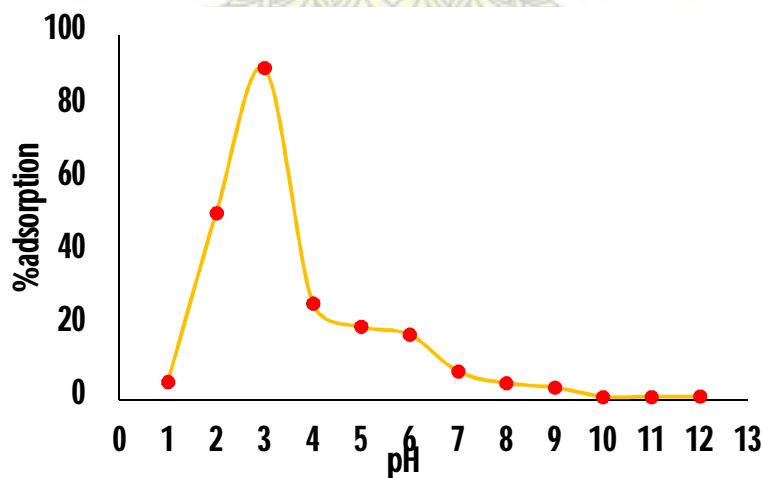
3.5.1 การศึกษาผลของพีเอชของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

จากการทดลองเปรียบเทียบพีเอชของสารละลายตั้งแต่พีเอช 1 ถึง 12 เพื่อศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีเนต โดยเติมตัวดูดซับคือซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจำนวน 10 มิลลิกรัม นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 3.13 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ของอาร์ซีเนตสูงที่สุดเมื่อสารละลายมีพีเอชเท่ากับ 3 และค่อย ๆ ลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ในช่วงพีเอชเท่ากับ 3 อาร์ซีเนตส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปประจุลบของ H_2AsO_4^- ซึ่งการดูดซับอาร์ซีเนตในสารละลายโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจะเกิดผ่านกลไก 2 กลไก คือเกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) และเกิดการยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) [12]

โดยการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) จะเกิดขึ้นได้โดยที่ pH ต่ำ ๆ เมื่อ $-\text{OH}$ ที่ผิวของซิลิกาและที่ผิวของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงหลุดออก ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับ H_2AsO_4^- เกิดเป็น Si-As complex และ Fe/Cu-As complex ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ [34] ทำให้เกิดการดูดซับอาร์ซีเนตบนตัวดูดซับได้



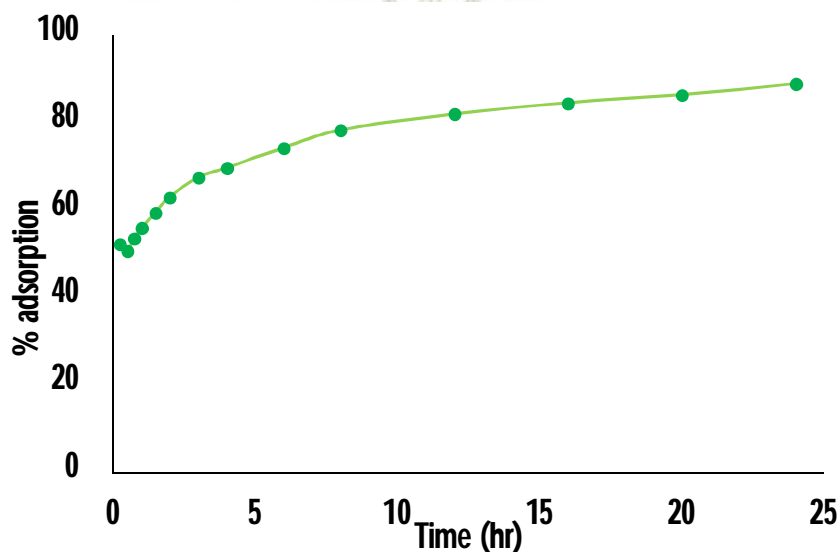
ในส่วนของการยึดเหนี่ยวกันด้วยไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) เกิดที่ pH ต่ำ ๆ เช่นกัน โดยผิวของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจะรับโปรตอนทำให้เกิดประจุบวกที่ผิว จึงเกิดแรงดึงดูดกับประจุอาร์ซีเนตที่อยู่ในรูปประจุลบกับผิวของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงที่อยู่ในรูปประจุบวก แต่ที่ pH ต่ำกว่า 3 ประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำลงเนื่องจากอาร์ซีเนตส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ในรูปประจุลบแต่จะอยู่ในรูปของ H_3AsO_4 จึงไม่สามารถดึงดูดกันได้ระหว่างอาร์ซีเนตและตัวดูดซับ



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ ประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ของอาร์ซีเนต

3.5.2 การศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

จากการทดลองเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดูดซับอาร์ซีเนต ตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง เพื่อศึกษาเวลาที่ เหมาะสมในการดูดซับอาร์ซีเนต โดยปรับพีเอชของสารละลายอาร์ซีเนตให้เท่ากับ 3 และเติมตัวดูดซับคือซีลีกาที่ ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจำนวน 10 มิลลิกรัม นำไปปั่นเหวี่ยงตามเวลาที่กำหนด ผลการ ทดลองเป็นดังรูปที่ 3.14 พบว่าอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งคงที่ โดยเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับอาร์ซีเนตคือ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (ชั่วโมง) และประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ของอาร์ซีเนต

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาหารูปแบบจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยเปรียบเทียบ 2 รูปแบบคือ จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order และจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order ซึ่งใช้สมการเชิงเส้นตรงในการคำนวณดังนี้

Pseudo-first-order equation: $\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$ (3.4)

Pseudo-second-order equation: $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$ (3.5)

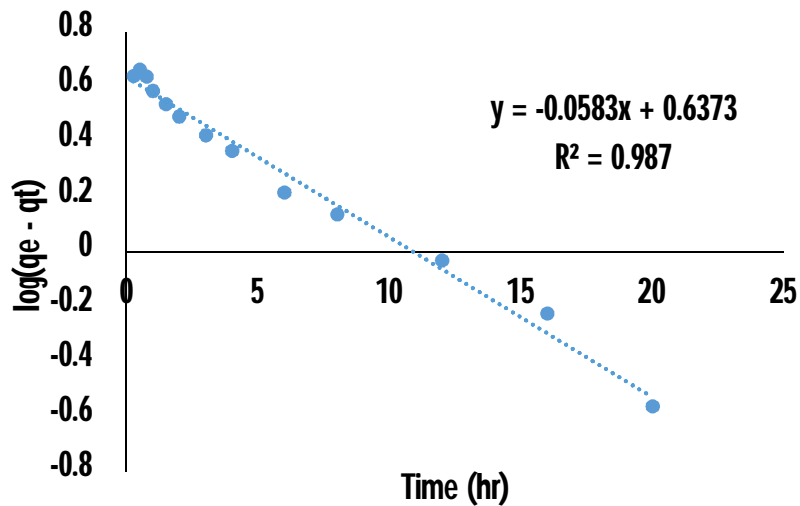
เมื่อ q_t = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ เวลา t (min)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g) ณ สมดุล

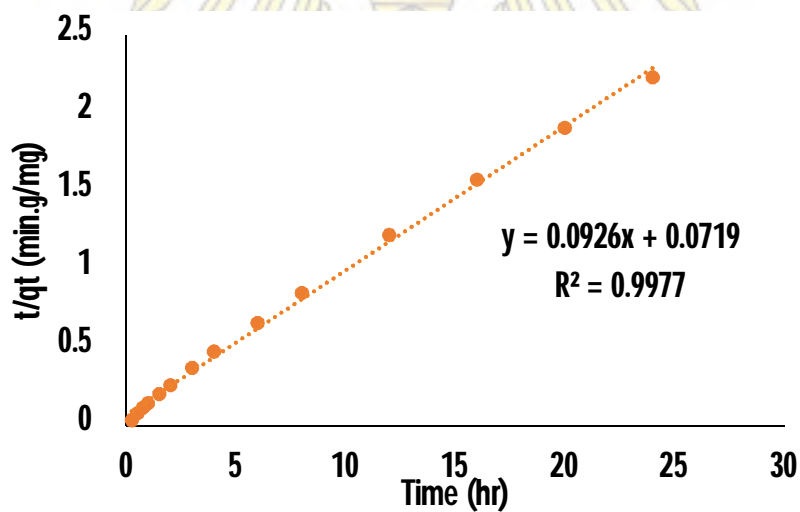
k_1 = Pseudo-first-order rate constant (min^{-1})

k_2 = Pseudo-second-order rate constant ($\text{g/mg}\cdot\text{min}$)

จลนพลศาสตร์การดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบ Pseudo-first-order และแบบ Pseudo-second-order แสดงในรูปที่ 3.15 และ รูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (ชั่วโมง) และค่า $\log(q_e - q_t)$ ของอาร์ซีเนต



รูปที่ 3.16 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลา (ชั่วโมง) และ ค่า t/q_t (นาที-กรัมต่อมิลลิกรัม) ของอาร์ซีเนต

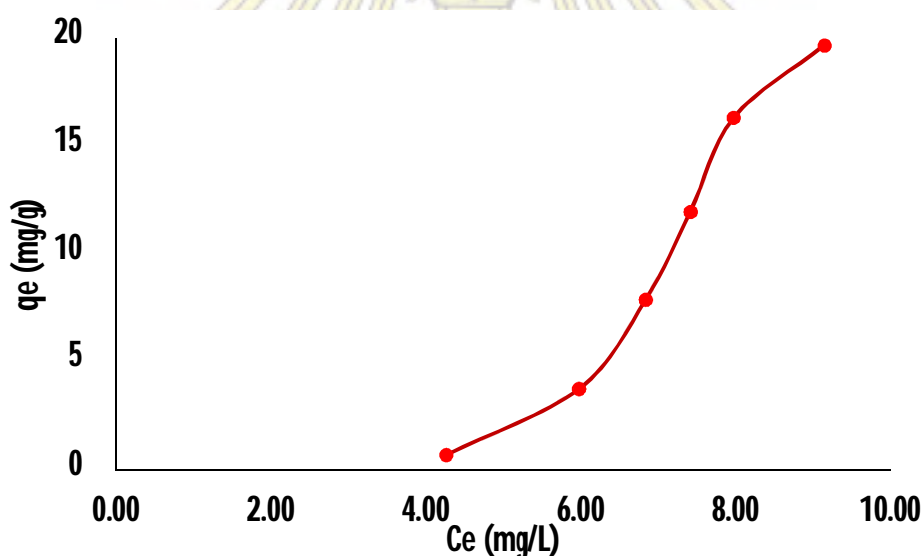
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรของจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order และ Pseudo-second-order

Pseudo-first-order constants				Pseudo-second-order constants			
R^2	k_1 (min ⁻¹)	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg.min)	$q_e(\text{exp})$ (mg/g)	$q_e(\text{cal})$ (mg/g)
0.9870	0.1343	10.734	4.3381	0.9977	0.09373	10.734	13.9082

จากตารางที่ 3.3 พบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order เนื่องจากมีค่า R^2 ที่สูงกว่า และค่า $q_e(\text{exp})$ ยังมีค่าใกล้เคียงกับค่า $q_e(\text{cal})$ มากกว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-first-order

3.5.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับอาร์ซีเนต

จากการทดลองเปรียบเทียบความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในช่วง 0.3 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยปรับพีเอชของสารละลายอาร์ซีเนตให้เท่ากับ 3 และเติมตัวดูดซับคือซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจำนวน 10 มิลลิกรัม นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของอาร์ซีเนตที่ถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ค่าปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนต (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาศึกษาสมดุลของการดูดซับตามแบบจำลองไอโซเทอรัม 2 รูปแบบ คือ แบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรุนดลิช ซึ่งใช้สมการเชิงเส้นตรงในการคำนวณดังนี้

Langmuir equation:
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3.6)$$

Freundlich equation:
$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3.7)$$

$$K_F = \frac{q_m}{C_0^{1/n}} \quad (3.8)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับ (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

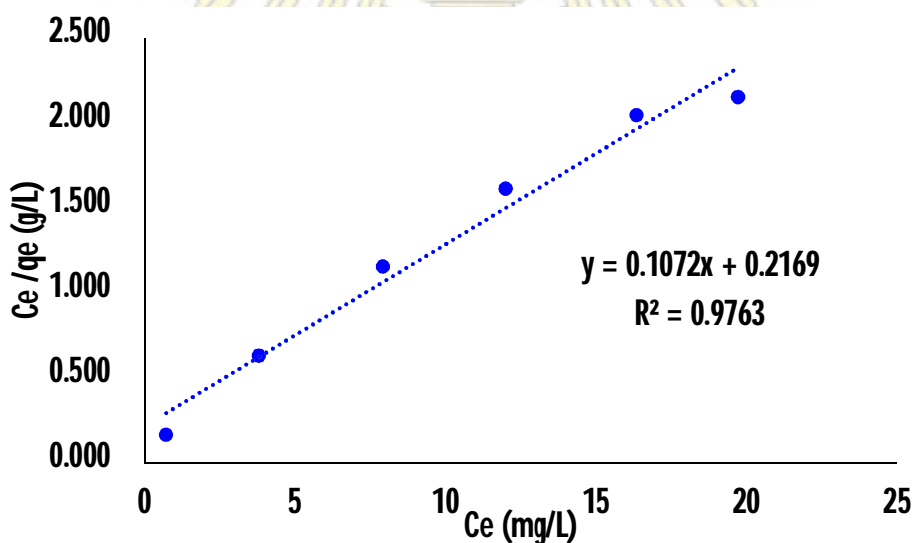
q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

q_m = ปริมาณสารสูงสุดที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (mg/g)

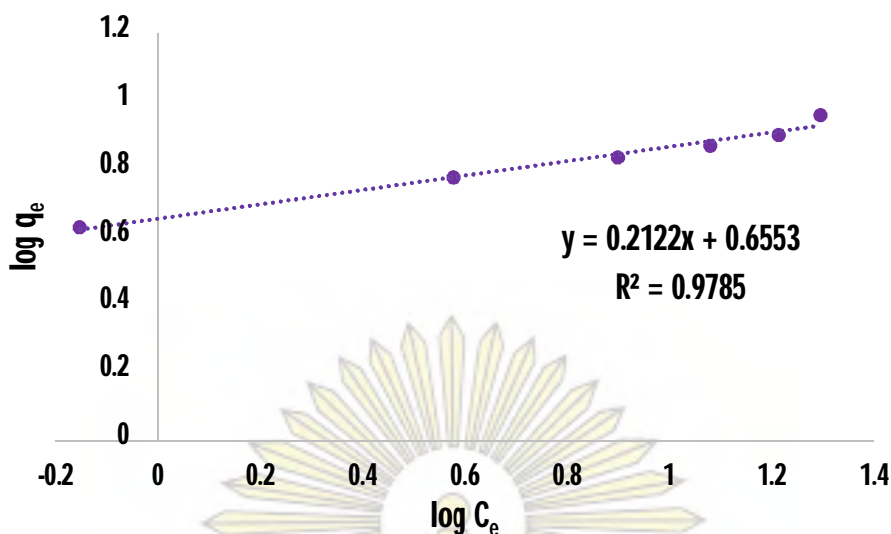
K_L = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (L/mg)

K_F และ n = ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช

ไอโซเทิร์มการดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ไอโซเทิร์มการดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง สร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองแลงเมียร์



รูปที่ 3.19 ไอโซเทิร์มการดูดซับอาร์ซีเนตบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง สร้างตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของแบบจำลองฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรของไอโซเทิร์มการดูดซับของแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอนด์ลิช

Langmuir constants			Freundlich constants			
K _L (L/mg)	R ²	q _m (mg/g)	K _f	1/n	R ²	q _m (mg/g)
0.4942	0.9763	9.328	4.522	0.2122	0.9785	9.306

จากตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรของไอโซเทิร์มการดูดซับของแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรอนด์ลิช พบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามสมการการดูดซับของแบบจำลองฟรอนด์ลิช เนื่องจากพิจารณาค่า R² ที่มีค่ามากกว่า และรูปที่ 3.17 แสดงรูปแบบการดูดซับแบบหลายชั้น โดยที่ความเข้มข้นสูง (มากกว่า 25 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงสามารถใช้อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ดูดซับสารด้วยแรงกระทำที่มีความแรงแตกต่างกัน (heterogeneous surface) และการดูดซับของสารบนตัวดูดซับอาจเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) ปริมาณอาร์ซีเนตสูงสุด (q_m) ที่ถูกดูดซับบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.8 [29] มีค่าเท่ากับ 9.3 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เนื่องจากปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นได้เรื่อย ๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์ซีเนต (C₀) ทำให้ปริมาณอาร์ซีเนตสูงสุด (q_m) ที่ถูกดูดซับบนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงสามารถเพิ่มขึ้นได้มากกว่า 9.3 มิลลิกรัมต่อกรัม

3.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงในน้ำ

ตัวอย่างจริง

เมื่อนำน้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 1 และแหล่งที่ 2 ดังรูปที่ 3.20 (a) และ (b) มาทดสอบการดูดซับอาร์ซีเนตโดยใช้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง ปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 3 เดิม ตัวดูดซับคือซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจำนวน 10 มิลลิกรัม นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.20 น้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 1(a), 2(b) และ 3(c)

ตารางที่ 3.5 แสดงปริมาณความเข้มข้นของอาร์ซีเนตทั้งก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงและประสิทธิภาพการดูดซับ (%adsorption) ในน้ำตัวอย่างจริง

น้ำเสีย ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ อาร์ซีเนตในน้ำเสีย (mg/L)	ความเข้มข้นของอาร์ซีเนต ในน้ำเสียหลังดูดซับ (mg/L)	ปริมาณการดูดซับของ อาร์ซีเนต (mg/g)	% adsorption
1	35.9	26.2	9.22	26.9
2	62.9	49.5	12.9	21.3
3*	8.5	2.9	5.48	66.3

* หมายถึง การทดลองโดยเติมอาร์ซีเนตซึ่งทราบปริมาณลงในตัวอย่าง (spiked sample)

พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีเนตในน้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 1 และแหล่งที่ 2 เท่ากับร้อยละ 26.9 และ 21.3 ตามลำดับ และปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนตเท่ากับ 9.22 และ 12.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ อาจเกิดจากผลของตัวรบกวนและความเข้มข้นของอาร์ซีเนตในน้ำเสีย 2 แหล่งนี้มีปริมาณสูงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีเนตในน้ำเสียตัวอย่างต่ำ จากปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนตในน้ำเสียจากแหล่งที่ 2 พบว่ามีค่ามากกว่าปริมาณอาร์ซีเนตสูงสุด (q_m) ที่ได้จากการทดลองการดูดซับในสารละลายอาร์ซีเนต เนื่องจากความ

เข้มข้นของอาร์ซีเนตในน้ำเสียมีปริมาณสูงกว่าความเข้มข้นที่ทำการทดลองในสารละลายอาร์ซีเนตและการดูดซับของอาร์ซีเนตบนตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบหลายชั้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นและมากกว่าปริมาณอาร์ซีเนตสูงสุด (q_m)

สำหรับน้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 3 ดังรูปที่ 3.20 (c) เป็นน้ำเสียที่ไม่มีอาร์ซีเนต แต่ทำการทดลองโดยเติมอาร์ซีเนตซึ่งทราบปริมาณลงในน้ำเสียตัวอย่าง (spiked sample) จากนั้นนำมาปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 3 เติมตัวดูดซับคือซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงจำนวน 10 มิลลิกรัม นำไปปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีเนตในน้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งที่ 3 เท่ากับร้อยละ 66.3 ปริมาณการดูดซับของอาร์ซีเนตเท่ากับ 5.48 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีเนตในน้ำเสียตัวอย่างจะต่ำกว่าในสารละลายอาร์ซีเนตเนื่องจากผลของตัวรบกวนที่มีอยู่ในน้ำเสีย



บทที่ 4

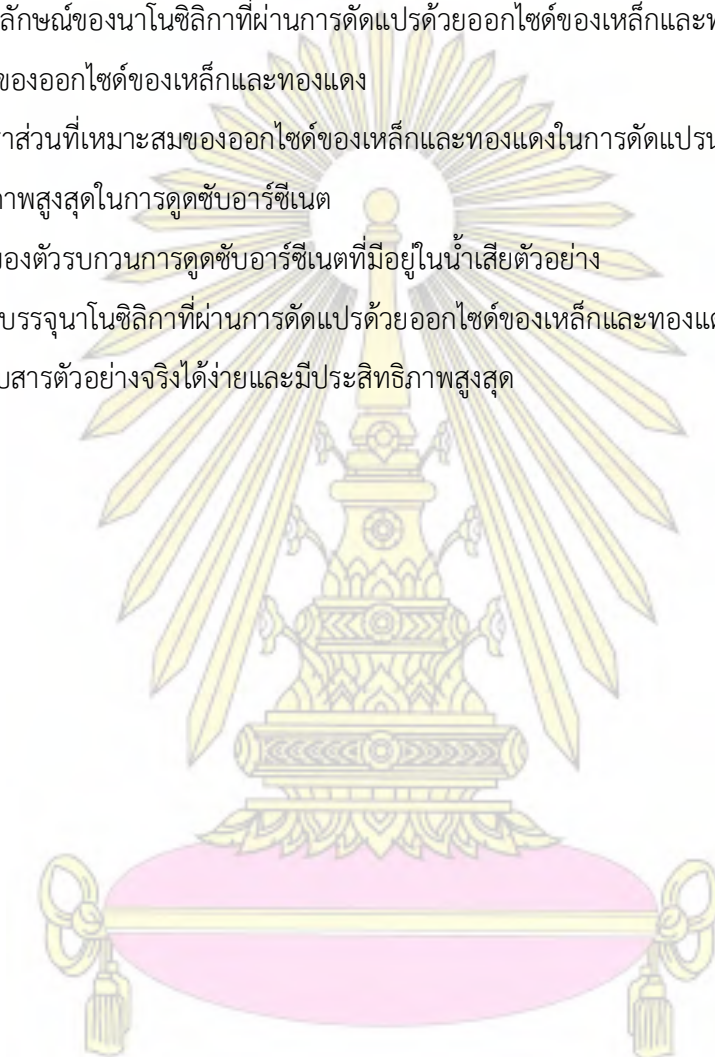
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบโดยผ่านกระบวนการสกัดซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยสารละลายเบส (alkaline extraction) ซิลิกาที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง สีขาว พิสูจน์เอกลักษณ์ของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบได้โดยเทคนิค FTIR, SEM, TEM, XRD, XRF, PSD และ N_2 adsorption พบว่าซิลิกาจากเถ้าแกลบที่สังเคราะห์ได้เป็นซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) มีความบริสุทธิ์สูงถึง 97% มีลักษณะพื้นผิวขรุขระ มีรูปร่างและขนาดไม่แน่นอน โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดอนุภาคประมาณ 52 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 671 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรของโพรงการดูดซับ 0.323 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงการดูดซับเท่ากับ 2 นาโนเมตร หลังจากนั้นทำการตัดแปรของซิลิกาที่เตรียมจากเถ้าแกลบด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง เพื่อนำไปศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีนิตในสารละลายและในน้ำเสียตัวอย่าง การตัดแปรทำได้โดยนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้มาตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็กและทองแดง จะได้ซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง สีน้ำตาลแดงอ่อน ซึ่งสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ได้โดยเทคนิค SEM, EDS และ XRD พบว่าออกไซด์ของเหล็กและทองแดงกระจายตัวอยู่ทั่วบนผิวของซิลิกา โดยรูปร่างและขนาดของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงไม่แน่นอน เมื่อนำซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมาทดสอบการดูดซับอาร์ซีนิตพบว่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับคือพีเอช 3 และมีเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับที่ 24 ชั่วโมง การเข้าสู่สมดุลเป็นไปตามจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo-second-order และไอโซเทอรัมการดูดซับผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามสมการการดูดซับของแบบจำลองฟรุนดลิชมากกว่าแบบจำลองแลงเมียร์ จึงสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับของอาร์ซีนิตที่เกิดขึ้นบนผิวตัวดูดซับซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption) ถูกดูดซับด้วยแรงกระทำที่มีความแรงแตกต่างกัน (heterogeneous surface) ปริมาณอาร์ซีนิตสูงสุด (q_m) ที่ถูกดูดซับบนซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงมีค่าเท่ากับ 9.3 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อทดสอบการดูดซับของอาร์ซีนิตกับน้ำเสียตัวอย่าง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของอาร์ซีนิตในน้ำเสียตัวอย่างจะต่ำกว่าในสารละลายอาร์ซีนิตเนื่องจากผลของตัวรบกวนที่มีอยู่ในน้ำเสีย

4.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อ

1. บดให้ละเอียดขึ้นเพื่อให้ได้นาโนซิลิกาและคัดแยกขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาก่อนทำการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์ซีเนต
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสารละลายอาร์ซีเนตที่ความเข้มข้นสูงขึ้น เพื่อหาปริมาณอาร์ซีเนตสูงสุด (Q_m) ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ
3. พิสูจน์เอกลักษณ์ของนาโนซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดง เพื่อหาโครงสร้างที่แน่นอนของออกไซด์ของเหล็กและทองแดง
4. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของออกไซด์ของเหล็กและทองแดงในการตัดแปรนาโนซิลิกา เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับอาร์ซีเนต
5. ศึกษาผลของตัวรบกวนการดูดซับอาร์ซีเนตที่มีอยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง
6. ศึกษาการบรรจุนาโนซิลิกาที่ผ่านการตัดแปรด้วยออกไซด์ของเหล็กและทองแดงลงในระบบคอลัมน์เพื่อนำไปใช้กับสารตัวอย่างจริงได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงสุด



เอกสารอ้างอิง

1. Kundu, S.; Gupta, A. K., Adsorptive removal of As(III) from aqueous solution using iron oxide coated cement (IOCC): evaluation of kinetic, equilibrium and thermodynamic models. *Separation and Purification Technology*. **2006**, *51*, 165–172.
2. Meng, X.; Bang, S.; Korfiatis, G. P., Effects of silicate, sulfate, and carbonate on arsenic removal by ferric chloride. *Water Research*. **2000**, *34*, 1255–1261.
3. Gerente, C.; Andres, Y.; McKay, G.; Cloirec, P. L., Removal of arsenic(V) onto chitosan: from sorption mechanism explanation to dynamic water treatment process. *Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. **2010**, *158*, 593–598.
4. Mafalda, P. L.; João, G. C.; Svetlozar V., Arsenate removal from sulphate-containing water streams by an ion-exchange membrane process. *Separation and Purification Technology*. **2016**, *166*, 125–134.
5. Figoli, A.; Cassano, A.; Criscuoli, A.; Mozumder, M. S. I.; Uddin, M. T.; Islam, M. A.; Drioli, E., Influence of operating parameters on the arsenic removal by nanofiltration. *Water Research*. **2010**, *44*, 97–104.
6. Akin, I.; Arslan, G.; Tor, A.; Cengeloglu, Y.; Ersoz, M., Removal of arsenate [As(V)] and arsenite [As(III)] from water by SWHR and BW-30 reverse osmosis. *Desalination*. **2011**, *281*, 88–92.
7. Hering, G. J.; Chen, P.; Wilkie, J. A.; Elimelech, M., Arsenic removal from drinking water during coagulation. *Journal of Environmental Engineering*. **1997**, *123*, 800–807.
8. Chen, R.; Lei, Z.; Yang, S.; Zhang, Z.; Yang, Y.; Sugiura, N., Characterization and modification of porous ceramic sorbent for arsenate removal. *Colloids and Surfaces A*. **2012**, *414*, 393–399.
9. Liou, T. H.; Yang, C. C., Synthesis and surface characteristics of silica produced from alkali-extracted rice husk ash. *Materials Science and Engineering: B*. **2011**, *176*, 521–529.
10. Hou, J.; Cao, C.; Ma, X.; Idrees, F.; Xu, B.; Hao, X.; Lin, W., From rice bran to high energy density supercapacitors: a new route to control porous structure of 3D carbon, *Scientific Reports*. **2014**, *4*, 7260–7265.

11. Zhang, S.; Gao, H.; Li, J.; Huang, Y.; Alsaedi, A.; Hayat, T.; Xu, X.; Wang, X., Rice husks as a sustainable silica source for hierarchical flower-like metal silicate architectures assembled into ultrathin nanosheets for adsorption and catalysis. *Journal of Hazardous materials*. **2017**, *321*, 92-102.
12. Zhang, G.; Ren, Z.; Zhang, X.; Chen, J., Nanostructured iron(III)-copper(II) binary oxide: A novel adsorbent for enhanced arsenic removal from aqueous solutions. *Water Research*. **2013**, *47*, 4022-4031.
13. Huang, S.; Wang, J.; Jing, S.; Jin, Y., Silica white obtained from rice husk in a fluidized bed. *Powder Technology*. **2001**, *117*, 232-238.
14. Liou, T. H., Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. *Materials Science and Engineering A*. **2004**, *364*, 313-323.
15. Yalcin, N.; Sevinc, V., Studies on silica obtained from rice husk. *Ceramics International*. **2001**, *27*, 219-224.
16. Pijarn, N.; Jaroenworuluck, A.; Sunsaneeyametha, W.; Stevens, R., Synthesis and characterization of nanosized-silica gels formed under controlled conditions. *Powder Technology* **2010**, *203*, 462-468.
17. Raven, K. P.; Jain, A.; Loeppert, R. H., Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. *Environmental Science & Technology*. **1998**, *32* 344-349.
18. Martinson, C. A.; Reddy, K. J., Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) by cupric oxide nano particles. *Journal of Colloid and Interface Science*. **2009**, *336*, 406-411.
19. Li, G.; Gao, S.; Zhang, G.; Zhang, X., Enhanced adsorption of phosphate from aqueous solution by nanostructured iron(III)-copper(II) binary oxides. *Chemical Engineering Journal*. **2014**, *235*, 124-131.
20. Rice husk (retrieved from <http://rkb.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-husk>, accessed Mar 22, 2017)

- 21 เฟื่องฟ้า อุ่นอบ. วัสดุและกระบวนการดูดซับสำหรับการบำบัดน้ำ, พิมพ์ครั้งที่2, โรงพิมพ์ I Deol, กรุงเทพมหานคร, 2559, 21-23, 84.
- 22 Is glass a polymer (retrieved from <http://www.pslc.ws/macrog/glass.htm>, accessed Mar 22, 2017)
- 23 Bernal, J. D.; Dasgupta, D. R.; Mackay, A. L., The Oxides and Hydroxides of Iron and Their Structural Inter-Relationships. *The Mineralogical Society*. **1958**, 4, 15-30.
- 24 Mandal, B. K.; Suzuki, K. T., Arsenic round the world: a review. *Talanta*. **2002**, 58, 201-235.
- 25 Hung, D.Q.; Nekrassova, O.; Compton, R. G., Analytical methods for inorganic arsenic in water: a review. *Talanta*. **2004**, 64, 269-77.
- 26 Aqueous Inorganic Arsenic (retrieved from <http://arsenic.tamu.edu/about/course/mod2/notes/pg3.htm>, accessed Mar 29, 2017)
- 27 Chemisorption and physisorption (retrieved from http://old.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node16.html, accessed Apr 3, 2017)
- 28 Ghasemi, N.; Mirali, S.; Ghasemi, M.; Mashhadi, S., adsorption isotherms and kinetics studies for the removal of Pb(II) from aqueous solutions using low-cost adsorbent. *International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering*. **2012**, 32, 79-83.
- 29 Hamdaoui, O.; Naffrechoux, E., Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon Part I. Two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, 147, 381-394.
- 30 characterization of powders and porous materials (retrieved from <https://www.slideshare.net/sgarrab/mate-280-characterization-of-powders-and-porous-materials>, accessed Mar 25, 2017)

- 31 Adsorption Isotherm (retrieved from <http://www.microtrac-bel.com/en/tech/bel/seminar02.html>, accessed Mar 25, 2017)
- 32 Jan, J.; Saceda, F.; Leon, R. L., Properties of silica from rice husk and rice husk ash and their utilization for zeolite y synthesis. *Quimica Nova*. **2011**, *34(8)*, 1394-1397.
- 33 Li, Z.; Zhang, T.; Li, K., One-step synthesis of mesoporous two-line ferrihydrite for effective elimination of arsenic contaminants from natural water. *Dalton Transactions*. **2011**, *40*, 2062.
- 34 Meng, X.; Bang, S.; Korfiatis, G. P., Effects of silicate, sulfate, and carbonate on arsenic removal by ferric chloride. *Water Research*. **2000**, *34(4)*, 1255-1261.



ประวัติผู้วิจัย

นางสาวชิดชนก โพธิ์ศรี เกิดวันที่ 28 กันยายน พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ สตรีวิทยา พุทธมณฑล กรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 ที่อยู่ปัจจุบัน 72/411 หมู่บ้านพระปิ่น 2 ซอยศาลาธรรมสพน์ 15 ถนนศาลาธรรมสพน์ แขวงศาลาธรรมสพน์ เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170 อีเมล chidchanok.91@gmail.com

