

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิกระหว่างทรายเคลือบเหล็ก
และทรายเคลือบโคโคซานที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด

นางสาวนลพรรณ ชันติกุลานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

Efficiency Comparison of Arsenic Adsorption between Iron-coated Sand
and Chitosan-coated Sand Prepared from Spent Fluidized-bed Sand

Miss Nonlapan Khantikulanon

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิก
ระหว่างทรายเคลือบเหล็กและทรายเคลือบโคโคซาน
ที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด

โดย

นางสาวนลพรรณ ชันติกุลานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัณณิกะ)

นลพรรณ ชั้นติกุลานนท์ : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิก ระหว่างทรายเคลือบเหล็กและทรายเคลือบไคโตซานที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด (EFFICIENCY COMPARISON OF ARSENIC ADSORPTION BETWEEN IRON-COATED SAND AND CHITOSAN-COATED SAND PREPARED FROM SPENT FLUIDIZED-BED SAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์, 217 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิก ระหว่างทรายเคลือบเหล็กและทรายเคลือบไคโตซานที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน คือ ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล พีเอช ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว และไอโซเทอมการดูดติดผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์อยู่ที่ 8 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกร้อยละ 70.20 และ 45.65 ตามลำดับ ส่วนทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน ระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 6 ชั่วโมง มีค่าประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกร้อยละ 35.35 และ 32.33 ตามลำดับ และพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายเคลือบทั้ง 4 ชนิด คือ พีเอช 4 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เหมาะสมในการนำมาอธิบายการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายเคลือบทั้ง 4 ชนิด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดติดผิวเป็นการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว ผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้เป็นตัวกลางดูดติดผิวสำหรับกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำที่มีการปนเปื้อน และในการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ บรรจุทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นของอาร์เซนิก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงของตัวกลางดูดติดผิว 30 60 และ 90 เซนติเมตร ป้อนน้ำเสียแบบไหลลงที่ 0.04 เมตรต่ออนาที ผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำเสียไหลผ่านชั้นตัวกลางดูดติดผิวที่จุดหมดสภาพเท่ากับ 230 260 และ 293 เท่าของ ปริมาตรของคอลัมน์ ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554.....

5170728221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / ARSENIC / IRON-COATED SAND / CHITOSAN-COATED SAND / SPENT FLUIDIZED-BED SAND

NONLAPAN KHANTIKULANON : EFFICIENCY COMPARISON OF ARSENIC ADSORPTION BETWEEN IRON-COATED SAND AND CHITOSAN-COATED SAND PREPARED FROM SPENT FLUIDIZED-BED SAND. ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 217 pp.

The purpose of this research was to investigate the arsenic adsorption efficiency of iron-coated sand and chitosan-coated sand prepared from spent fluidized-bed sand. Batch experiments were performed to examine contact time for equilibrium on removal arsenic, influence of pH, adsorbent dosage and adsorption isotherm using the iron-oxide coated natural sand (IOCNS), iron-oxide coated sand prepared from spent fluidized-bed sand (IOCFBS), chitosan coated natural sand (CCNS), chitosan coated sand prepared from spent fluidized-bed sand (CCFBS) for removal of arsenic from synthetic wastewater. Results showed that the suitable time of IOCNS and IOCFBS were 8 hours at a concentration of 1 mg/l, with 1 g dose of adsorbent. The removal efficiency were 70.20% and 45.65% respectively while the suitable time of CCNS and CCFBS were 6 hours, the removal efficiency were 35.35% and 32.23% respectively. The appropriate pH was 4 for adsorption arsenic the 4 types of adsorbent. Langmuir isotherm was suitable to explain the sorption characteristics of arsenic onto IOCNS, IOCFBS, CCNS and CCFBS which were the mono layer adsorption. The results could summarize that the IOCNS is the best adsorbent that can be used for arsenic removal in this study. And finally, In continuous experiment in column packed with IOCNS at concentration of arsenic at 1 mg/l at depth of adsorbent 30, 60 and 90 cm with down flow 0.04 m/min. The results indicated that the breakthrough volumes of each depth were 230, 260 and 293 Bed Volume, respectively.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือที่ดีจากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยด้วยดีเสมอมา และช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนมีความสมบูรณ์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตลอดจนความห่วงใย และกำลังใจที่ได้รับโดยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัณณิกะ คณะกรรมการ วิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำชี้แนะ และตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และ อาจารย์ธเนศ วีระศิริ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา ที่ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยนี้ตลอดมา

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ ผู้วิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการติดต่อประสานงานด้านต่างๆ ตลอดช่วงระยะเวลาที่ได้เข้ารับการศึกษ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยปริญญาโท หน่วยวิจัยกากของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการขยะมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์เพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกครั้งเมื่อมีปัญหา และเป็นกำลังใจในการทำงานมาโดยตลอด

คุณความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดา มารดา พี่สาว และญาติพี่น้องทุกท่าน ผู้ที่มีพระคุณอย่างสูง ซึ่งให้การอบรม การเลี้ยงดู การศึกษา มาตั้งแต่เยาว์วัย และยังได้ให้ คำปรึกษา คำแนะนำ และกำลังใจที่ดีที่สุดในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 อาร์เซนิก.....	5
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	5
2.1.2 ประเภทของอาร์เซนิก.....	7
2.1.3 เคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ.....	11
2.1.4 การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม.....	15
2.1.5 เหมืองทองคำวังสะพุง.....	19
2.1.6 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก.....	21
2.1.7 มาตรฐานการควบคุมของอาร์เซนิก.....	23
2.2 ททราย (Sand).....	24
2.2.1 การกำเนิดทราย.....	25
2.2.2 ชนิดของทราย.....	25
2.2.3 ประโยชน์ของทราย.....	26

	หน้า
2.2.4 คุณสมบัติของทรายที่ใช้กรองน้ำ.....	27
2.3 ทฤษฎีฟลูอิดไดเซชัน.....	28
2.3.1 ฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	28
2.3.2 นิยาม.....	28
2.3.3 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	28
2.3.4 ลักษณะของเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	29
2.3.5 ลักษณะการทำงานของเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	30
2.3.6 ปริมาณการใช้วัสดุดิบของบริษัทไทยเทรท์กซ์ไทม์ลิมิต.....	31
2.3.7 ผลวิเคราะห์ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	32
2.3.8 กากของเสียอุตสาหกรรม.....	33
2.4 ไคติน และไคโตซาน.....	34
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน.....	34
2.4.2 แหล่งของไคตินและไคโตซาน.....	37
2.4.3 กระบวนการผลิตไคโตซาน.....	40
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของไคโตซาน.....	42
2.4.5 สมบัติของไคโตซาน.....	44
2.4.6 การละลาย (Solubility).....	45
2.4.7 การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน.....	46
2.5 เหล็ก (Iron).....	47
2.5.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม.....	47
2.5.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก.....	49
2.5.3 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide).....	51
2.6 การดูดติดผิวด้วยไฮดรอกไซด์.....	52
2.6.1 ลักษณะของไฮดรอกไซด์.....	52
2.6.2 การดูดติดผิวไอออนลบด้วยไฮดรอกไซด์.....	53
2.6.3 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์.....	54
2.7 เทคโนโลยีการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำ.....	56
2.7.1 การรวมตะกอนด้วยเกลือของเหล็กและสารส้ม.....	56
2.7.2 การออกซิไดซ์และการกรอง.....	57

	หน้า
2.7.3 การใช้แอคติเวตเตดอลูมินา (Activated alumina).....	58
2.7.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange).....	58
2.7.5 การใช้รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis).....	59
2.8 การดูดติดผิว (Adsorption).....	61
2.8.1 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption).....	61
2.8.2 กลไกการดูดติดผิว.....	62
2.8.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer).....	64
2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	65
2.8.5 สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption equilibrium).....	66
2.8.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption isotherm).....	66
2.8.7 การทดลองด้วยคอลัมน์ดูดติดผิว.....	69
2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	72
2.9.1 ตัวกลางที่เป็นเหล็กออกไซด์.....	72
2.9.2 ตัวกลางที่เป็นโคโคซาน.....	73
2.9.3 ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์และโคโคซาน.....	75
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	79
3.1 แผนการดำเนินการทดลอง.....	79
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	81
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	82
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	83
3.3.1 การเตรียมตัวกลางดูดติดผิว.....	83
3.3.1.1 การเตรียมตัวกลางทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์.....	83
3.3.1.2 การเตรียมตัวกลางทราเยเคลือบโคโคซาน.....	85
3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดติดผิว.....	87
3.3.3 การเตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก.....	87
3.3.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดอาร์เซนิกไอออนในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก.....	88

	หน้า
3.3.4.1 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	88
3.3.4.2 การศึกษาผลของพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	91
3.3.4.3 การศึกษาผลของปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	94
3.3.5 การศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	96
3.3.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวในคอลัมน์จำลอง.....	100
3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิว หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ในคอลัมน์จำลอง.....	104
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลทดลอง.....	107
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดติดผิว.....	108
4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ.....	108
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดติดผิว ด้วยวิธี BET.....	110
4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างตัวกลางดูดติดผิว ด้วยเครื่อง SEM...	111
4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี.....	113
4.2.1 การวิเคราะห์ตัวกลางดูดติดผิวด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy.....	113
4.2.2 การวิเคราะห์ตัวกลางดูดติดผิว ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer.....	118
4.3 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดติดอาร์เซนิก.....	123
4.3.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุลที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก...	123
4.3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ ในการดูดติดอาร์เซนิก.....	127
4.3.3 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	131
4.3.4 ผลการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก...	137
4.4 การวิเคราะห์หาไอโซเทอมที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวอาร์เซนิกของทรายเคลือบชนิดต่างๆ.....	138

	หน้า
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิว	
แบบคอแลมันน์.....	143
4.5.1 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดอาร์เซนิก ที่ความสูงของทรายเคลือบเหล็ก	
ออกไซด์ต่างๆ.....	143
4.5.2 การศึกษา คำนวณค่า q_0 และ k_t จากสมการของ Thomas จาก	
Breakthrough curve ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	146
4.5.3 การฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	148
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	151
รายการอ้างอิง.....	153
ภาคผนวก.....	162
ภาคผนวก ก วิธีทดสอบและผลการทดสอบ การชะละลาย และการย่อย.....	163
ภาคผนวก ข การกำจัดอาร์เซนิก.....	166
ภาคผนวก ค ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	169
ภาคผนวก ง ผลการทดลองระยะเวลาเข้าสู่สมดุล.....	174
ภาคผนวก จ ผลการทดลองพีเอชที่เหมาะสม	191
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดติดผิว.....	197
ภาคผนวก ช ผลการทดลองคอแลมันน์ดูดติดผิว.....	198
ภาคผนวก ซ ผลการทดลองการคำนวณตามสมการ Thomas.....	209
ภาคผนวก ฌ ผลการทดลอง การฟื้นฟูสภาพ.....	212
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	217

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก.....	6
2.2	อาร์เซนิกและสารประกอบอาร์เซนิกที่สำคัญ.....	10
2.3	สปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ระดับพีเอชต่างๆ กัน.....	13
2.4	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำที่จากกิจกรรมประเภทต่างๆ.....	16
2.5	ปริมาณอาร์เซนิกที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ.....	17
2.6	อาการต่าง ๆ ที่เกิดในคนเมื่อได้รับอาร์เซนิกในปริมาณต่างๆ.....	21
2.7	ค่า LD ₅₀ ของสารประกอบอาร์เซนิกรูปแบบที่สำคัญ (ทำการทดลองในหนู).....	22
2.8	มาตรฐานน้ำดื่มของต่างประเทศ.....	23
2.9	มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ ของประเทศไทย.....	24
2.10	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทรายแต่ละลักษณะ.....	24
2.11	ลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์.....	27
2.12	ปริมาณการใช้ทราย และราคา.....	31
2.13	ผลการวิเคราะห์ทราย (International testing service, i-test-lab).....	32
2.14	ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ.....	37
2.15	การประมาณปริมาณผลผลิตทั่วโลกของสารประเภทไคตินจากแหล่งต่างๆ.....	39
2.16	สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคโตซาน.....	44
2.17	ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ กัน.....	45
2.18	การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน.....	46
2.19	ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก.....	50
2.20	เทคโนโลยีที่ใช้กำจัดอาร์เซนิก และค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	60
2.21	การเปรียบเทียบการดูดติดผิวทางกายภาพ และการดูดติดผิวทางเคมี.....	63
3.1	การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีกับวิธีวิเคราะห์.....	87
3.2	ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก.....	90
3.3	ตัวแปรในการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิกไอออน.....	93
3.4	ตัวแปรในการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก.....	96

ตารางที่		หน้า
3.5	ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก.....	99
3.6	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวในคอลัมน์จำลอง.....	103
3.7	ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิว หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ในคอลัมน์จำลอง.....	106
4.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดติดผิว.....	111
4.2	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางทรายเคลือบแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS.....	114
4.3	ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดซับชนิดต่างๆ...	129
4.4	ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์ และพารามิเตอร์การดูดติดผิวของอาร์เซนิก ด้วยตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ.....	142
4.5	ผลการทดลองการดูดติดอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความสูงของชั้นตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 30 60 และ 90 เซนติเมตร.....	146

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การกระจายของอาร์เซนิก As(III) และ As(V) กับค่าพีเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ	14
2.2	ที่ตั้งและสภาพทั่วไปเหมืองทองคำ ภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย.....	19
2.3	ส่วนประกอบภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด.....	30
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของโคติน.....	35
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของโคโตซาน.....	36
2.6	การเกิดคีเลตของทองแดงกับโคโตซาน.....	36
2.7	ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการแยกโคตินและโคโตซาน.....	41
2.8	pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก.....	49
2.9	การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่าง $H_2PO_4^-$ กับหมู่ -OH บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์	54
2.10	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว.....	64
2.11	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	66
2.12	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช.....	67
2.13	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์.....	68
2.14	การเคลื่อนตัวของ Adsorption Zone สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย.....	70
3.1	ขั้นตอนการทดลอง.....	80
3.2	ขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	84
3.3	ขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบโคโตซาน.....	86
3.4	ขั้นตอนการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์	89
3.5	ขั้นตอนการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์.....	92
3.6	ขั้นตอนการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์.....	95
3.7	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวอาร์เซนิก	98
3.8	การทำงานของคอลัมน์ดูดติดผิว.....	101
3.9	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก ที่ความสูงต่างๆ.....	102

ภาพที่	หน้า
3.10	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง ดูดติดผิว..... 105
4.1	ลักษณะทางกายภาพของทรายก่อนและหลังเคลือบ..... 109
4.2	ลักษณะพื้นผิวของทรายธรรมชาติที่กำลังขยาย 1000 เท่า..... 112
4.3	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายธรรมชาติ หลังก่อนเคลือบ ด้วย FTIR..... 117
4.4	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วย FTIR..... 118
4.5	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายธรรมชาติ เคลือบโคโคซาน ด้วย FTIR..... 119
4.6	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของฟลูอิดไดซ์เบด ก่อนเคลือบ ด้วย FTIR..... 120
4.7	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายจากเตา ฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วย FTIR..... 121
4.8	ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายจากเตา ฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน ด้วย FTIR..... 122
4.9	ร้อยละกำจัดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก ที่ระยะเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุล ต่างๆ..... 124
4.10	ความสามารถในการดูดติดผิวอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลา สัมผัสเข้าสู่สมดุลการดูดติดผิว..... 126
4.11	จลนพลศาสตร์ในการดูดของตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ..... 127
4.12	จลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายเคลือบ วิเคราะห์ด้วย สมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน..... 130
4.13	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวมด้วยตัวกลางทรายเคลือบชนิดต่างๆ และแบลงค์ ที่พีเอชต่างๆ..... 132
4.14	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่พีเอชต่างๆ 132
4.15	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่พีเอชต่างๆ..... 133
4.16	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน ที่พีเอชต่างๆ..... 133

ภาพที่	หน้า
4.17	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน ที่พีเอชต่างๆ..... 134
4.18	สปีชีส์ของอาร์เซนิตไอออนที่พบมากที่สุด ในช่วงพีเอชต่างๆ..... 136
4.19	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิก ที่ปริมาณตัวกลางดูดติดต่างๆ..... 137
4.20	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 139
4.21	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิชของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 139
4.22	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ เหล็กออกไซด์..... 139
4.23	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิชของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ เหล็กออกไซด์..... 140
4.24	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน..... 140
4.25	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิชของทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน..... 140
4.26	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ ไคโตซาน..... 141
4.27	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนด์ลิชของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบ ไคโตซาน..... 141
4.28	รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิวชนิดต่างๆ..... 141
4.29	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความ เข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกขาออกต่อความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก ขาเข้า..... 144
4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกกับเวลา ที่ระดับความสูงของ ชั้นตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 30 60 และ 90 เซนติเมตร..... 145
4.31	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลาย อาร์เซนิก ที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 เซนติเมตร..... 145
4.32	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$ 147
4.33	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของอาร์เซนิกขา ออกในการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 149
4.34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกที่เวลาในการบำบัดต่างๆ ใน การฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 150

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเร่งพัฒนาประเทศให้ทันกับนานาประเทศในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านการศึกษา ด้านสังคมวัฒนธรรม ด้านคุณภาพชีวิต และโดยเฉพาะด้านเศรษฐกิจ สิ่งที่จะทำให้เกิดการพัฒนาด้านเศรษฐกิจที่สำคัญนั้นก็คือ ภาคอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมการผลิตมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการผลผลิตที่สูง และใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ทำให้ภาคอุตสาหกรรมเน้นเรื่องการผลิตและผลผลิตที่ได้เป็นสำคัญ แต่ไม่ให้ความสำคัญต่อของเสียที่เกิดจากการผลิตนั้น จึงก่อให้เกิดของเสียออกมาสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก ไม่ว่าจะเป็นอากาศเสีย ขยะมูลฝอย สารพิษ และน้ำเสีย ซึ่งน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตนี้ จะประกอบด้วยสารปนเปื้อนหลากหลายชนิด ขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรมนั้นๆ และสารปนเปื้อนที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษคือ การปนเปื้อนด้วยโลหะหนักชนิดต่างๆ เนื่องจากโลหะหนักเป็นสารที่ย่อยสลายตามธรรมชาติได้น้อยมาก เมื่อเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการตกค้างสะสมในสิ่งแวดล้อม และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ทางห่วงโซ่อาหาร ส่งผลให้เกิดโรคและความผิดปกติขึ้นได้ (Bailey และคณะ, 1999) และนอกจากนี้โลหะหนักสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกับไอออน หรือโมเลกุลที่ละลายอยู่ในน้ำ ทำให้ได้สารประกอบหลายชนิดที่มีความเป็นพิษรุนแรงต่างกันไป โลหะหนักที่มีความเป็นพิษต่อสุขภาพมนุษย์ และระบบนิเวศ เช่น ตะกั่ว ปรอท อาร์เซนิก แคดเมียม นิกเกิล โครเมียม เป็นต้น

การบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน โดยอยู่บนพื้นฐานกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี (Physicochemical) เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) และการตกตะกอนด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrodeposition) (Wan และคณะ, 2010) จากวิธีที่กล่าวมาข้างต้น แต่ละวิธีมีข้อจำกัดและข้อได้เปรียบที่แตกต่างกัน แต่วิธีที่นิยมใช้กันตั้งแต่ออดีตจนถึงปัจจุบันนั้นก็คือ วิธีการดูดติดผิว เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพที่สามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนเพียงเล็กน้อยในน้ำเสียได้ และประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Peternele และคณะ, 1999)

อาร์เซนิก เป็นธาตุที่พบได้ในเปลือกโลก ในน้ำตามธรรมชาติ โดยมักจะพบในรูปของสารอนินทรีย์ ซึ่งอาร์เซนิกเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์เฉียบพลันและเรื้อรัง พิษเฉียบพลัน เมื่อสัมผัสจะเกิด

อาการระคายเคืองที่ผิวหนัง ถ้าอาร์เซนิกเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดการเบื่ออาหาร โลหิตจาง ส่วนอาการของพิษเรื้อรังมักเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ประสาทส่วนปลาย และเป็นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งผิวหนัง และมะเร็งตับ จึงถือว่าอาร์เซนิกเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์ที่ต้องคำนึงถึง

การปนเปื้อนของอาร์เซนิกสู่สิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมฟอกหนัง จากการใช้ยาฆ่าแมลง ใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง และจากทางธรรมชาติที่เกิดจากการสึกกร่อนของพื้นผิวโลก และก๊าซจากภูเขาไฟระเบิด ส่งผลให้ชุมชนขนาดเล็กจำนวนมากในหลายประเทศต้องเผชิญกับปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในดิน และแหล่งน้ำ ซึ่งปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกที่พบในประเทศไทย เช่น บริเวณอำเภอรัตนบุรีจังหวัดศรีธรรมราช เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีการทำเหมืองแร่ดีบุก และอาร์เซนอไพไรต์ (Arsenopyrites) ปะปนอยู่ จึงเกิดปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในดิน และในน้ำ จากการตรวจวิเคราะห์ดินในพื้นที่เมื่อปี พ.ศ.2540 พบปริมาณอาร์เซนิกมีค่าตั้งแต่ตรวจไม่พบ จนถึง 3,931 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน และมีค่าเฉลี่ย 222.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมดิน (คุณลักษณะ วิถีชีวิต, 2543) และบริเวณภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย พบว่าประสบปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกเช่นเดียวกัน โดยตรวจวิเคราะห์ในน้ำผิวดิน พบปริมาณอาร์เซนิก 0.054 จนถึง 1.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (Veerasiri, 2010) เพราะเนื่องมาจากบริเวณดังกล่าวนี้มีการทำเหมืองทองคำ ทำให้ประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เป็นโรคไข้ดำจำนวนมาก และปลาในแหล่งน้ำก็เป็นโรคตับบวม ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจในการศึกษาเพื่อการกำจัดอาร์เซนิกออกจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำ

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือกกระบวนการดูดติดผิวมาใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัดต่ำ จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในชุมชนขนาดเล็กของประเทศที่กำลังพัฒนา สารตัวกลางที่ใช้เป็นตัวดูดติดผิวในงานวิจัยนี้มี 4 ชนิด คือ ทราเยจากแม่น้ำธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผาและทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และเคลือบด้วยโคโคซาน ซึ่งโคโคซานเป็นสารไบโอพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่ได้มาจากของเสียทางด้านอุตสาหกรรมอาหารทะเลจำพวกเปลือกกุ้ง จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสียอีกทาง และสามารถกำจัดโลหะหนักต่างๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโคโคซาน โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีในการดูดติดผิวอาร์เซนิก ของทราเยธรรมชาติจากแม่น้ำที่ไม่ผ่านการเผา และทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ และเคลือบโคโคซาน อีกทั้งศึกษาประสิทธิภาพ และสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบไฮเดียมอาร์ซิเนต

($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกที่ปนเปื้อนในน้ำ ให้ประชาชนที่อยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนด้วยอาร์เซนิกได้ใช้น้ำที่สะอาดในการอุปโภคบริโภคในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อนกับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโตซาน เช่น เวลาสัมผัส พีเอช และปริมาณตัวกลางดูดติดผิว โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน กับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโตซาน
- 1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกโดยใช้ตัวกลางทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน กับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโตซาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการวิจัย ณ หน่วยงานวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ (Solid wastes laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดได้มาจากบริษัทไทยโทเรเทคส์ไทม์ลิมิตส์ จำกัด อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม และทรายธรรมชาติจากทรายแม่น้ำที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน
- 1.3.2 เตรียมตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์โดยใช้ $(\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O})$ ตามวิธีการของ Benjamin และคณะ (1996)
- 1.3.3 เตรียมตัวกลางทรายเคลือบโคโตซาน ตามวิธีการของ Wan และคณะ (2004)

- 1.3.4 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของทราย 2 ประเภท คือ ทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผา มาก่อน กับทรายเก่าที่ผ่านการเผาในเตาฟลูอิดไดซ์เบด ทั้งก่อนและหลังเคลือบ เหล็กออกไซด์ และเคลือบโคโคซาน
- 1.3.5 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมี ของทราย 2 ประเภท คือ ทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผา มาก่อน กับทรายเก่าที่ผ่านการเผาใน เตาฟลูอิดไดซ์เบด ทั้งก่อนและหลังเคลือบเหล็กออกไซด์ และเคลือบโคโคซาน
- 1.3.6 เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกจากสารประกอบโซเดียมอาร์ซิเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายอาร์เซนิกไอออน As (+5) ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 1.3.7 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ณ อุณหภูมิห้องคงที่ ได้แก่ ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุล สภาวะความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว
- 1.3.8 ศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิกบนตัวกลางทรายธรรมชาติที่ไม่ ผ่านการเผา มาก่อน กับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบโคโคซานและ เคลือบเหล็กออกไซด์
- 1.3.9 ศึกษาระดับความสูงของชั้นตัวกลางดูดติดผิวที่บรรจุในคอลัมน์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 30 60 และ 90 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก เท่ากับ 25 มิลลิตรต่อนาที
- 1.3.10 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวกลางดูดติดผิวให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในคอลัมน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำเสียโดยใช้ ตัวกลางทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผา กับทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบโคโคซานและเคลือบเหล็กออกไซด์
- 1.4.2 การนำทรายเก่าที่ผ่านการใช้งานในเตาฟลูอิดไดซ์เบดนำกลับมาใช้ใหม่ และสามารถ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือฝังกลบทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดได้
- 1.4.3 การพัฒนาตัวกลางดูดติดผิวให้สามารถเป็นแนวทางเลือกหนึ่ง ในการกำจัดอาร์เซนิก ออกจากน้ำที่ใช้ในการอุปโภคบริโภค สำหรับประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ที่มีการ ปนเปื้อนอาร์เซนิกได้ใช้น้ำที่สะอาดได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อาร์เซนิก

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 5 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีอื่นๆ เป็นสารเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียกว่โลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นโลหะหนักเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยการปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจะเกิดการสะสมและถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร เมื่อสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อจนถึงระดับหนึ่งจะก่อให้เกิดโรคหรือความพิการจนอาจถึงตายได้ (เกศสุชา พูลคำ, 2537)

โลหะหนักที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ อาร์เซนิก ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมี ประเภทของอาร์เซนิก เคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษ และมาตรฐานการควบคุม ดังนี้

2.1.1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

อาร์เซนิก (Arsenic, As) เป็นธาตุกึ่งโลหะ อยู่ในหมู่ที่ 5 ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 33 มวลอะตอม 74.9216 จุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียส และระเหิดที่อุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท อาร์เซนิกมีได้หลายออกซิเดชันสเตต (Oxidation state) ตั้งแต่ -3, 0, +3 และ +5 (คุณลักษณะ วิฑูริ, 2543) มีคุณสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ รูปที่เป็นธาตุหรือเป็นโลหะ (Element or Metallic arsenic) เป็นรูปที่พบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนในรูปสารประกอบ (Arsenic compounds) พบทั้งในรูปสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic) ส่วนใหญ่พบในรูปสารประกอบของแร่ต่างๆ คือ ในรูปอาร์เซไนด์ของโลหะ (Metal arsenide) ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ ($\text{Cu}_3\text{As}(\text{s})$, $\text{NiAs}_2(\text{s})$, $\text{FeAs}_2(\text{s})$, $\text{CoAs}_3(\text{s})$) พบในรูปอาร์เซนิกซัลไฟด์ (Arsenic sulfide) ได้แก่ เรียลการ์ (Realgar, As_4S_4) และออร์พิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) และพบในรูปอาร์เซนิกออกไซด์ เช่น As_2O_3 และ As_2O_5 (คุณลักษณะ วิฑูริ, 2543; รามณี เนตรวิเชียร,

2543) ในดินและชั้นซึมน้ำ อาร์เซนิกมีสภาวะออกซิเดชันสเตท +3 และ +5 คือ ไตรวาเลนท์ อาร์เซนิก หรือเรียกว่า อาร์เซไนต์ (Trivalent arsenic or Arsenite hydroxylated ion) และเพนตะวาเลนท์อาร์เซนิก หรือเรียกว่า อาร์เซเนต (Pentavalent arsenic or Arsenate hydroxylated ion) และมีเลขรหัสสารซึ่งใช้ประกอบใน Material Safety Data Sheet (MSDS) คือ CAS-No. 7440-38-2 และ UN 1588 (สุซาดา สุทธิพลย์, 2547) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของอาร์เซนิก (Hampel, 1968)

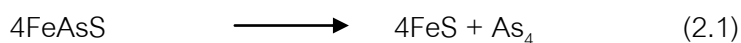
เลขอะตอม	33
น้ำหนักอะตอม	74.9216
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral
สี	เทา
ความถ่วงจำเพาะ	5.7 (Crystalline) 2.0 (Yellow cubic) 3.7 (Black amorphous)
จุดหลอมละลาย	817 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	613 องศาเซลเซียส
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	88.5 แคลอรีต่อกรัม
ความร้อนแฝงของการเดือด	102 แคลอรีต่อกรัม
ความร้อนจำเพาะ	0.082 แคลอรีต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส (20 องศาเซลเซียส)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	4.7×10^{-6} นิ้วต่อองศาเซลเซียส (20 องศาเซลเซียส)
ความแข็งมาตรา Brinell	147

อาร์เซนิกยังสามารถระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และเมื่อไอของอาร์เซนิกเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเป็นสีเหลือง และไม่มีสมบัติความเป็นโลหะอีกต่อไป แต่เมื่อได้รับแสงอุตราไวโอเลตก็จะเปลี่ยนกลับไปเป็นสีน้ำเงินแกมเทาหรือสีดำ ภายใต้ระยะเวลาอันสั้น สำหรับสมบัติทางกายภาพและเคมีนี้ จะขึ้นอยู่กับลักษณะของสารประกอบอาร์เซนิกแต่ละประเภทด้วย

2.1.2 ประเภทของอาร์เซนิก (รามนรี เนตริวิเชียร, 2543)

อาร์เซนิกสามารถพบได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทของธาตุหรือโลหะ (Element or Metallic arsenic, As_4) เกิดจากการหลอมของอาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, $FeAsS$) หรือโลลินไนต์ (Lollingite, $FeAs_2$) ที่อุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังสมการ 2.1 และ 2.2



ซึ่งจะได้อาร์เซนิก (As_4) ที่มีลักษณะเป็นของแข็งหรือผง ไม่ละลายน้ำ มี 3 ชนิด คือ

1.1 ของแข็งสีเทา (Metallic arsenic) มีจุดหลอมละลาย 817 องศาเซลเซียส (ในภาวะปกติภายใต้ความดัน 36 บรรยากาศ) เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริกที่เย็น แต่ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกหรือกรดซัลฟูริกที่ร้อน เมื่อเผาจะให้เปลวไฟสีน้ำเงิน และควันสีขาวของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide, As_2O_3) พร้อมกลิ่นคล้ายกระเทียม

1.2 ของแข็งสีเหลือง (Yellow arsenic) เกิดจากการหลอมอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide, As_2O_3) ร่วมกับซัลไฟต์ ซึ่งจะได้อาร์เซนิกมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีความถ่วงจำเพาะ 1.97 และเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งสีเทาได้ง่ายเมื่อถูกแสงหรือความร้อน

1.3 แอมมอर्फัสอาร์เซนิก (Amorphous arsenic) มีสีดำ ความถ่วงจำเพาะ 3.7 และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งสีเทาได้ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

2. รูปของสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic compounds)

2.1 อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide, As_2O_3) ซึ่งได้จากการถลุงโลหะอาร์เซไนด์ (Arsenide) หรือแร่กำมะถันที่มีอาร์เซนิกประกอบอยู่ เช่น อาร์เซนไพไรต์ (Arsenopyrite, $FeAsS$) เมื่อโลหะหรือแร่ดังกล่าวถูกเผาที่อุณหภูมิ 650-670 องศาเซลเซียส ไอรระเหยจากการเผาจะจับตัวตามผนังของปล่องไฟมีลักษณะเป็นผงสีขาวที่เรียกกันว่า อาร์เซนิกไตรออกไซด์ และหากผงสีขาวของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ละลายน้ำจะได้กรดอาร์เซเนียส

(Arsenous acid, H_3AsO_3) นอกจากนี้ยังละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกและในด่าง ซึ่งสารอาร์เซนิกจะละลายอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (Arsenite, As(III))

2.2 อาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (Arsenic pentoxide) หรืออาร์เซนิกแอนไฮไดรด์ (Arsenic anhydride, As_2O_5) เป็นสารเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซนิกไตรออกไซด์กับกรดไนตริก เมื่อนำสารละลายนี้ไประเหย นำส่วนที่เหลือจัดน้ำออกไปจะได้ผลึกหรือผงสีขาวของอาร์เซนิก เพนทอกไซด์ และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นอาร์เซนิกไตรออกไซด์ได้ด้วยความร้อน

2.3 กรดอาร์เซนัส (Arsenous acid, H_3AsO_3) เกิดจากการละลายของอาร์เซนิกไตรออกไซด์

2.4 กรดอาร์เซนิก (Arsenic acid, H_3AsO_4) สังเคราะห์ได้จากการนำอาร์เซนิกไตรออกไซด์ละลายในกรดไนตริก แล้วนำสารนี้ไประเหยจะได้ผลึกสีขาว และสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นอาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (Arsenic pentoxide) โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส

2.5 อาร์เซไนต์ (Arsenites) เมื่อรวมตัวกับโลหะหมู่ 1 จะได้เกลืออาร์เซไนต์ (Arsenite) คือ MH_2AsO_3 , M_2HAsO_3 และ M_3AsO_3 โดยที่ M คือ ไอออนของโลหะวาเลนซ์ 1 หรือกลุ่มของไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 สมบัติการละลายน้ำของพวกเกลืออาร์เซไนต์จัดแบ่งได้ดังนี้ โลหะหมู่ 1 ของเกลืออาร์เซไนต์ (Alkaline-earth arsenites) ละลายน้ำได้เล็กน้อย และโลหะหนักของอาร์เซไนต์ (Heavy-metal arsenites) ไม่ละลายน้ำ

2.6 อาร์เซเนต (Arsenates) เกลือของกรดอาร์เซนิกที่สำคัญ คือ แคลเซียมอาร์เซเนต (Calcium arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้เล็กน้อยละลายในกรดเจือจาง และเลทอาร์เซเนต (Lead arsenate, PbHAsO_4) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในด่างและกรดไนตริกเจือจาง

2.7 อาร์เซนิกเฮไลด์ (Halides of arsenic) โดยทั่วไปจะไม่พบในธรรมชาติ แต่จะพบในการวิเคราะห์ทางเคมี อาทิ อาร์เซนิกคลอไรด์ (AsCl_3) อาร์เซนิกโบรมไนด์ (AsBr_3) และอาร์เซนิกฟลูออไรด์ (AsF_3)

2.8 อาร์เซนิกซัลไฟด์ (Arsenic sulfides) เป็นสารที่มีสมบัติในการละลายน้ำต่ำเมื่ออยู่ในน้ำที่ไม่มีออกซิเจน และตัวกลางที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) สารประกอบนี้จะสะสมและตกตะกอนลงมา

3. รูปของสารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic compound) ที่สำคัญและใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ กรดมีเทนอาร์เซนิก (Methanearsonic acid) ไดอัลคิลคลอโรอาร์เซไนน์ (Dialkylchloroarsenine) ไตรเมททิวอาร์ซีน (Trimethylarsine) และไตรเมททิวอาร์ซีนออกไซด์ (Trimethylarsine oxide) ส่วนกลุ่มของอนุพันธ์ของอาร์เซนิกประเภทสารอะโรมาติกต่างๆ (Aromatic arsenic derivatives) ใช้เป็นสารที่เติมในอาหารสัตว์ และยารักษาโรคสัตว์ที่สำคัญ เช่น กรดอาร์เซนิลิก (Arsenilic acid) 3-ไนโตร-4-ไฮดรอกซี-เพนนิวอาร์เซนิกเอซิก (3-nitro-4-hydroxy-phenylarsonic acid) และ 4-ไนโตรเพนนิวอาร์เซนิกเอซิก (4-nitrophenylarsonic acid) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้อาร์เซนิกเป็นยารักษาโรคสำหรับมนุษย์ด้วย อาทิ กรดอาร์ซินิลิก (p -arsanilic acid) ใช้เป็นยานอนหลับ และคาร์บาโซน (Carbasone) เป็นยารักษาโรคเรื้อรัง เป็นต้น

4. รูปของก๊าซอาร์ซีน (Arsine, AsH_3) อาร์เซนิกที่อยู่ในรูปก๊าซ คือ อาร์ซีน (Arsine) หรือ อาร์เซนิกไฮไดรด์ (Arsenic hydride, AsH_3) และไตรเมททิวอาร์ซีน (Trimethylarsine, $(CH_3)_3As$) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี ละลายได้ในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์และต่าง

อาร์เซนิกที่พบในธรรมชาติโดยทั่วไป พบอยู่ในรูปสารประกอบมากกว่าธาตุอิสระ ซึ่งสะสมตัวอยู่ตามแร่ธาตุต่างๆ ในรูปของอาร์เซไนด์ (Asenide) ของโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ เป็นต้น และพบในรูปอาร์เซนิกซัลไฟด์ (Asenic sulfide) ได้แก่ รีอัลการ์ (Realgar, As_4S_4) และออร์พิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) เป็นต้น หรืออาจพบในรูปสารประกอบออกไซด์ ส่วนอาร์เซนิกในน้ำมักพบอยู่ในรูปของอาร์เซไนต์ (Asenite) ที่มีเลขออกซิเดชัน +3 หรืออาร์เซเนต (Asenate) ที่มีเลขออกซิเดชัน +5 และในด้านอุตสาหกรรมจะพบอาร์เซนิกที่สำคัญในรูปของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Asenic trioxide, As_2O_3) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงแร่ทองแดง และตะกั่ว ซึ่งอาร์เซนิกมีหลายชนิด ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อาร์เซนิกและสารประกอบอาร์เซนิกที่สำคัญ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2541)

ชื่อสาร (Name)	ชื่ออื่น (Synonyms)	สูตรของสาร (Formula)
1. Arsenic	Metallic arsenic	As ₄
2. Arsenic (+3) oxide	Arsenic trioxide Arsenous oxide White arsenic	As ₂ O ₃ (or As ₄ O ₆)
3. Arsenous acid	-	H ₃ AsO ₃
4. Arsenenous acid, arsenates	Arsenious acid	AsO ₂ ⁻
5. Arsenic (+3) chloride	Arsenic trichloride Arsenous trichloride	AsCl ₃
6. Arsenic (+3) sulfide	Arsenic trisulfide Orpiment Auripigment	As ₂ S ₃
7. Arsenic (+5) oxide	Arsenic pentoxide	As ₂ O ₅
8. Arsenic acid	Orthoarsenic acid	H ₃ AsO ₄
9. Arsenenic acid, arsenates, salt of arsenic acid	Metaarsenic acid	H ₂ AsO ₄ ⁻ , HAsO ₄ ⁻² or AsO ₄ ⁻³
10. Methylarsonic acid	Methanearsonic acid	CH ₃ AsO(OH) ₂
11. Dimethylarsinic acid	Metaarsenic acid	(CH ₃) ₂ AsO(OH)
12. Trimethylarsine acide	-	(CH ₃) ₃ AsO
13. Methylarsine	-	CH ₃ AsH ₂
14. Dimethylarsine	-	(CH ₃) ₂ AsH
15. Trimethylarsine	-	(CH ₃) ₃ AsH

2.1.3 เคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ

1. ปฏิกิริยาทางเคมีของอาร์เซนิกในธรรมชาติ

อาร์เซนิกจะคงรูปอยู่ที่ออกซิเดชัน -3, 0, +3 และ +5 โดย As(V) เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน ส่วนที่มีเลขออกซิเดชัน -3, 0 และ +3 เกิดจากกระบวนการรีดักชันแต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่เป็นบวก และสามารถเปลี่ยนไปในรูปอื่นได้ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้นๆ ซึ่งอธิบายกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของอาร์เซนิกได้ดังนี้ (ฉานเกษม เจริญผล, 2545)

- กระบวนการรีดักชัน ในธรรมชาติกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยมากเกิดจากกระบวนการย่อยสลายในดินหรือหิน น้ำพุร้อน ไบโอะเฮยจากภูเขาไฟ ซึ่งอาร์เซนิกที่ปะปนอยู่จะถูกละลายด้วยน้ำที่มีสภาวะเป็นเบส เกิดเป็นอาร์เซนิกที่อยู่ในรูป As(III) ได้แก่ กรดอาร์เซนิก (Arsenous acid, H_3AsO_3) อาร์เซนิกไตรคลอไรด์ (Arsenic trichloride, $AsCl_3$) หรือ อาร์เซนิกไตรซัลไฟด์ (Arsenic trisulfide, As_2S_3) เป็นต้น จากนั้นสารประกอบเหล่านี้จะสลายตัวอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและเบสเคลื่อนไปตามลำน้ำ และเกิดการตกตะกอนหรือสะสมอยู่กับตะกอนของท้องน้ำได้ นอกจากนี้สารประกอบอาร์เซนิกบางชนิดสามารถเคลื่อนตัวอยู่ในรูปของคอลลอยด์ที่เป็นไอออนบวก ซึ่งเมื่อเจอกับอนุภาคของสารละลายที่มีไอออนลบจะเกิดปฏิกิริยาและตกตะกอนตามหน้าดินหรือท้องน้ำได้ในกระบวนการรีดักชัน As(V) สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีหรือชีวภาพกลับเป็นสารประกอบ As(III) ได้แต่จะเปลี่ยนเป็น As(0) ได้ยาก

- กระบวนการออกซิเดชัน เกิดจากกระบวนการผุกร่อนของหินที่มีอาร์เซนิกปะปนอยู่ โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนและน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบอาร์เซนิก เช่น เกลือของกรดอาร์เซนิก (AsO_4^{3-}) และถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดหรือค่อนข้างเป็นกรดสารประกอบอาร์เซนิกจะเคลื่อนที่ได้ไกล แต่ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นเบสหรือเป็นกลางสารประกอบอาร์เซนิกจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยการตกตะกอนร่วมกับออกไซด์ของเหล็ก และอลูมิเนียม และเมื่อสารประกอบอาร์เซนิกซึมผ่านไปยังบริเวณที่มีอนุภาคของแร่บางชนิดดินโคลนหรือเจลสามารถเกิดการดูดซับ และเกิดคีเลชัน (Chelation) ทำให้เกิดการตกตะกอน และถ้าบริเวณนั้นมีสารประกอบอินทรีย์พวกฮิวมิก (Humic) สะสมอยู่ จะเกิดการตกตะกอนโดยกระบวนการการรวมตัวกับสารอินทรีย์ (Organic binding) As(0) ส่วนมากจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ As(III) มากกว่าในรูป As(V) โดยออกซิเจนเป็นปัจจัยในการเปลี่ยนแปลง สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ As(III) ส่วนใหญ่จะเกิดในสารละลายหรือในพวงจุลินทรีย์ แต่โดยปกติแล้ว As(III) จะไม่พบในธรรมชาติ มักจะถูกออกซิไดซ์ไปอยู่ในรูป

ที่มีเลขออกซิเดชัน 0 หรือ +5 ตัวอย่างของสารประกอบอาร์เซนิกที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ $\text{Fe}(\text{AsO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{AsO}_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ H_3AsO_4

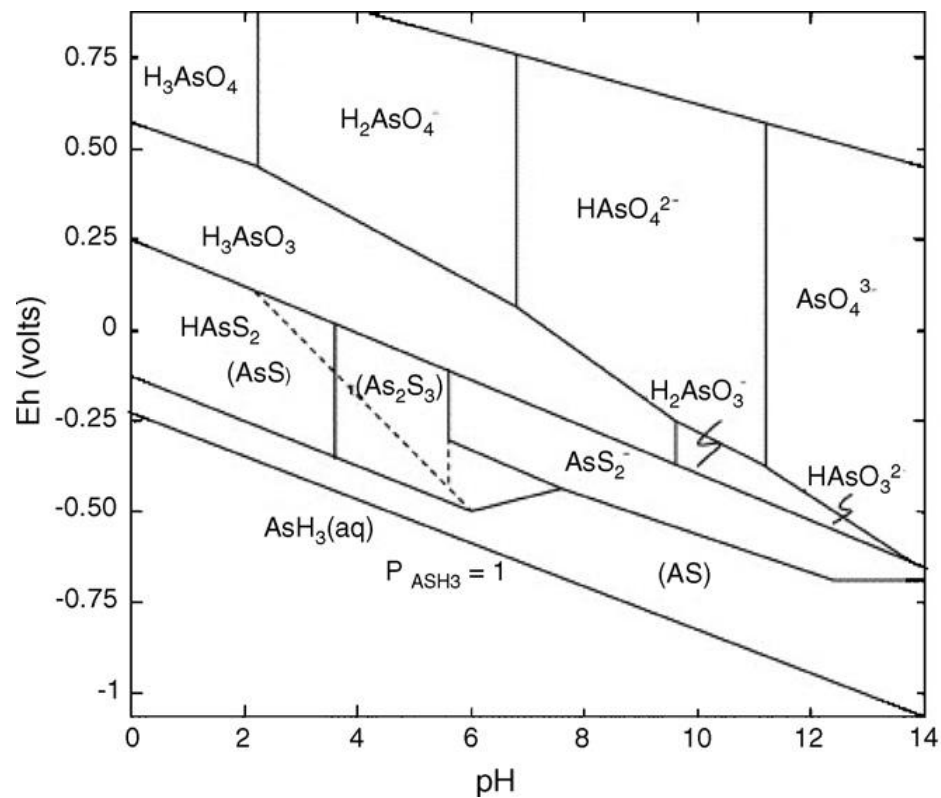
2. ปฏิกิริยาทางเคมีของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติ

อาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งในน้ำที่มีออกซิเจนมักพบอยู่ในรูปของอาร์เซนเตด As(V) เป็นส่วนใหญ่ โดยอยู่ในรูปประจุลบ (Anionic) ของเกลือของกรดอาร์เซนิกต่างๆ ได้แก่ H_2AsO_4^- ($\text{pK}_{a,2} = 6.97$), HAsO_4^{2-} ($\text{pK}_{a,2} = 11.53$) และ AsO_4^{3-} ในช่วงพีเอช 5-12 แต่ในรูปของอาร์เซไนต์ As(III) นั้นพบค่อนข้างน้อย เนื่องจากอาร์เซไนต์ As(III) ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นอาร์เซนเตด As(V) ในช่วงพีเอชของน้ำมีความเป็นด่าง จะคงรูปอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบไร้ออกซิเจน เช่น ในแหล่งน้ำบาดาล และจะพบอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุ (Nonionic) คือ H_3AsO_3 ($\text{pK}_{a,1} = 9.20$) และมีประจุเป็นลบ คือ H_2AsO_3^- ($\text{pK}_{a,2} = 12.13$) เป็นส่วนใหญ่ ในช่วงพีเอชต่ำกว่าและมากกว่า 9.22 ตามลำดับ ในขณะที่อาร์เซนิกอินทรีย์ในรูปเมทิลอาร์เซนิก (Methylated arsenic) มีในแหล่งน้ำน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับอาร์เซนิกอนินทรีย์ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำส่วนใหญ่จึงมุ่งศึกษาวิธีการกำจัดอาร์เซนิกอนินทรีย์ (Marc, 1994) โดยสปีชีส์ของสารประกอบอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับช่วงของพีเอช (Lackovic, 2000; Namasivayam, 1998; Raven, 1998) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ระดับพีเอชต่างๆ กัน (Gupta และ Chen, 1978)

พีเอช	As(III)	พีเอช	As(V)
0-9	H_3AsO_3	0-2	H_3AsO_4
10-12	$H_2AsO_3^-$	3-6	$H_2AsO_4^-$
13	$HAsO_3^{2-}$	7-11	$HAsO_4^{2-}$
14	AsO_3^{3-}	12-14	AsO_4^{3-}

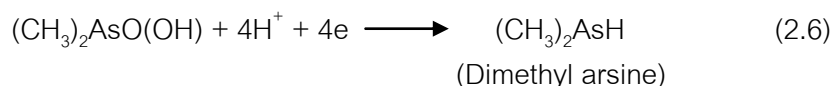
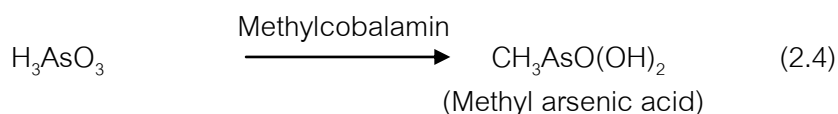
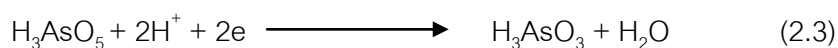
การเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันหรือสปีชีส์ของอาร์เซนิกในแหล่งน้ำนั้น นอกจากจะขึ้นกับค่าพีเอชแล้วยังขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน กระบวนการตกผลึก กระบวนการดูดติดผิว การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand exchange) หรือทั้งหมดรวมกัน รวมถึงค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redoxpotential: E_h) โดยค่า E_h และการกระจายของ As(III) และ As(V) แต่ละสปีชีส์ในแหล่งน้ำกับค่าพีเอชมีความสัมพันธ์กัน โดยน้ำในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ค่า E_h จะสูง ซึ่งพบอาร์เซนิกในรูปอาร์เซนิต As(III) 2 รูป คือ H_3AsO_3 และ $H_2AsO_3^-$ ในช่วงพีเอช 0-9 และ 10-12 ตามลำดับ ค่า E_h จะลดลงในสภาวะที่น้ำไม่มีออกซิเจน โดยจะพบอาร์เซนิกในรูป H_3AsO_3 เมื่อค่า E_h ลดลงในช่วง -0.1 ถึง -0.3 โวลต์ อาร์เซนิกจะอยู่ในรูปของแข็ง As(s) นอกจากนี้ยังพบอาร์เซนิกที่ไม่ละลายน้ำในรูปสารประกอบอาร์เซนิตของเหล็ก Fe(III) และโครเมียม Cr(III) อีกทั้งยังพบตะกอนของออปิเมนต์ (Orpiment, As_2S_3) และแบเรียมอาร์เซนิต (Barium arsenate, $Ba_3(AsO_4)_2(s)$) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การกระจายของอาร์เซนิก As(III) และ As(V) กับค่าพีเอชในแหล่งน้ำธรรมชาติ
(Wang และ Mulligan, 2006)

จากภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า กรดอาร์เซนิก (H_3AsO_3) เลขออกซิเดชัน +3 เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวได้ต่ำ และจะพบกรดอาร์เซนิก ได้มากกว่าสปีชีส์อื่นในช่วงพีเอช 2-9 ในทางตรงข้ามกรดอาร์เซนิก เลขออกซิเดชัน +5 จะปรากฏในรูปกรดแก่และแตกตัวได้ดี และพบ HAsO_4^{2-} ได้มากกว่าสปีชีส์อื่น ในช่วงพีเอช 7-11 และ H_2AsO_4^- พบได้มากที่พีเอชต่ำกว่า 7

นอกจากนี้ในแหล่งน้ำสามารถพบอาร์เซนิกในรูปของสารประกอบอินทรีย์ได้เช่นกัน ได้แก่ เมทิลเลทอาร์เซนิก (Methylate arsenic) แต่พบในปริมาณน้อยมาก คือ น้อยกว่า 1.0 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งเกิดจากการสีก่ร่อนของผิวโลกและถูกชะลงสู่แหล่งน้ำ และถูกเปลี่ยนรูปจากอาร์เซนิก เป็นอนุพันธ์ของเมทิลในรูปสารประกอบอินทรีย์โดยแบคทีเรีย โดยผ่านกระบวนการเมทิลเลชัน/ดีเมทิลเลชัน (Methylation/Demethylation process) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้ (นันทนา ชูจันทร์, 2543)



2.1.4 การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อม (สุชาติ สุธิตกุล, 2547)

การแพร่กระจายอาร์เซนิกในสิ่งแวดล้อมเกิดทั้งจากตามธรรมชาติ และเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ดังต่อไปนี้

1. โดยแหล่งธรรมชาติ เกิดจากการสึกกร่อนของพื้นผิวโลก เปลือกโลก และก๊าซภูเขาไฟ ซึ่งคาดว่า การแพร่กระจายจากแหล่งธรรมชาติจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของสารอาร์เซนียสออกไซด์ (Arsenious oxide) ประมาณ 72,000 ตันต่อปี

2. โดยทางการเกษตรกรรม เกิดจากการนำมาใช้ในการกำจัดวัชพืช (Herbicide) ที่พบว่ามีการใช้แพร่หลายมี 2 ชนิด คือ โมโนโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (Monosodium methane arsonate: MSMA) และไดโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (Disodium methane arsonate: DSMA) สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงเพาะปลูก ใช้เป็นสารป้องกันและกำจัดแมลง (Insecticides) เช่น ซิงค์อาร์เซนเตต (Zinc arsenate) ใช้เพื่อกำจัดด้วง แคลเซียมอาร์เซนเตต (Calcium arsenate) ใช้เพื่อกำจัดแมลงในไร่ฝ้ายและสวนผลไม้ โซเดียมอาร์เซไนต์ (Sodium arsenite) ใช้เพื่อกำจัดหมัด เห็บ ไรและเหาของปศุสัตว์ ส่วนคอปเปอร์อะซิโตอาร์เซไนต์ (Copper acetoarsenite) ใช้เพื่อกำจัดแมลงภายในบ้าน นอกจากนี้ยังใช้อาร์เซนิกผสมกับสารอื่นเพื่อป้องกันและรักษาเนื้อไม้ (Wood preservation) และใช้ผสมในอาหารสัตว์เพื่อเร่งการเติบโตของสัตว์ปีก

3. โดยทางอุตสาหกรรม ใช้อาร์เซนิกในรูปของแข็ง (Metallic arsenic) ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์ เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ในเครื่องมือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) ดีเทคเตอร์ (Detector) และโซลาร์แบตเตอรี่ (Solar battery) ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก ใช้ในรูปอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide, As_2O_3) เพื่อขจัดสีออกจากแก้วทำให้เนื้อแก้วใส ในอุตสาหกรรมฟอกหนังใช้เพื่อรักษาสภาพหนัง ในอุตสาหกรรมยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ ได้แก่ ไตรเพนโนโซโมซิส (Tripanosomosis) และอะมีบิซิส (Amebiasis) ใช้รักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว ดังตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำทิ้งจากกิจกรรมประเภทต่างๆ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2541)

ประเภทกิจกรรม	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของอาร์เซนิก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
โรงงานฟอกหนังสัตว์	0-3,000
โรงงานปุ๋ยไนโตรเจน	0.1-0.8
โรงงานโลหะผสมตะกั่ว-สังกะสี	0.15-0.22
โรงงานผสมโลหะทั้งสแตน-โมลิบดีนัม	0.9
โรงงานนิกเกิล	0.04-1.4
โรงงานถลุงตะกั่ว	0.02-0.06
โรงงานดีบุก	0.5
เหมืองทั้งสแตน	0.21-1.35

ตารางที่ 2.5 ปริมาณอาร์เซนิกที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2541)

แหล่งที่ปล่อยอาร์เซนิก	ปริมาณอาร์เซนิก
เหมืองแร่	0.45 ตันต่อแร่ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี เงิน ทอง หรือยูเรเนียม 1 ล้านตัน
การถลุงโลหะ	955 ตันต่อทองแดงที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	591 ตันต่อสังกะสีที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
	364 ตันต่อตะกั่วที่ผลิตได้ 1 ล้านตัน
ถ่านหิน	1.4 ตันต่อการผลิตถ่านหิน 1 ล้านตัน
น้ำมัน	5.2 กิโลกรัมต่อน้ำมัน 1 ล้านบาเรล

ทั้งนี้เนื่องจากอาร์เซนิกเป็นส่วนประกอบของผิวโลกเพียง 1.5-2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเท่านั้น จึงถูกจัดเป็นธาตุอันดับที่ 20 ของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของโลก อาร์เซนิกที่อยู่บนผิวโลกนั้นมาจากการผุพังของหินหรือแหล่งแร่ที่มีอาร์เซนิกสะสมอยู่ โดยที่แร่ประกอบอาร์เซนิกต่างๆ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบอาร์เซนิต ซึ่งเคลื่อนที่ละลายกับผิวดิน และสามารถเคลื่อนที่ไปได้เร็วและไกลในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่เป็นกลางและด่างจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า โดยสามารถตกตะกอนร่วมกับสารประกอบต่างๆ เช่น สารประกอบของเหล็ก ตะกั่ว สังกะสี โคบอลต์ นิกเกิล ที่มีอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดเป็นแร่ประกอบอาร์เซนิกขึ้น ดังสมการต่อไปนี้ (ธนัชพร อยู่ยั้งยืน, 2547)



นอกจากอาร์เซนิกจะตกตะกอนกับสารประกอบโลหะต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ยังถูกดูดซับโดยแร่ดินและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้อีกด้วย ดังสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11



จากกิจกรรมต่างๆ ทำให้อาร์เซนิกและสารประกอบของอาร์เซนิกแพร่กระจายในอากาศดิน ตะกอน แหล่งน้ำ อีกทั้งสะสมในพืชและสิ่งมีชีวิต

การปนเปื้อนของอาร์เซนิกในชั้นน้ำใต้ดิน เกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนตัวของอาร์เซนิกในดินมีค่าสูง แต่ก็อาจมีปริมาณการปนเปื้อนต่ำลง เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพและการสะสมของสิ่งมีชีวิตในพื้นที่นั้น (Bhumbla และ Keefer, 1994) ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณอาร์เซนิกในดินมีดังนี้ ปัจจัยหลัก คือ ปริมาณธาตุอาร์เซนิกที่มีอยู่ในดินมี 2 แหล่งกำเนิด คือ จากธรรมชาติในหินที่มีแร่อาร์เซนิก และจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ส่วนปัจจัยรอง ได้แก่ สภาพอากาศ ส่วนประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ในดิน และสถานะรีดอกซ์ นอกจากนี้จากการทำแบบจำลองพบว่า ชนิดของหินแร่ที่เป็นแหล่งกำเนิดมีผลต่อปริมาณอาร์เซนิกในดินมากกว่าชนิดของดิน (Huang, 1994)

ปัจจุบันกิจกรรมของมนุษย์เป็นตัวการสำคัญที่ช่วยเพิ่มอาร์เซนิกจากปริมาณเดิมที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เนื่องจากได้ถูกนำมาใช้ในกิจกรรมหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นการผสมลงในยากำจัดศัตรูพืช และสารรักษาเนื้อไม้ ผสมลงในโลหะเจือเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการทนความร้อน (Ellenhorn, 1997) หรือใช้ผสมในอาหารสัตว์ในรูปของ Arsanilic acid (4-aminobenzenearsonic) เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโต อาร์เซนิกยังเป็นผลพลอยได้จากการทำเหมืองแร่ เช่น ทองแดง ตะกั่ว และดีบุก ดังจะเห็นได้จากการปนเปื้อนใน อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีที่มาจากน้ำที่ชะล้างผ่านบริเวณที่เคยทำเหมืองแร่ดีบุก ก๊าซ Arsine (AsH_3) จัดเป็นก๊าซพิษที่ใช้ในโรงงานผลิตสารกึ่งตัวนำ Metallic arsenic ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้ Arsenous acid (As_2O_3 ในน้ำ) เพื่อการรักษาแบบเคมีบำบัดในโรค Acute promyelocytic leukemia (APL) อีกด้วย (Le และคณะ, 2004) และบริเวณที่มีการปนเปื้อนอาร์เซนิกที่เป็นปัญหาสำคัญในประเทศไทยในขณะนี้ คือ เหมืองทองคำ ที่บ้านห้วยผูก บ้านนาหนองบง ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย

2.1.5 เหมืองทองคำวังสะพุง

1. ที่ตั้งและสภาพทั่วไป

เหมืองทองคำ บ้านห้วยผุก และบ้านนาหนองบง เป็นของบริษัททุ่งคาจำกัด ในเครือของบริษัททุ่งคาฮาเบอร์ ตั้งอยู่บริเวณภูทับฟ้า พื้นที่ตั้งของเหมืองทองคำ มีลักษณะเป็นที่ราบหุบเขาในแต่ละส่วนของพื้นที่มีลักษณะสำคัญ ดังนี้ (ภาพที่ 2.2)

1.1 พื้นที่ทางเหนือ คือ บริเวณภูทับฟ้าเป็นเนินเขาสูงมีสายแร่ทองคำเป็นจำนวนมาก

1.2 พื้นที่ทางตะวันออกทางทิศและทิศใต้มีลำห้วยสาธารณะ คือ ห้วยผุก เป็นลำน้ำสาขาของห้วยฮวย พื้นที่บริเวณนี้ ชาวบ้านใช้ในการทำเกษตรกรรม

1.3 พื้นที่ทางตะวันตกมีลำห้วยขนาดเล็กมีลักษณะเป็นน้ำซับ และน้ำชำ ชาวบ้านแถบนี้เรียกว่า ชำปู่ตาและชำป่าบอน



ภาพที่ 2.2 ที่ตั้งและสภาพทั่วไปเหมืองทองคำ ภูทับฟ้า ตำบลเขาหลวง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย
(ที่มา: http://www.mekonglover.com/news_pop.asp?NewsId=223)

2. สภาพปัญหา

เหมืองแร่แห่งนี้เป็นเหมืองแร่ขนาดใหญ่จึงมีข้อสงสัยจากนักสิ่งแวดล้อม เรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อสุขภาพ และวิถีชีวิตของคนที่อยู่รอบๆ เหมือง เพราะเหมืองทองคำเป็นเหมืองที่ต้องใช้สารไซยาไนด์จำนวนมากในกระบวนการแยกแร่ ซึ่งหากขาดการจัดการที่ดีไม่มีมาตรการตรวจสอบที่รัดกุมและขาดการมีส่วนร่วมของชุมชนแล้วอาจมีผลกระทบรุนแรง เช่น

- 2.1 เด็กทารกเกิดมาผิวแห้ง เหมือนถูกเผาจากพิษไซยาไนด์
- 2.2 ปลาในแม่น้ำตับบวมเพราะการปนเปื้อนอาร์เซนิกในแหล่งน้ำ
- 2.3 แม่น้ำหลายสายต้องแห้งขอดเพราะการทำเหมืองแร่ต้องดูดน้ำบาดาลมาใช้ในเหมือง

ใช้ในเหมือง

- 2.4 ประชาชนเป็นโรคใช้ดำเพราะการได้รับพิษของอาร์เซนิก
- 2.5 แหล่งน้ำที่ชาวบ้านใช้อุปโภคเน่าเสีย

จากสภาพปัญหาข้างต้นทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของประชาชนกลุ่มหนึ่ง และสื่อมวลชนบางส่วนได้พยายามเสนอเรื่องราว การทำเหมืองทองคำ ผ่านเวทีต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการนำเสนอในเวทีระดับจังหวัด แต่ก็ทำได้ไม่บ่อยนัก เนื่องจากเป็นเรื่องที่หลายคนบอกว่าเป็นเรื่องไกลตัว เป็นเรื่องที่ภาครัฐต้องเข้าไปดูแล ไม่ใช่เรื่องของประชาชน ดังนั้นเพื่อให้เหมืองแร่ทองคำส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมถึงสิ่งแวดล้อมในวงกว้างกว่านี้ ทุกคนทุกฝ่ายจึงต้องหันมาร่วมมือกันอย่างจริงจัง ปัญหาเหล่านี้ก็จะไม่เกิดขึ้น และก็จะไม่เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทำให้สิ่งแวดล้อมน่าอยู่ยิ่งขึ้น

2.1.6 ความเป็นพิษของอาร์เซนิก

อาร์เซนิกเป็นสารพิษที่มีฤทธิ์เฉียบพลันและเรื้อรัง พิษเฉียบพลัน ได้แก่ เมื่อสัมผัส จะเกิดอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง ถ้าเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดการเบื่ออาหาร โลหิตจาง ส่วนอาการของพิษเรื้อรังมักเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ประสาทส่วนปลาย เยื่อตาอักเสบ และเป็นต้นเหตุให้เกิดโรคมะเร็ง เช่น มะเร็งผิวหนังและมะเร็งตับ จึงถือว่าอาร์เซนิกเป็นสารที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพมนุษย์ที่ต้องคำนึงถึง (Charlet และคณะ, 2001)

ปริมาณอาร์เซนิกที่คนกินแล้วเป็นพิษ ถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในช่วง 1.5 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Arsenic trioxide) ถึง 500 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Diethyl arsenic acid) โดยจะเกิดอาการพิษเฉียบพลัน เช่น อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากหัวใจล้มเหลว ถ้าได้รับอาร์เซนิกในระดับเกินค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) อาจเกิดอาการพิษอาร์เซนิกเรื้อรัง ได้แก่ ผนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค (จุดสีน้ำตาลกระดำกระด่างจุดขาวๆ กระจัดกระจาย ผิวดำเทาตามฝ่ามือฝ่าเท้า) ฝุ่นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด รวมทั้งมะเร็งอวัยวะภายในในบางกรณี (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข, 2542) ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อาการต่าง ๆ ที่เกิดในคนเมื่อได้รับอาร์เซนิกในปริมาณต่างๆ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข, 2542)

ปริมาณอาร์เซนิกที่ร่างกายได้รับ	อาการ
มากกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร	อาการเป็นพิษอาร์เซนิกเรื้อรัง, ผนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะโรค, ฝุ่นที่ตุ่มตามฝ่ามือฝ่าเท้า, ปัญหาทางระบบเส้นโลหิต, ระบบประสาท, ระบบเลือด, มะเร็ง
มากกว่า 1.5 มิลลิกรัม (Arsenic trioxide) ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ถึง 500 มิลลิกรัม (Diethylarsenic acid) ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม	อาจถึงขั้นเสียชีวิต

จากการศึกษาความเป็นพิษของสารประกอบอาร์เซนิก พบว่าอาร์เซนิกอินทรีย์ จะมีความเป็นพิษสูงกว่าอาร์เซนิกอินทรีย์กว่า 1000 เท่า และจัดเป็นสารก่อมะเร็งระดับ A-class ของ United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (group A-human carcinogen) (U.S. EPA, 2003) ซึ่งความเป็นพิษจะขึ้นกับรูปแบบที่พบ โดยอาร์เซไนต์จะมีความเป็นพิษมากกว่าอาร์เซเนต ในขณะที่อาร์เซนิกอินทรีย์ เช่น MMA และ DMA มีความเป็นพิษปานกลาง และจัดเป็นสารที่ส่งเสริมการเกิดมะเร็ง (Cancer promoter) โดย MMA จะมีความเป็นพิษมากกว่า DMA สำหรับ Arsenobetaine มีค่า LD_{50} ¹ สูงมาก จนอาจกล่าวได้ว่าเป็นอาร์เซนิก รูปแบบที่ไม่เป็นพิษ สำหรับค่า LD_{50} ของสารประกอบอาร์เซนิกรูปแบบที่สำคัญ (วรภรณ์ ศรีมูล, 2548) ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่า LD_{50} ของสารประกอบอาร์เซนิกรูปแบบที่สำคัญ (ทำการทดลองในหนู) (U.S. EPA, 2003)

รูปแบบของอาร์เซนิก	LD_{50} (มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม)
<u>อาร์เซนิกอินทรีย์</u>	
Arsenite (As(III))	15-30
Arsenate (As(V))	20-200
<u>อาร์เซนิกอินทรีย์</u>	
MMA	700-1800
DMA	1200-2600
Arsenocholine	6500
Arsenobetaine	>10000

¹ LD_{50} หรือ lethal dose 50 เป็นความเข้มข้นของสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายไปครึ่งหนึ่งภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งอาจเป็น 24, 48 หรือ 72 ชั่วโมง ค่า LD_{50} ถ้ามีค่าต่ำ แสดงว่าสารนั้นมีความเป็นพิษสูง

2.1.7 มาตรฐานการควบคุมของอาร์เซนิก

1. มาตรฐานน้ำดื่ม ดังตารางที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิก ที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยประเทศหรือองค์กรต่างๆ และตารางที่ 2.9 แสดงถึงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิก ซึ่งอนุญาตให้มีได้ในน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ ในประเทศไทย

2. มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน องค์การอนามัยโลกได้กำหนดมาตรฐานอาร์เซนิกในน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำประปาไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนมาตรฐานน้ำดิบของแต่ละประเทศนั้นแตกต่างกัน เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดมาตรฐานอาร์เซนิกในน้ำดิบของน้ำประปาไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. มาตรฐานน้ำทิ้งประเทศญี่ปุ่นและประเทศสิงคโปร์ กำหนดค่ามาตรฐานของน้ำทิ้งที่มีอาร์เซนิกหรือสารประกอบอาร์เซนิก ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม และกระทรวงอุตสาหกรรมได้กำหนดให้น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมมีความเข้มข้นของอาร์เซนิกไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และประเทศอังกฤษก็ได้กำหนดไว้เท่ากับประเทศไทย

ตารางที่ 2.8 มาตรฐานน้ำดื่มของต่างประเทศ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2541)

ประเทศหรือองค์กรต่างๆ ที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ยอมรับให้มีได้ในน้ำดื่ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
สหรัฐอเมริกา	0.05
สหภาพแห่งสาธารณรัฐโซเวียตสังคมนิยม	0.05
กลุ่มประชาคมยุโรป	0.05
องค์การอนามัยโลก	0.01

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานน้ำดื่มที่กำหนดโดยหน่วยงานต่างๆ ของประเทศไทย (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2541)

หน่วยงานที่กำหนด	ปริมาณความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ยอมรับให้มีได้ในน้ำดื่ม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
กระทรวงสาธารณสุข	0.05
กรมทรัพยากรธรณี	0.05
การประปานครหลวง	0.01-0.05
กรมโยธาธิการ	0.05
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	0.05

2.2 ทราย (Sand) (กรมทรัพยากรธรณี, 2543 อ้างถึงใน พงศภัทร ศรีขจร, 2549)

ทรายเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้ทั้งในงานก่อสร้างและทางด้านอุตสาหกรรม มีลักษณะร่วนซุยเป็นเม็ดเล็กๆ ไม่เกาะกัน มีหลายสี เช่น สีขาว เทาอมชมพู ชมพูอ่อน และส้มอ่อน เป็นต้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดระหว่าง 0.06-2 มิลลิเมตร ลักษณะรูปร่างของทรายมีทั้งชนิดเหลี่ยมและชนิดมน มีความคงทน ทรายเป็นแร่ควอร์ตซ์ (Quartz) หรือที่เรียกว่า แร่เขียวหนุมาน มีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) และส่วนประกอบอื่น ได้แก่ Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , H_2O และ LOI (Loss of Ignition คือ ส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้) ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการพิจารณาคุณภาพของทรายเพื่อใช้งานอุตสาหกรรม ซึ่งทรายมีขนาดต่างๆ กันสามารถแบ่งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทราย ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทราย

ลักษณะเม็ดทราย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)
ทรายละเอียด	0.125-0.25
ทรายขนาดกลาง	0.25-0.5
ทรายหยาบ	0.5-1
ทรายหยาบมาก	1-2

ถ้าวัสดุนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 2 มิลลิเมตร และอยู่ระหว่าง 2-64 มิลลิเมตร จัดเป็นกรวด (Gravel) ซึ่งกรวดจะเกิดร่วมกับทราย

2.2.1 การกำเนิดทราย

ทรายเป็นตะกอนที่เกิดจากการสลายตัวผุพังของหินหลายชนิด เช่น หินชั้น หินอัคนี และหินแปร แต่หินที่ผุพังแล้วให้ตะกอนทรายได้ดี คือ หินทราย และหินแกรนิต เนื่องจากหินแกรนิตมีแร่ควอร์ตซ์เป็นแร่ประกอบหินอยู่มาก และมีเม็ดโตเมื่อเกิดการผุพังจึงให้ปริมาณทรายมาก และแร่ควอร์ตซ์เป็นแร่ที่คงทนต่อการกัดกร่อน ทรายที่เกิดจากหินแกรนิตจึงมีขนาดเม็ดค่อนข้างใหญ่กว่าทรายที่เกิดการผุพังของหินทราย นอกจากนี้แร่ควอร์ตซ์ที่ประกอบเป็นหินทรายจะมีขนาดเล็ก และอัดตัวกันไม่แน่น จึงผุพังง่ายเมื่อถูกพัดพามา ดังนั้นขนาดของทรายจึงแปรผันไปตามลักษณะหินต้นกำเนิด และระยะทางที่ถูกพัดพามาตะกอนทรายที่สะสมตัวของประเทศไทยส่วนมากเกิดขึ้นในยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ซึ่งเป็นยุคสุดท้ายของการแบ่งเวลาทางธรณีวิทยา โดยมีอายุประมาณ 2 ล้านปีที่ผ่านมามาจนถึงปัจจุบัน

2.2.2 ชนิดของทราย

การแบ่งชนิดทราย และการเรียกชื่อขึ้นอยู่กับสถานที่กำเนิดของแหล่งทรายนั่นๆ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด

1. ทรายบก หมายถึง ทรายที่มีต้นกำเนิดอยู่บนแผ่นดิน ส่วนมากจะถูกพัดพามาสะสมตัวในรูปแบบต่างๆ กัน ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ทรายบกเป็นทรายที่พบในดินและมีหน้าดินปิดทับอยู่ ทรายชนิดนี้จะอยู่ลึกลงไปดินมากกว่า 30-100 เมตร ลักษณะของทรายชนิดนี้จะเป็นชั้นๆ มีทรายละเอียดและหยาบสลับกันไป องค์ประกอบของเม็ดทรายประกอบด้วยแร่ควอร์ตซ์ เฟลด์สปาร์ไมกาและเหล็กออกไซด์ ทรายชนิดนี้จะมีเนื้อดินปะปนอยู่ทำให้มีปริมาณซิลิกาต่ำโดยมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบร้อยละ 88-90 เนื่องจากมีดินปะปนอยู่มาก ดังนั้นส่วนใหญ่จึงนำมาใช้ประโยชน์ในการถมที่ ส่วนทรายหยาบและทรายละเอียดจะนำมาใช้ในงานก่อสร้าง

2. ททรายแม่น้ำ หมายถึง ททรายที่ถูกพัดพามาสะสมตัวตามแม่น้ำ ลำคลอง ลำห้วยต่างๆ โดยรวมทั้งลำน้ำในอดีตและปัจจุบัน ลักษณะของทรายชนิดนี้จะมีสีเหลือง เนื่องจากมีเหล็กออกไซด์ปะปนอยู่และมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 87-89 ทรายชนิดนี้นิยมใช้ในงานก่อสร้าง เพราะมีลักษณะเป็นทรายหยาบและเม็ดทรายมีขนาดใหญ่

3. ทรายชายทะเล หมายถึง ทรายที่เกิดจากการผุพังของหิน และถูกพัดพามาโดยกระแสน้ำทำให้เกิดการสะสมตัวตามชายทะเลหรือทะเลสาป เนื่องจากน้ำทะเลมีเกลือของ NaCl, KCl และ $MgCl_2$ ผสมอยู่ทำให้ทรายชนิดนี้มีสารเคมีเหล่านี้ปะปนอยู่ ทรายชายทะเลมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90-95 ทรายชนิดนี้จะนำไปใช้ประโยชน์ในการถมที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เพราะสารเคมีข้างต้นที่ปะปนอยู่ทำให้ซีเมนต์ไม่จับตัวกัน

4. ทรายแก้ว หมายถึง ทรายที่พบอยู่ตามที่ราบชายทะเลห่างจากทะเลประมาณ 0.5-1 กิโลเมตร ส่วนใหญ่พบในภาคตะวันออก เช่น จังหวัดระยอง จันทบุรี ตราด และภาคใต้ เช่น จังหวัดชุมพร ภูเก็ต ตรัง ปัตตานี นครศรีธรรมราช และสงขลา เป็นต้น โดยแต่ละแหล่งมีคุณภาพแตกต่างกันทรายชนิดนี้เป็นวัสดุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมแก้วและผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับแก้วจึงเรียกว่า ทรายแก้วหรือทรายซิลิกา เกิดจากแร่ 6 ชนิด คือ ควอร์ต คาลซิโดนี โอปอล ไทรดีไมต์คริสโทบาไลต์ และเลอซาเทเลียไรต์ ซึ่งแร่เหล่านี้มีส่วนประกอบเป็น SiO_2 ทั้งสิ้น ทรายแก้วที่บดละเอียดแล้วจะเป็นผงสีขาว และมีความวาวเหมือนแก้ว ทรายแก้วมี SiO_2 เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 95-99 ขึ้นไป

2.2.3 ประโยชน์ของทราย

การนำทรายมาใช้ประโยชน์นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิด และประเภทของงานแล้วสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ ในการพิจารณาเลือกชนิดของทราย ซึ่งประโยชน์ของทรายมีมากมาย เช่น ใช้ในการก่อสร้าง ใช้สร้างถนน ใช้ทำไม้ขีดไฟใช้ในอุตสาหกรรมสี ใช้ในการกรองน้ำ ใช้ในอุตสาหกรรมทำสารเคมี ใช้ทำอิฐทนไฟใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา และใช้ในการทำแก้ว เป็นต้น

2.2.4 คุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการกรองน้ำ

คุณสมบัติเบื้องต้นของทรายที่ใช้ในการกรองน้ำต้องเป็นทรายบริสุทธิ์ ไม่มีดินเหนียวฝุ่น สารอินทรีย์และแร่ไมกาเจือปนอยู่ ส่วนรูปร่างของเม็ดทรายไม่มีผลต่อการกรองน้ำมากนัก แต่ไม่ควรมีรูปร่างแบนราบ ทรายที่มีเม็ดเหลี่ยมหรือกลมจะใช้ได้ดี และควรมีขนาดเท่าๆ กัน ลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์ ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ลักษณะสมบัติของทรายกรองน้ำในเชิงพาณิชย์ (บรรเจิด แสงจันทร์ และคณะ, 2544)

แหล่งทราย	ร้อยละ SiO_2	ร้อยละ Al_2O_3	ร้อยละ Fe_2O_3	ร้อยละ CaO	ร้อยละ MgO
ระยอง	98.8	0.2	0.07	0.4	0.08
จันทบุรี	99.2	0.1	0.15	0.3	0.05
ตราด	99.2	0.1	0.01	0.3	0.05
ชุมพร	98.8	0.1	0.01	0.2	0.04
สงขลา	99.0	0.3	0.05	0.3	0.05

2.3 ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เซชัน

2.3.1 ฟลูอิดไดซ์เซชัน (นฤมล วงศาสุข, 2547)

ในปัจจุบันฟลูอิดไดซ์เซชันเป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิต และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา

2.3.2 นิยาม

คำว่า ฟลูอิดไดซ์เซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหลตั้งนั้นเมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอตกลงแล้วให้ของไหล (ก๊าซ และของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกทางส่วนบนของหอตกลง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไดซ์เซชัน

2.3.3 ประเภทของฟลูอิดไดซ์เซชัน

งานของฟลูอิดไดซ์เซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ และฟลูอิดไดซ์เซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายความว่า ในหอตกลงหรือในเบดที่ใช้ทำงานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นก๊าซหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไดซ์เบด 2 สถานะ จึงแบ่งย่อยได้เป็นฟลูอิดไดซ์เซชันของก๊าซ (Gas fluidization) และฟลูอิดไดซ์เซชันของเหลว (Liquid fluidization)

2. ฟลูอิดไดซ์เซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายความว่า ในหอทดลองหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

สำหรับฟลูอิดไดซ์เซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไดซ์เซชันสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (Bubble column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมาก

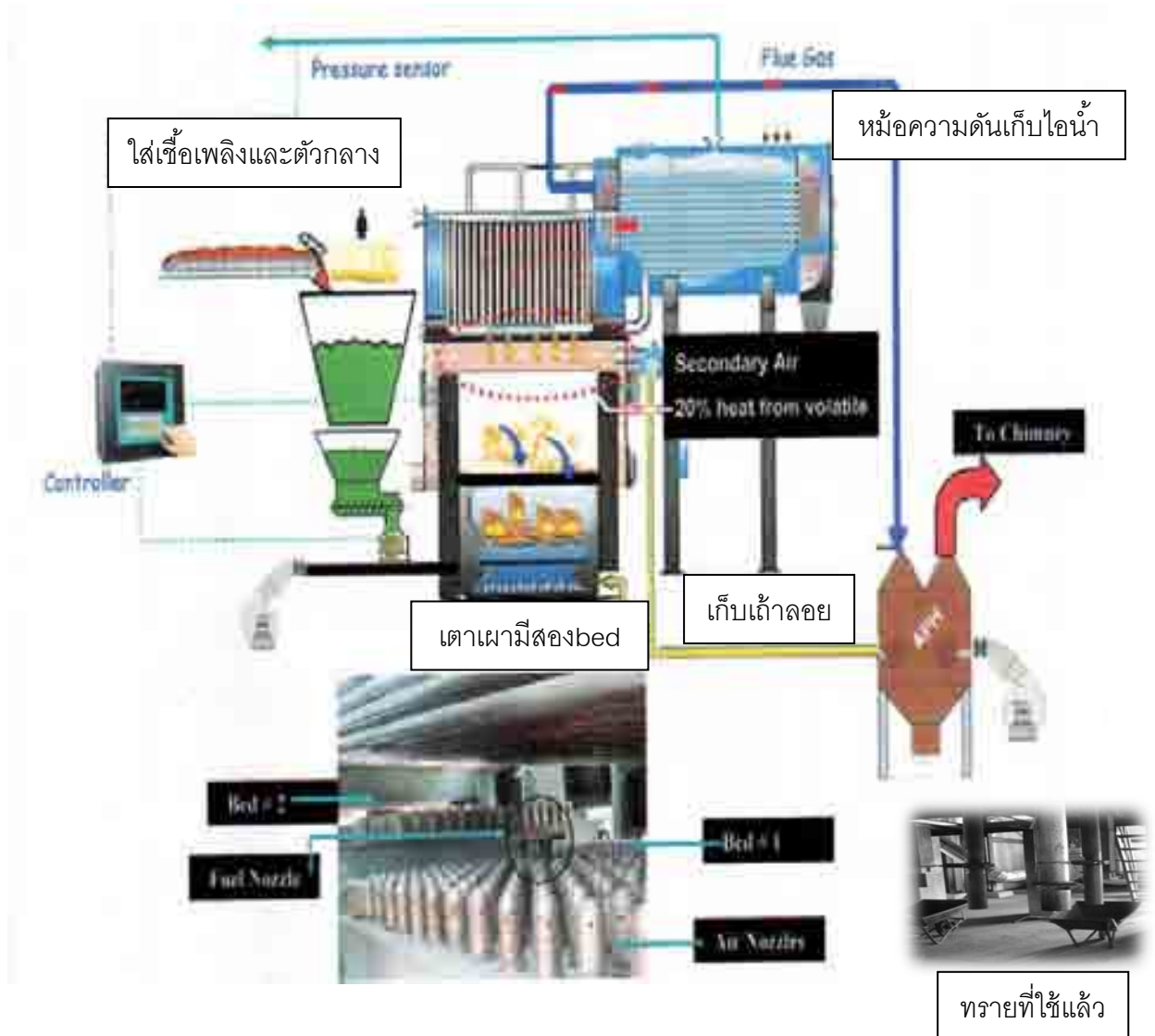
2.3.4 ลักษณะของเตาฟลูอิดไดซ์เบด

คำว่า เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายก๊าซ (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัว และการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างไม่มีทิศทางที่แน่นอน

2.3.5 ลักษณะการทำงานของเตาฟลูอิดไดซ์เบด (บริษัทไทยโพรเท็คส์โกลด์มิลลส์ จำกัด, 2551 อ้างถึงใน วรารุณ วัดขนาด, 2552)

Fluidised bed coal fired boiler เริ่มใช้งานเมื่อ วันที่ 7 เดือน กรกฎาคม 2550 ยี่ห้อ Thermax จากประเทศอินเดีย ดูแลโดยบริษัท ฟูลชีสเต็ม เอ็นจิเนียริง จำกัด สำหรับการผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการผลิตหลักๆ ที่ใช้ไอน้ำ คือ กระบวนการย้อมผ้า อบผ้า อบเส้นด้าย เชื้อเพลิงและตัวกลางที่ใช้ คือ ทราย (Sand) ถ่านหิน (Coal) ถ่านไม้ (Charcoal) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ส่วนประกอบภายในเตาฟลูอิดไดซ์เบด (บริษัทไทยโพรเท็คส์โกลด์มิลลส์ จำกัด, 2551 อ้างถึงใน วรารุณ วัดขนาด, 2552)

2.3.6 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของบริษัทไทยโพรเท็คส์โพลีเมอร์

ปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการใช้ของฝ่ายผลิต ซึ่งถ่านไม้จะใช้ใน ช่วงแรกที่เริ่มเดินระบบเท่านั้น ส่วนเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ คือ ทวาย และ ถ่านหิน โดยมีค่าใช้จ่ายของ วัตถุดิบ ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ปริมาณการใช้ทวาย และราคา

วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้ (กิโลกรัมต่อเดือน)	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	ราคา (บาทต่อเดือน)
ทวาย	27,000	0.9	24,300
ถ่านหิน	1,175,507	2.92	3,432,480

โดยบริษัทไทยโพรเท็คส์โพลีเมอร์ สั่งซื้อทวายมาจากท่าทวายประเสริฐ จังหวัด กาญจนบุรี ขนาดทวาย 2 มิลลิเมตร ส่วนถ่านหินสั่งซื้อจาก Unique, Asia green และ Supakit ถ่านหินปีหุบพี้นท์ 5-10 มิลลิเมตร ให้ค่าความร้อน 6,500-6,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ปริมาณ ทวายที่ต้องทิ้งต่อเดือน คือ 27 ตันต่อเดือน คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ต้องส่งกำจัด ตันละ 1,300 บาท คิดเป็นเงิน 35,100 บาทต่อเดือน ปัจจุบันทางโรงงานใช้ทวายถมที่บริเวณรอบโรงงาน แต่เนื่องจากมี ที่จำกัด ดังนั้นจึงเป็นปัญหาในการจัดการ เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำไปกำจัดอีกต่อหนึ่ง

2.3.7 ผลการวิเคราะห์ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด

ตารางที่ 2.13 ผลการวิเคราะห์ทราย (International testing service, i-test-lab) วันที่ 11 เดือน สิงหาคม 2551 (รกราก วัดขนาด, 2552)

Analyses	Method*	Unit	Results	Standard**
Cr	Acid Digestion-ICP	mg/kg	5.59	2,500
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	5.0
As	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.83	500
	Leachate-ICP	mg/l	0.07	5.0
Zn	Acid Digestion-ICP	mg/kg	11.4	5,000
	Leachate-ICP	mg/l	0.08	250
Cd	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.21	100
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	1.0
Ni	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.87	2,000
	Leachate-ICP	mg/l	0.02	20
Cu	Acid Digestion-ICP	mg/kg	<0.01	2,500
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	25
Pb	Acid Digestion-ICP	mg/kg	0.54	1,000
	Leachate-ICP	mg/l	0.04	5.0
Ba	Acid Digestion-ICP	mg/kg	800	10,000
	Leachate-ICP	mg/l	44.6	100
Hg	Acid Digestion-ICP	mg/kg	<0.01	20
	Leachate-ICP	mg/l	<0.01	0.2

*method วิธีทดสอบตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุ
ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548) และ US EPA SW-846

**Standard TTLC Regulatory Level

2.3.8 กากของเสียอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

1. ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตหรือสิ่งของที่เสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้ หรือไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งอาจมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ โดยจะแบ่งของเสียอุตสาหกรรมตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

2. การกำหนดรหัสของชนิดและประเภทของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจะถูกแบ่งออกเป็น 19 หมวดหมู่ และมีการกำหนดรหัสเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยใช้รหัสเลข 6 หลัก ตัวเลขสองหลักแรก แสดงถึงประเภทของการประกอบกิจการหรือชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตัวเลขสองหลักกลาง แสดงถึงกระบวนการเฉพาะในการประกอบกิจการนั้นๆ ที่ทำให้เกิดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วหรือเป็นชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตัวเลขสองหลักสุดท้าย แสดงถึงลักษณะเฉพาะของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น เช่น รหัส 05 07 01 หมายถึง สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (05) จากกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ (07) ที่ปนเปื้อนด้วยสารปรอท (01) เป็นต้น

ในการกำหนดรหัสที่เหมาะสมกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ให้พิจารณาตามขั้นตอนต่อไปนี้ คือ

2.1 พิจารณาว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้น มาจากกระบวนการที่สอดคล้องกับ หมวด 01 ถึง หมวด 12 หรือ หมวด 17 ถึง หมวด 19 หรือไม่ โดยให้หารหัสเลข 6 หลักที่เหมาะสมในหมวดเหล่านี้ ยกเว้นรหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99

2.2 หากไม่สามารถหารหัสที่เหมาะสมตามขั้นตอนแรกได้ ให้ตรวจสอบรหัสตามชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ในหมวด 13 ถึง 15

2.3 ถ้ายังไม่สามารถระบุได้ ให้ตรวจสอบรหัสสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหมวด 1

2.4 หากยังไม่สามารถระบุรหัสเลข 6 หลัก จากหมวด 16 ได้ ให้กลับไปใช้รหัสที่มีเลข 2 หลักสุดท้ายเป็น 99 ในหมวดที่เกี่ยวข้องในข้อแรก

สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสเลข 6 หลัก ที่กำกับด้วยตัวอักษร HA (Hazardous waste Absolute entry) หรือ HM (Hazardous waste-Mirror entry) ให้ถือว่าเป็นสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีคุณสมบัติเป็นของเสียอันตราย ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีรหัสกำกับด้วย HM ผู้ประกอบการต้องทำการวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด ในกรณีที่ต้องการโต้แย้งว่าสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วดังกล่าวไม่เข้าข่ายเป็นของเสียอันตรายตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ รหัสเลข 6 หลักของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ซึ่งทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีรหัส คือ 10 01 24 หมายถึง ของเสียจากกระบวนการใช้ความร้อน (Wastes from thermal processes) (10) จากการผลิตไฟฟ้าและโรงงานที่มีกระบวนการเผาไหม้ (ที่ไม่ใช่ของเสียรหัส 19) (Wastes from power stations and other combustion plants (except 19)) (01) ของเสียที่เป็นของแข็งจำพวกทราจ (24)

2.4 ไคติน และไคโตซาน

ปัจจุบันได้มีการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติหลายประการ เช่น เป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (Biodegradation) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) และไม่มีความเป็นพิษ (Nontoxic) เป็นต้น ดังนั้นจึงปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ และไม่เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Bassi และคณะ, 1999)

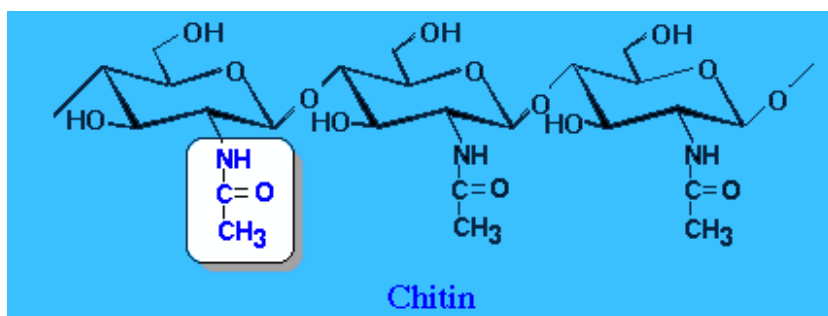
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน

ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากเป็นอันดับสองของโลก รองจากเซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มเดียวกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ แต่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคล้ายและแตกต่างกันกับเซลลูโลส เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้าง (สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง, 2548)

ไคติน พบมากตามผนังเซลล์ของพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เช่น ในยีสต์ที่ใช้ทำเบียร์ และไวน์ พบในส่วนที่กำลังแตกหน่อ ในพืชบางชนิดอาจมีไคตินแทนเซลลูโลส หรืออาจเกิดร่วมกับเซลลูโลสได้ ส่วนในสัตว์จะมีไคตินเป็นคิวติเคิล (Cuticle) ที่ผิวของเนื้อเยื่อผิวหนัง (Epithelium) แต่โดยมากพบไคตินที่เปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง รวมทั้งสัตว์ในพวกครัสเตเชียน

(Crustacean) เช่น กุ้ง ปู หอย แมลง และปลาหมึก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถพบได้ในเห็ด รา หลายชนิด เนื่องจากผนังเซลล์ จึงมีบทบาทสำคัญในเซลล์ และการเจริญของจุลินทรีย์ (เยวภา ไหวพริบ, 2534; Cabib และคณะ, 1996; Knorr, 1991 และ Muzzarelli, 1977)

ไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly-N-etylglucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 มีหมู่ Acetylated amino (NH-CO-CH₃) แทนที่จะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปเป็น (C₈H₁₃NO₅)_n ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 (Lee, 1974 อ้างถึงใน เกษม สีดอกบัว, 2543) อย่างไรก็ตามไคตินในธรรมชาติจะมีบางหน่วยที่ไม่มีหมู่อะซิทิล โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ในสายพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่า ไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งทำให้ไคตินไม่ละลายในสารละลายต่างๆ ไปโดยง่าย การใช้ประโยชน์จากไคตินจึงไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้น คือ การเตรียมเป็นไคโตซาน (จารุรัตน์ เชาว์เลิศ, 2546)

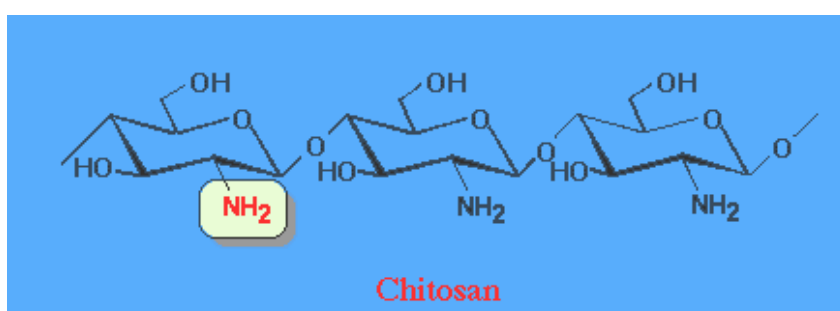


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของไคติน

(ที่มา: <http://www.wellable.com/product/chitin.gif>)

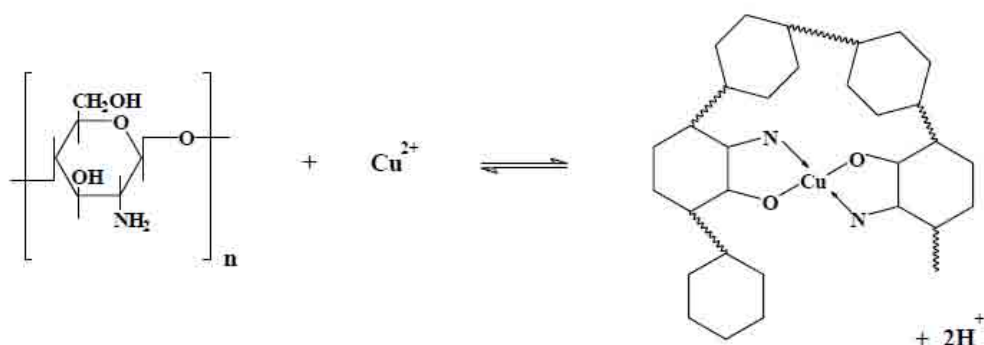
ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่อะซิทิลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่อะมิโนอิสระ (NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง ดังภาพที่ 2.5 โดยทั่วไปถ้าหมู่อะซิทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 จะเรียกว่า ไคโตซาน และถ้าหมู่อะซิทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณ 90-100 เรียกว่า Fully deacetylated chitosan ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และไนโคโตซานร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่อะซิทิลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจะไม่แน่นอน และอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89-8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซานจะ

เห็นว่าไคโตซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่อะมิโน และอาจพิจารณาว่าเป็นพอลิเมอร์ประจุบวก ทำให้ไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับ สารอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls โปรีติน และกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) รวมถึงไอออนโลหะ เนื่องจากสมบัติการดูดซับที่ดีเลิศ ไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็นสารจับก้อน (Coagulating agent) ได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลายกรดแอสติติก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในไคโตซานมีสมบัติที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนักได้ (จารุรัตน์ เชาว์เลิศ, 2546)



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน

(ที่มา: <http://www.wellable.com/product/chitosan.gif>)



ภาพที่ 2.6 การเกิดคีเลตของทองแดงกับไคโตซาน (Kaminski และ Modrzejewska, 1997)

ความสามารถของไคตินและไคโตซานในการรวมกับ Alkali และ Alkaline metals จะน้อยมาก แต่ Transition-metal ions ของแถวแรก เช่น สังกะสี นิกเกิล และทองแดง จะเกิดคีเลตได้ดีกับไคโตซานความสามารถในการเกิดคีเลตของไคโตซานสูงกว่าไคติน เนื่องจากมีหมู่อะมิโนมากกว่าไคโตซานเกิดคีเลตกับไอออนโลหะ โดยปล่อยไฮโดรเจนไอออน (H^+) ออกมา ดังภาพที่ 2.6

2.4.2 แหล่งของไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดตามธรรมชาติ เราจะพบตามผนังเซลล์ของพืชและสัตว์ เช่น ในยีสต์ที่ใช้ทำ เบียร์ และไวน์ ในพืชบางชนิดอาจจะมีไคตินแทนเซลลูโลสหรือเกิดร่วมกันกับเซลลูโลสก็ได้ ส่วนในสัตว์จะมีไคตินอยู่เป็นคิวติเคิล (Cuticle) ที่ผนังของอวัยวะที่เลื่อม (Epithelium) ส่วนมากเราจะพบไคตินในเปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง แมลง เชื้อรา เชื้อยีสต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์ที่มีโครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ของสัตว์ใน Phylum arthropod โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Class crustacean ได้แก่ กุ้ง ปู กุ้ง ตลอดจนใน Class insect ได้แก่ แมลงสาบ ตัวด้วง เป็นต้น ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆ จะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ดังตารางที่ 2.14 ได้มีผู้รายงานว่ (วิสิฐ จະวะสิต และลูกจันท์ ภักฤษพันธ์, 2533) หากนำสิ่งที่เปลือกทิ้งจากการแปรรูปกุ้ง ปู เคย ทั่วโลกมารวมกัน จะได้ไคตินถึง 150 ล้านกิโลกรัม ดังตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.14 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knorr, 1984)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
<u>สัตว์น้ำเปลือกแข็ง</u>		<u>แมลง (Insects)</u>	
(Crustaceans)		แมลงสาบ (Periplaneta)	2.0 ^a
ปู (Cancer)	72.1 ^c	แมลงสาบ (Blatella)	18.4 ^c
ปู (Carcinus)	0.4-3.3 ^a		10 ^b
	8.29 ^b		35 ^c
	64.2 ^b	แมลงปีกแข็ง (Colcoptera)	5-15 ^b
ปูใหญ่ (Paralithodes)	35 ^b		27-3 ^c
ปูน้ำเงิน (Callinectes)	14 ^a	แมลงปีกแข็ง (Tenebrio)	2.1 ^a
ปูแดง (Pleuroncodes)	1.3-1.8 ^b		4.9 ^b
กุ้ง (Crangon)	5.8 ^b		31.3 ^c
	69.1 ^c	แมลงวัน (Dipteral)	54.8 ^c
กุ้งลอบสเตอร์	69.8 ^c	ผีเสื้อ (Pieris)	64 ^c
(Nephropes)	6.7 ^b	ตั๊กแตน (Grasshoppers)	2-4 ^c
กุ้งลอบสเตอร์ Homarus)	60.8-77.0 ^c		20 ^c
เพรียง (Lepas)	58.3 ^c	ตัวไหม (Bombyx)	44.2 ^c

ตารางที่ 2.14 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knorr, 1984) (ต่อ)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
เห็ด รา (Fungi)		สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังแต่มีเปลือกแข็ง (Molluscan organs)	
<i>Aspergillus Niger</i>	42.2 ^e	เปลือกหอยกาบ (Clamshell)	6.1 ^b
<i>Penicillium notatum</i>	18.5 ^e	เปลือกหอยนางรม (Oyster shell)	3.6 ^a
<i>Penicillium chrysogenum</i>	20.1 ^e	แกนปลาหมึก (Squid, skeletal pen)	41.0 ^c
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	44.5 ^e	เคย (Krill, deproteinized shell)	40.2 ^c
<i>Mucor rouxii</i>		แมลงปีกแข็ง (May)	16 ^b
<i>Lactarius vellereus</i>	19.0 ^e		

a. น้ำหนักเปียก (Wet body weight)

b. น้ำหนักแห้ง (Dry body weight)

c. น้ำหนักเปลือกนอก (Organ weight of cuticle)

d. น้ำหนักแห้งของเปลือกนอกทั้งหมด (Total dry weight of cuticle)

e. น้ำหนักแห้งของผนังเซลล์ (Dry weight of the cell wall)

ตารางที่ 2.15 การประมาณปริมาณผลผลิตทั่วโลกของสารประเภทไคตินจากแหล่งต่างๆ (วิสิฐ จະวะสิต และลูกจันทร์ ภัคร์ชพันธ์, 2533)

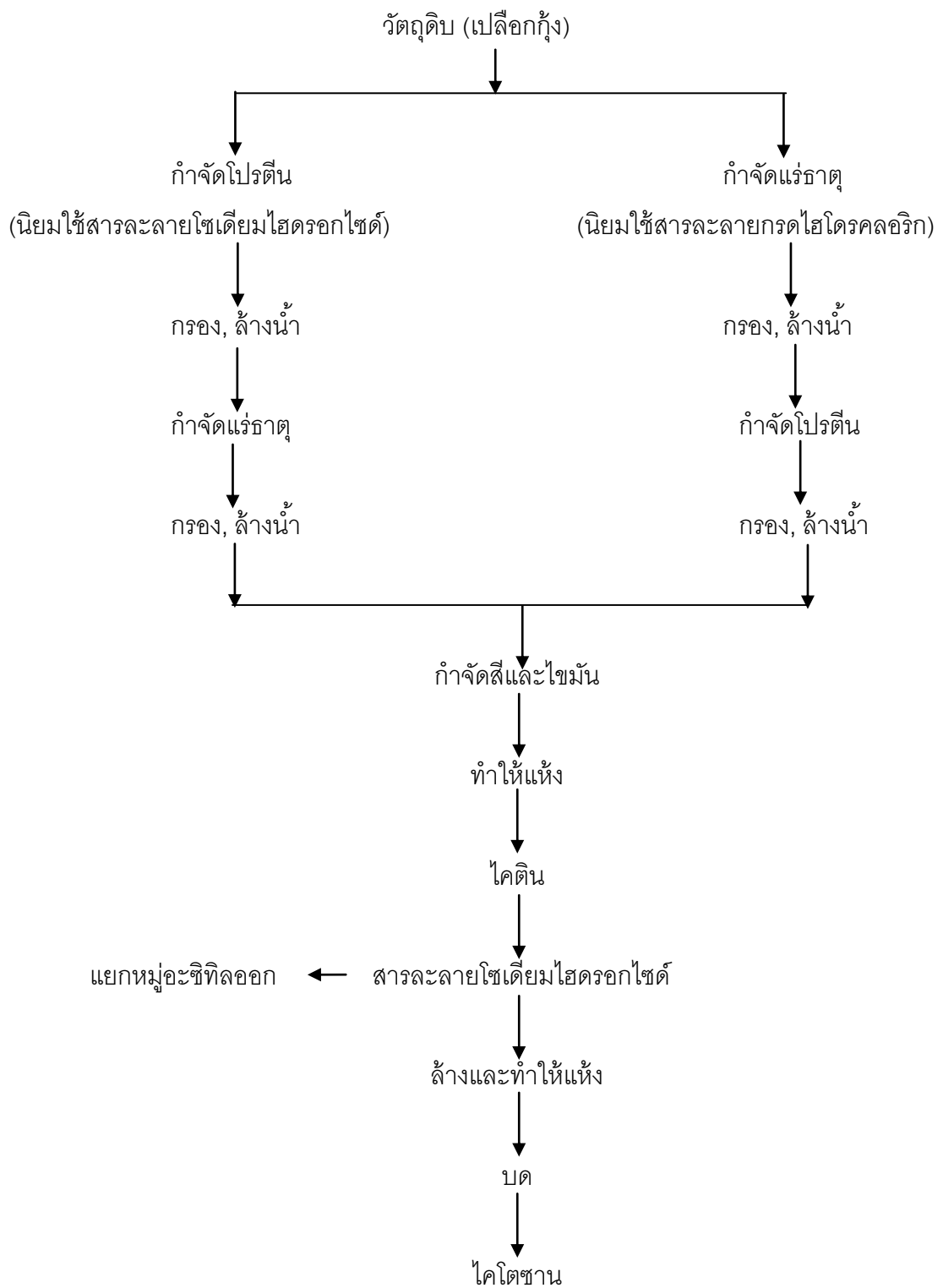
แหล่งของไคติน	ปริมาณ ผลผลิตที่ ได้ (10^3 ตัน)	ของเหลือทิ้งจากการย่อยไคติน (Chitinaceous waste)				ปริมาณ ไคตินที่ คาดว่าจะ ได้รับ
		สัดส่วนของ ผลผลิตที่ได้ (%)	น้ำหนัก เปียก (10^3 ตัน)	ของแข็ง (%)	น้ำหนัก แห้ง (10^3 ตัน)	
สัตว์น้ำเปลือกแข็ง (Shellfish) ^{d,e}	1,700	50-60	468	30-35	154	39
เคย (Krill) ^f	18,200	40	3,640	22	801	56
หอยกาบคู่/หอย นางรม (Clam/oyster) ^e	1,390	65-85	521	90-95	482	22
ปลาหมึก (Squid) ^{e,g}	660	20-40	99	21	21	1
เห็ดรา (Fungi) ^h	790	100	790	20-26	182	32
แมลง (Insects)	-	-	-	21-26	-	-
รวมทั้งหมด	22,740		5,118		1,640	150

- ประมาณค่าเฉลี่ยพื้นฐาน หน่วยเป็น 103 ตัน
- สมมติให้เป็นครึ่งหนึ่งของผลผลิตที่ได้ทั้งหมดในกระบวนการ ยกเว้นเห็ดราที่ผ่านขั้นตอนการหมักแล้ว
- คำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ยผลผลิตไคตินที่ได้
- สัตว์น้ำเปลือกแข็งประกอบด้วยปู กุ้งฝอย กุ้ง กุ้งลอบสเตอร์ และกุ้งทะเล
- ปริมาณเฉลี่ยที่จับขึ้นมาได้ในรอบ 5 ปี (1970-1974)
- ปริมาณที่คาดว่าจะจับขึ้นมาได้ของ FOA (Rome)
- คำนวณได้จากการบริโภคซึ่งคิดเป็นร้อยละ 50 ของสัตว์น้ำ
- ผลิตผลพลอยได้ของกระบวนการกรดซิตริกและปฏิชีวนะ สมมติให้ปริมาณที่ได้จากกรดซิตริกและใยราสมมูลกัน ของเหลือทิ้งจากปฏิชีวนะเป็นร้อยละ 50 ไม่รวมเห็ดรา และผลผลิตทั่วโลกเป็นสองเท่าได้มาจากประเทศสหรัฐอเมริกา

2.4.3 กระบวนการผลิตโคโตซาน (เยาวยา ไหวพริบ, 2534)

กระบวนการผลิตโคโตซานต้องเริ่มต้นจากการสกัดโคตินก่อน กล่าวคือ การสกัดโคตินโดยทั่วไป ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) และขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ทั้งสองขั้นตอนนี้สามารถทำอย่างใดอย่างหนึ่งก่อนหรือหลังก็ได้ ดังภาพที่ 2.7 โดยในขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ จะเป็นการกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งนิยมใช้สารละลายไฮโดรคลอริกเจือจางอาจมีความเข้มข้นถึงร้อยละ 10 เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมคลอไรด์ และในขั้นตอนการกำจัดโปรตีนนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Whistler และ Bemiller, 1962)

กระบวนการผลิตโคโตซาน มีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียว คือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) ในโคติน ด้วยสารละลายด่างเข้มข้น สำหรับขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการผลิตโคโตซาน ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการแยกไคตินและไคโตซาน (บุศรากรณ์ มหาโยธี, 2537)

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของโคโตซาน (ทิพย์วิมล เกิดอ้อม, 2547)

1. ชนิดของสารละลายต่าง

โดยทั่วไปสารละลายต่างที่นิยมใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลในโคติน คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าในการกำจัดหมู่อะซิทิลด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้สารละลายโคโตซานมีความหนืดสูงกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2. ความเข้มข้นของสารละลายต่าง

นิยมใช้ต่างในรูปของสารละลายกำจัดหมู่อะซิทิล โดยทั่วไปมีความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้ต่างในรูปอื่น เช่น Alkaline fusion โดยหลอมโคติน 30 กรัม กับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 150 มิลลิกรัม ใน Nickel crucible ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้ได้มีการเตรียมโคโตซานในหลอดทดลอง โดยผสมโคติน 10-50 มิลลิกรัม กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 400 มิลลิกรัม และ Benzenethiol 100 มิลลิกรัม ละลายในน้ำ 1 มิลลิกรัม แล้วใช้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้โคโตซานที่ผลิตได้สูญเสียสภาพธรรมชาติ เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลเป็นสภาวะที่รุนแรง ทั้งอุณหภูมิที่สูงและเวลาค่อนข้างนาน แต่การใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นต่ำเกินไป มีผลต่อสมบัติการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดอ่อน โดยจะทำให้ละลายได้ยากขึ้นหรือไม่สามารถละลาย

3. อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิทิล

อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิทิล โดยมากมักจะทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ได้แก่ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 80-100 องศาเซลเซียส และที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เช่น ช่วงอุณหภูมิ 145-150 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราเร็วในการกำจัดหมู่อะซิทิลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เกือบ 2 เท่า โคโตซานที่ได้หลังจากการกำจัดหมู่อะซิทิลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส มีมวลโมเลกุลน้อยกว่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิต่ำในการกำจัดหมู่อะซิทิลที่สูงเกินไป จะทำให้โคโตซานที่ผลิตได้สูญเสียสภาพธรรมชาติ และทำให้โมเลกุลของโคโตซานเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้ (Degradation) ทำให้มวลโมเลกุลลดลง ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างสูงเกินไป อุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลควรจะลดลง เพื่อไม่ให้สภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลรุนแรงเกินไป

4. เวลาในการกำจัดหมู่อะซิทิล

ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิล ในการเตรียมโคโคซานโดยใช้เวลาต่างๆ ดังนี้ คือ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลมากขึ้น โคโคซานจะมีปริมาณหมู่อะซิทิลและขนาดของมวลโมเลกุลลดลง แต่มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) สูงขึ้น และพบว่าการใช้เวลาในการกำจัดหมู่อะซิทิลมากกว่า 2 ชั่วโมง ไม่ได้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of deacetylation) มากนัก เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลเป็นปัจจัยที่ใช้ในการแบ่งเกรด หรือคุณภาพต่างๆ อย่างไรก็ตาม เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการกำจัดหมู่อะซิทิล เช่น ความเข้มข้นของสารละลายต่าง และอุณหภูมิ เป็นต้น

5. ปฏิริยาออกซิเดชัน

ปฏิริยาออกซิเดชันอันเนื่องมาจากออกซิเจนในอากาศ มีผลต่อขนาดของโมเลกุลของโคโคซาน โดยถ้ามีปฏิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น หรือมีก๊าซออกซิเจนปรากฏในขั้นตอนระหว่างการกำจัดหมู่อะซิทิลจะทำให้โคโคซานเกิดปฏิริยาการสลายตัวได้ ทำให้โคโคซานที่ผลิตได้มีมวลโมเลกุลลดลง และพบว่าผลของปฏิริยาออกซิเดชันในขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซิทิลโดยเติมตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เช่น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ พบว่าทำให้โคโคซานที่ผลิตได้มีความหนืดลดลง ดังนั้นในขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซิทิลจึงจำเป็นต้องทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจน โคโคซานที่ผลิตภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนมีขนาดโมเลกุลและความหนืดสูงกว่าโคโคซานที่ผลิตภายใต้บรรยากาศธรรมดา นอกจากนี้อาจมีการเติมสารดักจับออกซิเจน เช่น Thiophenol ซึ่งสามารถดักจับออกซิเจนแล้วยังมีผลเป็นตัวเร่งปฏิริยาอีกด้วย

6. คุณภาพโคโคติน

คุณภาพโคโคตินมีผลต่อคุณภาพโคโคซานที่เตรียมได้ เนื่องจากโคโคตินเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมโคโคซาน สมบัติของโคโคตินมีผลต่อการกำจัดหมู่อะซิทิลที่สำคัญ ได้แก่ ขนาดของโคโคตินและความหนาแน่นของโคโคติน โดยมีผลต่ออัตราการแทรกซึม (Penetrate) ของด่างในขั้นตอนการกำจัดหมู่อะซิทิลเป็นอย่างยิ่ง โดยทั่วไปสมบัติและคุณภาพของโคโคตินจะขึ้นกับปัจจัยสำคัญ 2 อย่าง คือ แหล่งของโคโคตินหรือวัตถุดิบที่นำมาเตรียมโคโคติน และกรรมวิธีที่ใช้ในการเตรียมโคโคติน

2.4.5 สมบัติของโคโตซาน

สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคโตซาน ดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคโตซาน (สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง, 2548)

ลักษณะเฉพาะ โคโตซาน	โคโตซาน
น้ำหนักมวลโมเลกุล (ดาลตัน) ^a	$(1-5) \times 10^5$ (ผลิตภัณฑ์ทางการค้า)
ระดับสายโซ่ (Degree of polymerization) เฉลี่ยจากจำนวนหน่วยใน 1 โมเลกุล	600-1800
พีค X-ray diffraction	$8^{\circ}58' - 10^{\circ}26'$ $19^{\circ}58' - 20^{\circ}00'$
องค์ประกอบอุดมคติ (องค์ประกอบเอมพีริคัล)	$C_6H_{11}O_4N$
ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ) (ผลิตภัณฑ์ทางการค้า)	7-9.5
ร้อยละความชื้น (ผลิตภัณฑ์ที่แห้งในอากาศ)	2-10
ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (ร้อยละ)	60-80
ความหนืด (เซนติพอยส์)	250-2500 (ร้อยละ 1 ในกรดแอสซิติค) ไม่คงตัวและมีลักษณะฉีกเล็กๆ
ร้อยละเถ้า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	<1.0
การเปลี่ยนสถานะของโลหะ (Transition metals) ^b , ไมโครกรัมต่อกรัม	<0.5 ^c

a. น้ำหนักโมเลกุลและระดับสายโซ่ (DP) จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ผลิตภัณฑ์ทางการค้าจะมีน้ำหนักโมเลกุลและระดับสายโซ่ต่ำเนื่องจากการย่อยสลายที่เกิดระหว่างขั้นตอนการสกัด

b. การเอาปริมาณเหล็ก (Fe) ออกแต่ไม่เกิดความเสียหายขึ้น

c. โคโตซานที่ได้จากเปลือกปูประกอบด้วย (กรัมต่อกรัม): V=0.12; Cr=0.04; Mn=0.09; Ni=1.3; Cu=1.03; Ag=0.02; Cd=0.22; Hg=0.025 และ Pb=0.15

2.4.6 การละลาย (Solubility) (Muzzarelli, 1977)

โคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2-100 โดยปริมาตร ได้แก่ สารละลายกรดอะซิติก สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิก (Knorr, 1984) และในภาวะที่เป็นกรดนี้มีหมู่เอมีนอิสระ ($-NH_2$) จะถูกโปรโตเนตไปอยู่ในรูปของหมู่ Cationic amino ($-NH^3^+$) (Muzzarelli, 1977) นอกจากนี้โคโตซานยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารละลายกรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความสามารถในการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 ความสามารถในการละลายของโคโตซานในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆ กัน (Muzzarelli, 1977)

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (%)				
	1	5	10	50	>50
กรดแอสติติก (Acetic acid)	+	+	+	+	
กรดแอดิพิก (Adipic)	+				
กรดซิตริก (Citric)	-				
กรดฟอร์มิก (Formic)	+	+	+	+	+
กรดแลกติก (Lactic)	+	+	+		
กรดมาลิก (Malic)	+	+	+		
กรดทาร์ทาลิก (Tartaric)	-		+		
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric)	+	-	-		
กรดไนตริก (Nitric)	+	-	-		
กรดฟอสฟอริก ($H_3PO_4^*$)	-	-	-		
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric)	-	-	-		

หมายเหตุ + แสดงว่าโคโตซานสามารถละลายได้

- แสดงว่าโคโตซานไม่สามารถละลายได้

* แสดงว่าโคโตซานไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริกแต่สามารถละลายได้ในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นกรดน้อยกว่าร้อยละ 0.5

2.4.7 การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน

ในการใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน อาจจะกล่าวได้ว่าสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยอาศัยคุณลักษณะพิเศษของมัน แต่ถ้าเทียบกับเซลลูโลสแล้วนับว่าน้อยมาก เนื่องจากยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาวิธีการทางอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตขึ้นมาในเชิงการค้าได้ แต่เนื่องจากไคตินและอนุพันธ์ของมันมีประโยชน์สูง จึงมีการใช้พอลิเมอร์ชนิดนี้ใน 200 กว่าสายงานในสาขาต่างๆ ดังตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน (Kupongsak, 1995 และ Goosen, 1997)

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
การบำบัดน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> • การกำจัดโลหะหนัก • ตัวสร้างตะกอน/ตกตะกอน: โปรตีน สี และกรดอะมิโน • ใช้เป็นตัวกรอง (Filtration)
อุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> • เคลือบหน้ากระดาษเพิ่มความแข็งแรง และทำให้เยื่อกระดาษรวมตัว และเกิดฟิล์มที่ต้านน้ำ • เคลือบเส้นใยผ้าเพิ่มการต้านทานน้ำ
ด้านการแพทย์และเภสัช	<ul style="list-style-type: none"> • ผ้าพันแผล (Bandages) • ป้องกันเส้นเลือดอุดตัน ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอลในเลือด • ผลิตแผ่นเยื่อ (Membranes) • ใช้ต้านทันตกรรม/ยับยั้งการเกิดหินปูน • รักษาผิวหนังไหม้/ทำผิวหนังเทียม (Artificial skin) • ตกตะกอนยา และใช้เป็น Drug carrier
เครื่องสำอาง	<ul style="list-style-type: none"> • แป้งแต่งหน้า (Make-up powder) • ผลิตภัณฑ์เคลือบเงาเล็บ (Nail polish) • เพิ่มความชุ่มชื้น (Moisturizer) เป็นส่วนผสมโลชั่นอาบน้ำ (Bath lotion) • ยาสีฟัน

ตารางที่ 2.18 การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน (Kupongsak, 1995 และ Goosen, 1997) (ต่อ)

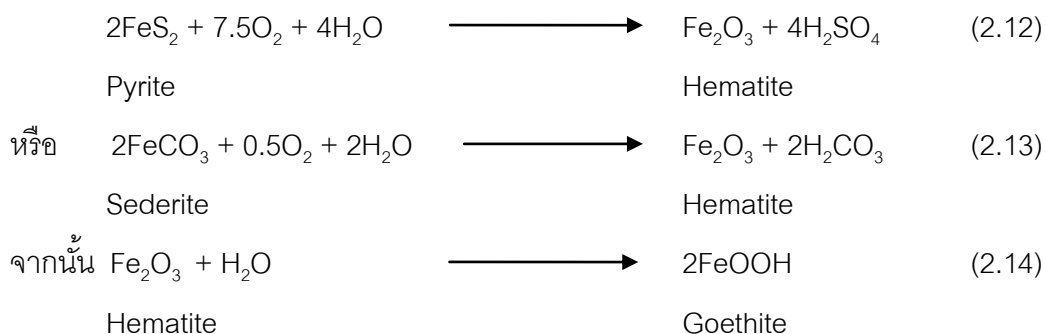
การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
การเกษตร	<ul style="list-style-type: none"> เคลือบเมล็ดพันธุ์พืช Hydroponic/Fertilizer Controlled agrochemical release
เมมเบรน	<ul style="list-style-type: none"> Reverse osmosis Permeability control Solvent separation
อาหาร	<ul style="list-style-type: none"> Removal of dyes, solid, acids เป็นสารกันเสีย (Preservatives) เพิ่มความคงทนของสี (Color stabilization) ส่วนผสมในอาหารสัตว์ (Animal feed additive)

2.5 เหล็ก (Iron)

2.5.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม

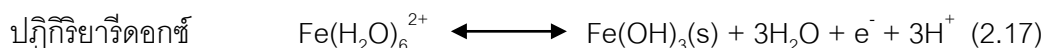
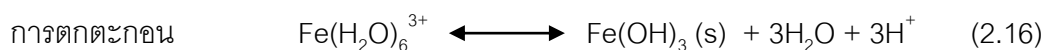
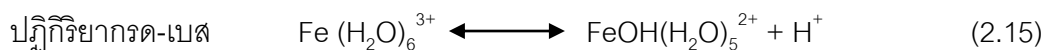
เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่บนผิวโลกมาก พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งบนดินและในน้ำ อยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กและออกซิเจน หรือเรียกโดยรวมว่า เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) นอกจากนี้ยังมีไอรอนซัลไฟด์ หรือไพไรต์ (FeS_2) ซึ่งเป็นสินแร่ชนิดหนึ่งที่ไม่เสถียรเมื่ออากาศชื้น และถูกออกซิไดส์ได้ง่าย (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547)

เหล็กออกไซด์ มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนเกาะอยู่กับเหล็กว่า มากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีสีเขียว เทา หรือน้ำเงิน และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe^{3+}) มีสีเหลืองแดงหรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ที่เรียกว่า ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) และเกอร์ไทต์ (Goethite, FeOOH) ซึ่งมีสีเหลืองส้ม โดยเกอร์ไทต์เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (Pyrite) และซิเดอไรต์ (Siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชัน Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ดังสมการที่ 2.12 2.13 และ 2.14



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในธรรมชาติ โดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดิน และส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

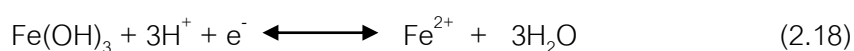
ส่วนเหล็กที่พบในแหล่งน้ำตามธรรมชาตินั้นมีได้หลายรูปแบบ ได้แก่ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ในน้ำได้ และปรากฏอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (Hydrate ion) หรือ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_x^{n+}$ โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นเหล็กที่อยู่ในรูปใด ดังสมการที่ 2.15 2.16 และ 2.17



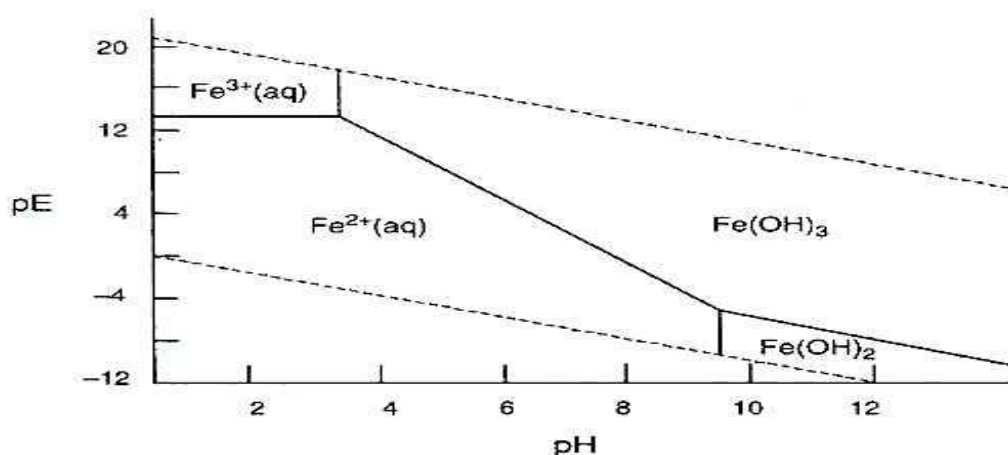
รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือกับสารอนินทรีย์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (Organometallic compound) ได้อีกด้วย

2.5.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก (วราวุธ วัดขนาด, 2552)

ปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำเสีย คือปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ เปลี่ยนเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไอออนที่ละลายน้ำได้เหล็กจึงถูกปลดปล่อยและเกิดการปนเปื้อน ดังสมการที่ 2.18



โดยในการอธิบายถึงระบบที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน การสร้างไดอะแกรมแบบสองตัวแปร (Two-variable diagram) เพื่อความแม่นยำในการใช้ศึกษา พิจารณาจาก pE/pH ไดอะแกรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี (Electron activity: a_e) และค่าไฮโดรเจนแอกติวิตี (Hydrogen activity) ที่สามารถบอกถึงสภาวะออกซิไดซ์และสภาวะรีดิวซ์ (Oxidizing and Reducing) ของระบบได้ แต่เนื่องจากระดับของอิเล็กตรอนแอกติวิตีของน้ำแปรผันได้ในช่วงที่กว้างมาก จึงนิยมให้ pE เป็นตัวแทนในการแสดงค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตีสูง ระบบจึงอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ในขณะที่เมื่อค่า pE เป็นบวก นั่นคือในสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตีต่ำ ระบบจึงอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ โดย pE ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง และรูปแบบหลัก (Dominant species) ของไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก (Valoon และ Duffy, 2000)

นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ยังแตกต่างกันแม้ที่ระดับพีเอชเท่ากัน เกิดจากค่าคงที่ของสารละลาย (K_{sp}) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการละลายที่ต่างกัน โดยสารที่มีค่าคงที่ของการละลายมาก หมายถึง สามารถละลายได้มากและการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ ดังตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก (เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547)

ปฏิกิริยา	K_{sp} ที่ 25 องศาเซลเซียส
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s})^* \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	8.00×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{OH}^-$	4.00×10^{-10}
$\text{FeCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	2.11×10^{-11}
$\text{FeCO}_3(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	5.05×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3^-$	8.30×10^{-6}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	4.00×10^{-38}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_2^+ + \text{OH}^-$	5.13×10^{-17}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.57×10^{-26}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_4^-$	1.00×10^{-5}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3(\text{d})^{**}$	2.90×10^{-7}

* $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$ หมายถึง เฟอริต์ไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็ง

** $\text{Fe(OH)}_3(\text{d})$ หมายถึง เฟอริต์ไฮดรอกไซด์ที่ไม่แตกตัวในสารละลาย

2.5.3 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) (วารวุธ วัตขนาด, 2552)

เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (Hydrous metal oxide) เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมตัวอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งครอบคลุมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกไซด์ (-OH) ออกซิไฮดรอกไซด์ (-OOH) และออกไซด์ (-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรทได้ง่ายสามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดิน ดินเหนียว และตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น มีรูปแบบทางเคมี เช่น FeOH_3 (Ferric hydroxide), FeO (Ferrous oxide), Fe_2O_3 (Ferric oxide หรือเรียกว่า Hematite), Fe_3O_4 ซึ่งคือ $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Ferrous ferric oxide หรือเรียกว่า Magnetite) และ FeOOH เรียกว่า Goethite โดย Poorly crystalline หรือ Amorphous hydrous ferric oxide ซึ่งอยู่ในรูปของ α , β หรือ γ จะเรียกว่า Ferrihydrite เป็นต้น

เหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับสภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไทต์ (FeOOH) และ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เกิดจากเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซิไฮดรอกไซด์และออกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (Sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งในสภาวะที่มีความเป็นกรด-ด่าง หรือพีเอชสูง แต่อุณหภูมิต่ำจะชักนำไปสู่การเกิดเกอร์ไทต์ ส่วนสภาวะที่พีเอชต่ำ ($\text{pH} < 4$) และอุณหภูมิสูงๆ จะชักนำไปให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ อย่างไรก็ตามเมื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำ สารละลายเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะเกิดเป็น Amorphous ferrihydrite (FeOOH) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 3-5 นาโนเมตร หลังจากล้างและทำให้แห้งแล้วจะมีพื้นผิว 225-340 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง ประมาณ 4 นาโนเมตร แต่ถ้าให้ความร้อนที่ 400-700 องศาเซลเซียส ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า 20 ตารางเมตรต่อกรัม และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงโดยเฉลี่ยเป็น 100 นาโนเมตร ส่วนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe_2O_3 หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน $\text{Fe}(\text{OH})_2$

2.6 การดูดติดผิวด้วยไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์

2.6.1 ลักษณะของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (วราวุธ วัดขนาด, 2552)

ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (Hydrous metal oxide) คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยไอออนโลหะประจุบวกตั้งแต่ 1 ขึ้นไป รวมตัวกับอนุภาคของน้ำ คือ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ดังนั้นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์จึงรวมถึงสารประกอบโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันออกไซด์ (-O) ไฮดรอกไซด์ (-OH) และออกซีไฮดรอกไซด์ (-OOH) ไฮดรอกไซด์ของเหล็กกระจายอยู่ทั่วไปในดินเหนียวหรือตะกอนโดยเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุนั้นๆ และอยู่ในรูปของออกไซด์ รูปแบบทางเคมีของเหล็กออกไซด์และไฮดรอกไซด์มักจะอยู่ในรูปของ Fe^{3+} เช่น $Fe(OH)_3$, Fe_3O_4 และ $\alpha-FeOOH$ เป็นต้น ไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์แสดงลักษณะที่เป็นทั้งกรดและเบสในน้ำ หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวหน้าของออกไซด์สามารถจับหรือปล่อยโปรตอน ทำให้ออกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยานั้นย้ายโปรตอนและมีประจุเกิดขึ้นบนพื้นผิวของมัน คุณสมบัติที่สำคัญของไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ คือ ความเป็นกรดของพื้นผิว เนื่องจากการที่ผิวมีหมู่ฟังก์ชันนั้นมีความสัมพันธ์กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณการเชื่อมต่อของผิว เช่น ปฏิกิริยาการดูดติดผิวและการจับตัวเป็นก้อนไฮดรอกซิลไอออนที่ผิวจะเกิดพันธะกับไอออนของโลหะได้เช่นเดียวกับลิแกนด์อื่นในสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.19 และสมการที่ 2.20



เมื่อ	SOH	=	พื้นผิวไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์
	M^{2+}	=	ไอออนประจุบวกสอง
	H^+	=	ไฮโดรเจนไอออน

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปนั้น จะขอกล่าวถึงแบบจำลองที่สำคัญมากซึ่งใช้ในการอธิบายการดูดติดผิวโลหะหนักบนตัวกลางดูดติดผิวก่อน ได้แก่ แบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิว (Surface complexation model) ซึ่ง Davis และ Kent (1990) ได้สรุปแนวคิดพื้นฐานสำหรับแบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวทั้งหมด ดังนี้

1. พื้นผิวจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันจำเพาะ (Specific functional groups) ซึ่งทำปฏิกิริยากับตัวถูกละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวในลักษณะที่คล้ายคลึงกับการเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนในสารละลายแบบเดียวกัน

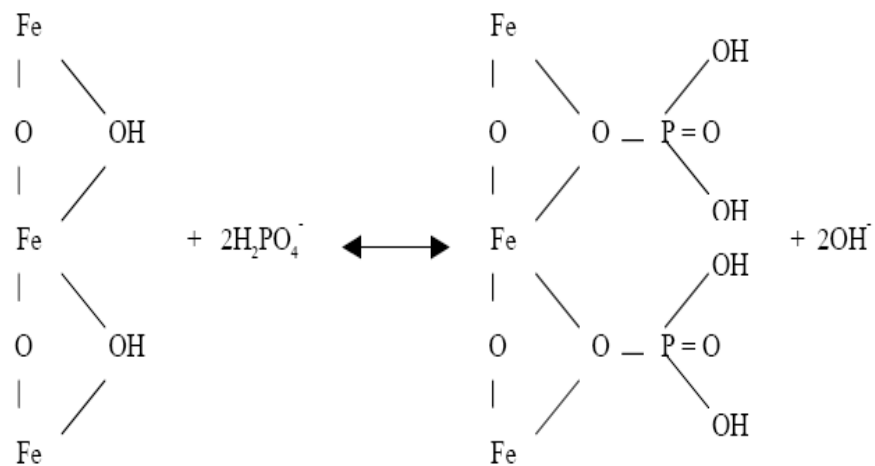
2. จุดสมดุลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่พื้นผิวและปฏิกิริยาไอออนิกสามารถที่จะอธิบายได้โดยสมการกฏทรงมวล ด้วยการปรับแก้เทอร์มอดายนัมต่าง ๆ ให้ถูกต้อง ในการประยุกต์ใช้สำหรับพลังงานไฟฟ้าสถิตที่แปรค่าได้โดยการใช้ทฤษฎี Electrical double layer

3. ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิว (Surface charge) และศักย์ไฟฟ้าที่พื้นผิว (Surface electrical potential) จะเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับข้างในตัวเอง (Stumm และ Morgan, 1995)

4. ค่าคงที่ต่างๆ ในการเกิดพันธะที่ชัดเจนที่ต้องการจะเป็นค่าพารามิเตอร์อย่างง่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ต่างๆ ทางเทอร์โมไดนามิคโดยค่าสัมประสิทธิ์การเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมของพื้นผิวชนิดต่างๆ

2.6.2 การดูดติดผิวไอออนลบด้วยไฮดรอกไซด์

ความสามารถในการดูดติดผิวและการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ เป็นกลไกที่สลับซับซ้อนและยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างแน่ชัด แต่ถ้าพิจารณาการดูดติดผิวเป็นหลัก ไอออนประจุลบที่ถูกดูดติดผิวจะเป็นการดูดติดผิวที่จำเพาะเจาะจง (Specific Adsorption) หรือการดูดติดผิวเชิงเคมี (Chemical Adsorption) ซึ่งการดูดติดผิวนี้อาจเกิดจากแรงดูดยึดแบบไฟฟ้าสถิต หรือแบบคู่อมโนโดยปริมาณที่ดูดติดผิวไม่จำเป็นต้องมีสมมูลเท่ากับประจุบวกบนผิวสารดูดติดผิวนอกจากนั้นดินที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก จะเกิดการดูดติดผิวไอออนประจุลบได้ดี เช่น CrO_4^{2-} , AsO_4^{3-} และ SeO_4^{2-} เป็นต้น ฟอสเฟตเกิดการดูดติดผิวแบบจำเพาะเจาะจงและไอออนประจุลบของฟอสเฟตจะเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนลิแกนด์กับหมู่ฟังก์ชันนัล (-OH) หรือ H_2O บนผิวแร่เหล็กออกไซด์การแลกเปลี่ยนลิแกนด์จะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่าง H_2PO_4^- กับหมู่ $-\text{OH}$ บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์
(พงศภัทร ศรีขจร, 2549)

จากภาพที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า PO_4^{3-} จะเกิดการดูดแบบจำเพาะเจาะจง และออกซิเจนไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนลิแกนด์ระหว่างแอนไอออนในสารละลาย กับหมู่ฟังก์ชันนัล ($-\text{OH}$) หรือ H_2O บนผิวของแร่เหล็กออกไซด์ ซึ่งการแลกเปลี่ยนลิแกนด์จะเป็นไปได้ดีขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง

2.6.3 การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์ออกไซด์

การดูดติดผิวไอออนบวกด้วยไฮดรอกไซด์ออกไซด์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนภายในเวลาเล็กน้อย การดูดติดผิวเป็นปรากฏการณ์ของพื้นผิวที่พร้อมจะรับไอออนจากสารละลาย ซึ่งการดูดติดผิวตัวถูกละลายบนไฮดรอกไซด์ออกไซด์จะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ออกไซด์ โดยรวมถึงส่วนประกอบทางเคมี การกระจายขนาดอนุภาค รูปร่างลักษณะของสาร พื้นที่ผิวสัมผัส ความพรุน ปริมาณและธรรมชาติของบริเวณพื้นผิวที่ดูดติดผิวได้ นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีผลต่อการดูดติดผิวไอออนต่างๆ บนไฮดรอกไซด์ออกไซด์ โดยการดูดติดผิวไอออนบวกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น แต่การดูดติดผิวไอออนลบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าพีเอชต่ำและจะลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น

สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดติดผิวไอออนบนไฮดรอกไซด์ โลหะออกไซด์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิว และไอออนชนิดอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ในสารละลายซึ่งรบกวนการดูดติดผิวบนไฮดรอกไซด์ โลหะออกไซด์ กลไกการดูดติดผิวไอออนบนไฮดรอกไซด์ โลหะออกไซด์ คือ เมื่อโลหะออกไซด์สัมผัสกับน้ำจะเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่พื้นผิวของโลหะในชั้นแรกไอออนของโลหะที่ชั้นผิวหน้าของออกไซด์ยังค้างอยู่ เพราะโมเลกุลของน้ำยังไม่เข้าไปจับ เมื่อน้ำเข้าไปจับตรงที่ว่างอยู่จะเกิดพันธะได้โดยการดูดติดผิวทางเคมี ทำให้พื้นผิวหน้ากลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลด้วยโปรตอนที่ได้จากโมเลกุลของน้ำที่ถูกดูดติดผิวไว้แล้ว โปรตอนนี้จะแยกตัวออกมาจากโมเลกุลของน้ำมายังออกซิเจนไอออนที่อยู่ในชั้นผิว ซึ่งอาจมีการดูดติดผิวน้ำเพิ่มเข้าไปได้อีกบนพื้นผิวที่กลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Dzombak และ Morel, 1990)

ส่วนใหญ่แล้วแร่ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในรูปตะกอนและมีพื้นที่ผิวใหญ่มากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกดินเหนียว ผลึกเหล็กไฮดรอกไซด์ที่บริสุทธิ์ กรดซิลิซิกที่มีรูปร่างไม่แน่นอน หรืออาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสารต่างๆ เหล่านี้สามารถดูดติดไอออนบวกและปล่อยไอออนบวกตัวอื่นออกมาในปริมาณเท่ากัน เรียกได้ว่า เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation exchange) ถ้าจะกล่าวถึงกลไกซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนบวกนั้น จะต้องศึกษาถึงความสามารถในการดูดติดผิวของไอออนประจุลบ (Charged anion sites) ที่สามารถดูดติดไอออนบวกได้ อย่างเช่น SiOH^- , AlOH^{2-} และ AlOH^- groups ในแร่ดินเหนียว FeOH^- groups ในเหล็กไฮดรอกไซด์ คาร์บอกซิลและฟีนอลิก OH - groups ในสารประกอบอินทรีย์ เป็นต้น ในโครงสร้างที่เป็นผลึกนั้น จะต้องเกิดสมดุลของประจุลบ ถือว่าเป็นกระบวนการเลือก (Selective process) คือ การเลือกที่จะดูดติดไอออนบวกตัวใดก็ได้และปล่อยไอออนบวกตัวอื่นออกมา จากนั้นจะเก็บสะสมไอออนโลหะไว้ที่ผิวระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-liquid interface) ทำให้เกิดแรงระหว่างโมเลกุล เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การดูดติดผิว (Adsorption) ในกรณีที่ไม่ว่าจะแรงและไม่เลือกที่จะดูดติดไอออนใด การดูดติดผิวอาจเกิดเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้านั้นอาจเกิดมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ และอาจกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์ดูดติดผิวเกิดเนื่องจากความเข้มข้นของตัวละลาย (Solutes) บนผิวของของแข็ง

เนื่องจากในกระบวนการดูดติดผิวนั้นได้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกด้วย ซึ่งผลรวมของไอออนบวกที่มีการแลกเปลี่ยน (รวมทั้งไฮโดรเจนไอออน) จะเรียกว่า ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange capacity) มีหน่วยเป็นมิลลิอิควิวาเลนต์ (meq) ต่อ 100 กรัม ซึ่งได้กล่าวไว้ในตอนต้นแล้วว่า ไฮดรอกไซด์ของโลหะต่างๆ ที่เคลือบบนผิวของแข็งนั้น จะต้องทราบปริมาณ

ไอออนที่จะแลกเปลี่ยนได้บนพื้นผิวนั้น ทำให้ทราบถึงปริมาณไอออนที่จะถูกดูดติดและสะสมอยู่บนพื้นผิว

ตัวอย่างแสดงกลไกการดูดติดโลหะหนักบนไฮดรอกไซด์ โดย Hildebrand และ Blum (1974) อ้างถึงใน Forstner และ Wittmann (1981) (a) จากตัวอย่างของตะกั่ว (Pb) ประจุ +2 ทำปฏิกิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์โดยตะกั่วจะถูกดูดติดใน Stern layer ของโครงสร้างของไฮดรอกไซด์และแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนไอออนออกมาจนกระทั่งตะกั่วแสดงความชอบที่จะยึดเหนี่ยวกับกลุ่มไฮดรอกซิลของผลึก $FeO(OH)$ ต่อจากนั้น Gadde และ Laitinen (1973) อ้างถึงใน Forstner และ Wittmann (1981) (b) ได้ศึกษาเพิ่มเติมว่า การดูดติดของตะกั่วประจุ +2 ที่พีเอชประมาณ 5-7 จะลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในช่วงพีเอชนี้ $FeOOH$ จะมีประจุบวก และอาจกล่าวได้ว่า การดูดติดผิวของโลหะหนักต้องขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะที่ถูกดูดติด ความเข้มข้นของโลหะอื่นที่ปนอยู่ในสารละลาย พีเอชและรูปแบบของไอออนเชิงซ้อน

2.7 เทคโนโลยีการกำจัดอาร์เซนิกในน้ำ

ชุมชนขนาดเล็กจำนวนมากในหลายประเทศต้องเผชิญกับปัญหาการปนเปื้อนของอาร์เซนิกในน้ำใต้ดิน ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม ได้แก่ ประเทศอาร์เจนตินา เขตคอร์โดมา ประเทศไต้หวัน (ชายฝั่งด้านตะวันตกเฉียงใต้) สาธารณรัฐประชาชนจีน บังคลาเทศ และอินเดีย ชุมชนเหล่านี้ได้มีการแก้ปัญหาใน 2 ลักษณะ คือ การหาแหล่งน้ำอุปโภคบริโภคใหม่ และการบำบัดอาร์เซนิกให้เหลือต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่ม ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมีการเลือกใช้วิธีหลังมากกว่าวิธีแรก

การกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำ ได้มีการศึกษาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และภาคสนาม ดังตารางที่ 2.20 โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีทางเคมีและฟิสิกส์ กล่าวคือ

2.7.1 การรวมตะกอนด้วยเกลือของเหล็กและสารส้ม

องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency, U.S. EPA) (2003) อ้างถึงใน นันทนา ชูฉัตร (2543) รายงานสรุปว่า กระบวนการบำบัดที่สามารถกำจัดอาร์เซนิกให้ได้ตามมาตรฐานน้ำดื่มอย่างมีประสิทธิภาพ

คือ กระบวนการตกตะกอน (Coagulation) ด้วยเกลือของเหล็กและอลูมิเนียม หรือการใช้ปูนขาว นอกจากนั้น U.S. EPA ยังสรุปภาวะที่เหมาะสมในการใช้สารโคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดว่า การใช้สารส้มที่ความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 7 หรือใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 8.5 หรือใช้ปูนขาวที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 10.5 จะสามารถกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำได้มากกว่าร้อยละ 90 ดังตารางภาคผนวก ข-1 ได้แสดงผลการกำจัดอาร์เซนิกโดยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือของโลหะต่างๆ และประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการโคแอกกูแลชั่นด้วยเกลือของเหล็ก และสารส้มเป็นวิธีที่เหมาะสมทั้งด้านเทคโนโลยี และราคาสำหรับระบบขนาดกลางและขนาดใหญ่ นอกจากนั้นยังสามารถประยุกต์ใช้สำหรับระบบบำบัดขนาดเล็กในชนบทได้ อย่างไรก็ตามแม้วิธีการการตกตะกอนจะเป็นวิธีการกำจัดอาร์เซนิกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด แต่ก็มีปัญหาในการกำจัดสลัดจ์ (Sludge) และไม่สามารถใช้ได้กับระบบที่มีอัตราการไหลต่ำหรือที่มีการเดินระบบเป็นช่วงได้

2.7.2 การออกซิไดซ์และการกรอง

จากรายงานของ AWWA (1994) อ้างถึงใน นันทนา ชูฉัตร (2543) ที่ทำการศึกษาหาวิธีบำบัดที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดอาร์เซนิกในชุมชนขนาดเล็ก และได้ใช้ทรายเคลือบแมงกานีส (Manganese greensand) กรองน้ำตัวอย่างเพื่อกำจัดอาร์เซนิกและเหล็ก ที่รัฐออนตาริโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลจากการทดลอง กำจัดอาร์เซนิกโดยวิธีการผ่านทรายเคลือบแมงกานีส พบว่าได้ผลดี จากการศึกษาที่ผ่านมา ดังตารางภาคผนวก ข-2 โดยจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการยืนยันว่าอาร์เซนิก ถูกกำจัดจากน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้โปรแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ออกซิไดซ์แล้วกรองด้วยทรายเคลือบแมงกานีส อาร์เซนิกจะถูกดูดติดผิวทางกายภาพและทางเคมี การเติมโปรแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตอย่างต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆ เพื่อคงประสิทธิภาพของทรายเคลือบแมงกานีส และช่วยออกซิไดซ์อาร์เซนิก +3 เป็น +5 ก่อนกรองระยะเวลาที่ใช้กรองจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ แต่ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกจะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ปริมาณโปรแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และความเป็นกรด-ด่างของน้ำไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด

2.7.3 การใช้แอกติเวเตดอลูมินา (Activated alumina)

การกำจัดอาร์เซนิกโดยการดูดซับด้วยอลูมินา พบว่าราคาเหมาะสมสำหรับระบบขนาดเล็กและประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียคือ การฟื้นฟูสภาพแต่ครั้งจะมีผลทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับลดลง เทคโนโลยีนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานและอาจถูกยกเลิกไปซึ่งจากผลการทดลองด้วยการใช้แอกติเวเตดอลูมินาบรรจุถึง 1 ลูกบาศก์ฟุต ทดลองกำจัดอาร์เซนิกในชุมชนของอเมริกา พบว่าประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (ร้อยละ 30-40) และการเดินระบบค่อนข้างยุ่งยากโดยต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำดิบให้เท่ากับ 5.5 จึงจะมีประสิทธิภาพสูงซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ค่าก่อสร้างระบบขนาด 1 ล้านแกลลอนต่อวัน เท่ากับ 558,000 เหรียญสหรัฐ (ENSIC, 1994)

2.7.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคตไอออนเอกเชน (Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชน (Anion exchanger) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า

เทคโนโลยีการกำจัดอาร์เซนิก โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่ามีราคาเหมาะสมสำหรับระบบขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพดีในตอนเริ่มต้น แต่เนื่องจากเรซินประจุบนี้จึงทำให้สามารถดูดซับสารไอออนประจุบอื่นๆ ในน้ำด้วย ทำให้อายุการใช้งานสั้นลงและประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกสั้นลงด้วย ดังนั้นการนำมาใช้งานจึงมีข้อจำกัดในการดูแล นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนแอนไอออน ไม่เหมาะสำหรับน้ำที่มีปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) มากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือซัลเฟตมากกว่า 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และต้องออกซิไดซ์อาร์เซนิกประจุ +3 เป็น +5 ก่อน แต่ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ ไม่ต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำดิบ และใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ในการชะล้างอาร์เซนิกออกจากคอลัมน์ได้

2.7.5 การใช้รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซิเตท และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูง และต้องมีการบำบัดชั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน วิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

ได้มีการทดลองกำจัดคาร์บอนิกในภาคสนามที่ประเทศเม็กซิโก โดยการรีเวิร์สออสโมซิส บำบัดน้ำก่อนนำไปใช้ พบว่าสามารถลดคาร์บอนิกเริ่มต้น 0.068 มิลลิลิตรต่อลิตรได้ ค่าใช้จ่ายในการรีเวิร์สออสโมซิสเท่ากับ 325 เหรียญสหรัฐ และต้องเสียค่าบริการรายเดือนเท่ากับ 8.6 เหรียญสหรัฐ (AWWA, 1985 อ้างถึงใน นันทนา ชูฉัตร, 2543)

ตารางที่ 2.20 เทคโนโลยีที่ใช้กำจัดอาร์เซนิกในน้ำ และค่าใช้จ่ายในการบำบัด (ENSIC, 1994)

วิธีการบำบัด	ประสิทธิภาพ การบำบัด	การกำจัด		ค่าใช้จ่ายในการบำบัด (บาท/1000แกลลอน)			หมายเหตุ
		As (III)	As(V)	0-3 ล้าน แกลลอน/วัน	1 ล้าน แกลลอน/วัน	50 ล้าน แกลลอน/วัน	
Alum Coagulation/Filtration (pH 6-7)	>90	F-G	G-E	44	11	5	
Iron Coagulation/Filtration (pH 6-8)	>90	F-G	G-E	44	11	5	
Activated alumina (pH 5-6)	>90	G-E	E	30.5	15.5	13	
Ion Exchange (anion)	>90	G-E	G-E	21	13	10.5	
Reverse Osmosis	>90	F-G	F-G	83	41	32	
Adsorption	>90	F-G	F-G	-	-	-	
Granular Activated Carbon (GAC)	>90	F-G	P-G	-	-	-	เหมาะสำหรับ บำบัดน้ำใต้ดิน
Power Activated Carbon (PAC)	>90	P-G	-	-	-	-	
Oxidation Follow by Filtration	>90	G-E	-	-	-	-	

หมายเหตุ: E=ดีมาก G=ดี F=พอใช้ P=เลว

2.8 การดูดติดผิว (Adsorption)

2.8.1 การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption)

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและทางด้านสิ่งแวดล้อม การใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการปิโตรเลียม อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการผลิตถ่านกัมมันต์ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องกรองน้ำดื่ม และใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปาเพื่อการบริโภคและอุปโภค เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การกำจัดพืชรพิษต่างๆ ทั้งที่อยู่ในรูปของก๊าซและของเหลว เช่น การดูดติดผิวก๊าซมลพิษต่างๆ ในอากาศ การลดปริมาณโลหะหนักเป็นพิษที่ละลายในน้ำ การนำบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

การดูดติดผิวเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของสารที่บริเวณพื้นผิวกับพื้นผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) การดูดติดผิวสามารถใช้ในการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ซึ่งสารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้มีหลายชนิด ซึ่งอาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (Reynolds, 1996)

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (Bone char) Activated silica เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนสารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก แต่มีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ได้ แต่เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ ซึ่งสารนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.8.2 กลไกการดูดติดผิว (กิตตินันท์ คงสีบชาติ, 2546)

มีลักษณะการดูดติดผิว แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดติดผิวที่ไม่เกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันและไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน แต่การดูดติดผิวเกิดขึ้นจากการสัมผัสกันเฉพาะตัว (Individuality of interacting species) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างเบาบาง คือ แรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals Forces) (ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร, 2543) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Intermolecular cohesion) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) นั่นเอง

การดึงดูดกันด้วยแรงที่อ่อน จึงทำให้การดูดติดผิวประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อยอยู่ในช่วง 0.5-5 กิโลแคลอรีต่อโมล และเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ทั้งหมด (Sawyer และคณะ, 1994) นั่นก็คือ เกิดการหลุดออก (Desorption) ของสารถูกดูดติดผิวจากสารดูดติดผิว นอกจากนี้การดูดติดผิวทางกายภาพนี้จะไม่มีความจำเพาะ (Specific site) กล่าวคือ โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะมีความอิสระที่จะถูกดูดติดผิวบนตำแหน่งใดๆ ก็ได้บนผิวสารดูดติดผิว

2. การดูดติดผิวทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดติดผิวที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปมาระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวกับพื้นผิวของสารดูดติดผิว ทำให้เกิดการสร้างพันธะเคมีขึ้นมา โดยโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะเลือกบริเวณที่เกิดการดูดติดผิวได้ และจะเกิดในลักษณะ Monolayer เท่านั้น ทำให้เกิดการคายความร้อนในปริมาณสูง คือ ในช่วง 5-100 กิโลแคลอรีต่อโมล หมายความว่า การหลุดออกของการดูดติดผิวประเภทนี้เกิดขึ้นได้น้อยมากๆ จึงถือว่าเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible interaction) ซึ่งโดยปกติเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบจะทำให้อัตราการดูดติดผิวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ไชยยันต์ ไชยยะ, 2542)

การดูดติดผิวทางเคมีเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงซึ่งแตกต่างจากการดูดติดผิวทางกายภาพโดยที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดติดผิวกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดติดผิวสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดติดผิวกับตัวดูดติดผิวที่พื้นผิวของตัวดูดติดผิว ทำให้ปริมาณของตัวดูดติดผิวลดลง เนื่องจากการดูดติดผิวเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิว จึงเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดติดผิวทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด และการดูดติดผิวแบบเคมีนี้ องค์ประกอบที่ถูกดูดติดผิวมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible)

ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมซึ่ง พบว่าที่อุณหภูมิปกติ องค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดติดผิวทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิดการดูดติดผิวทางเคมีได้ ดังตารางที่ 2.21

ตารางที่ 2.21 การเปรียบเทียบการดูดติดผิวทางกายภาพ และการดูดติดผิวทางเคมี (ริยา ชนะศักดิ์, 2542)

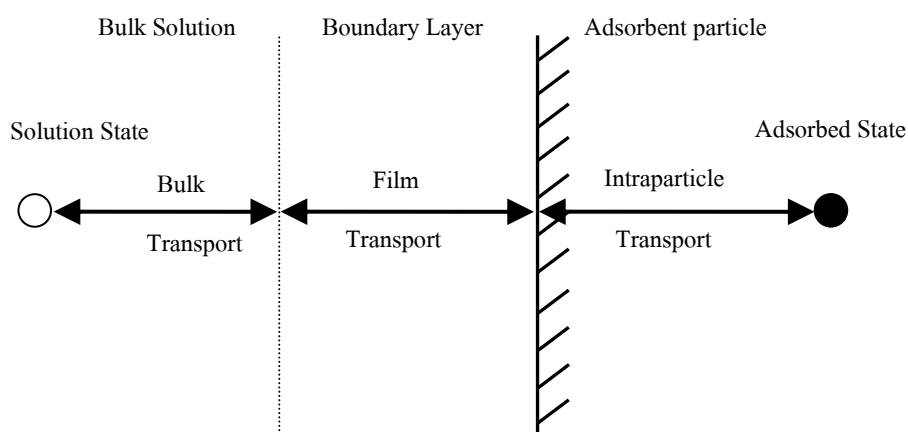
ตัวแปร	การดูดติดผิวทางกายภาพ	การดูดติดผิวทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดติดผิว	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดติดผิว	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้
การดูดติดผิวบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
รูปแบบชั้นของการดูดติดผิว	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.8.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญ เนื่องจากอัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล กลไกการดูดติดผิวมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มสารดูดติดผิว
2. การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติดผิว การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง
3. การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติดผิว (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวภายใน จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน

การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิว แต่ถ้าหากว่าระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดติดผิว ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิวดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิว (Eckenfelder, 1981)

2.8.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1. ความดันป้อน อัตราเร็วในการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป้อนของระบบต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าความดันป้อนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความดันป้อนในถังดูดติดผิว คือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีแล้วถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความดันป้อนสูงขึ้น

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะนั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง (PAC) มีอัตราเร็วในการดูดติดสูงกว่าคาร์บอนแบบเกล็ด (GAC)

3. ขนาดและลักษณะของสารดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายนั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

4. พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อกระบวนการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถจะเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

5. อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic)

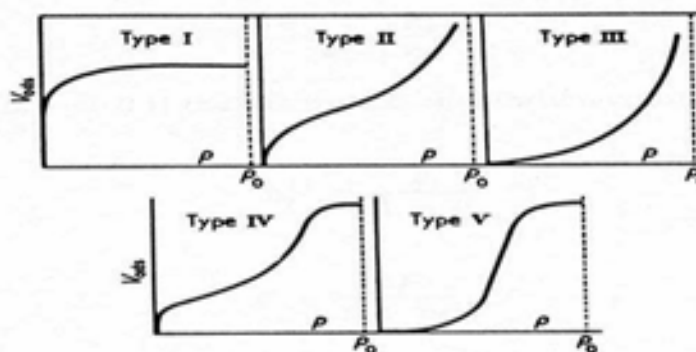
6. เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.8.5 สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption equilibrium)

การดูดติดผิวในสารละลายมีผลต่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรือตัวถูกดูดติดผิวบนผิวของสารดูดติดผิว ตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกสู่อากาศ เมื่อปริมาณของการดูดติดผิวและหลุดออกจากผิวมีจำนวนเท่ากัน อัตราการดูดติดผิวและการหลุดออกจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Equilibrium state) หรือเรียกว่า สมดุลของการดูดติดผิว (Adsorption equilibria) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวในสารละลาย สมดุลนี้เป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยของสารดูดติดผิวซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption isotherm)

2.8.6 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว แสดงถึงลักษณะของกระบวนการดูดติดผิว และปริมาณของสารถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวมี 5 แบบ ดังภาพที่ 2.11 ซึ่งไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นระบบที่การดูดติดผิวเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนแบบที่ 2 ถึง 5 เป็นการดูดติดผิวของโมเลกุลหลายชั้น เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง



ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly, 1987)

1. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ใช้อธิบายกระบวนการดูดติดผิวในระบบของเหลว มีสมการดังนี้

$$\frac{X}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.21)$$

เมื่อ X/m = ปริมาณของสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

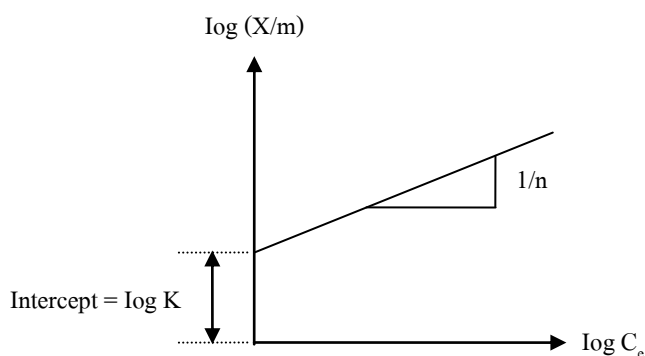
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.21 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\log (X/m) = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.22)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/m)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 2.12 ถ้าค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี แต่ถ้าค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี และหากเส้นกราฟมีความชันมาก แสดงว่าสารดูดติดผิวนั้นสามารถเกิดการดูดติดผิวได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ



ภาพที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิช (Sunstrom และ Klei, 1979)

2. ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานของไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ หรือเรียกว่า Localized monolayer model คือ โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิวแต่ละโมเลกุลเกิดการดูดติดผิวได้โมเลกุลเดียวโดยพื้นที่บริเวณดูดติดผิวมีค่าที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิวและพลังงานการดูดติดผิวแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 2.23

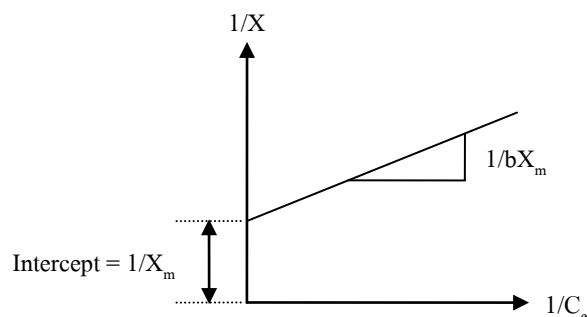
$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.23)$$

- เมื่อ $X = X/m$, ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดผิวเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 b = ค่าคงที่พลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.23 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{b X_m C_e} + \frac{1}{X_m} \quad (2.24)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรง สามารถหาค่าคงที่ X_m และ b ได้จากความชันและจุดตัดแกน ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ (Sunstrom และ Klei, 1979)

2.8.7 การทดลองด้วยคอลัมน์ดูดติดผิว

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวจะสามารถพิจารณาเลือกตัวดูดติดผิวที่เหมาะสมได้แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจไม่เพียงพอสำหรับใช้ในการออกแบบกระบวนการดูดติดผิว จึงต้องมีการทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดติดผิว (Column Test)

การทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดติดผิวโดยการใช้วิธีการคำนวณตามสมการจลศาสตร์ของ Thomas ซึ่งสมการจลศาสตร์นี้ ประยุกต์มาจากการสมการของ Bohart และ Adams โดยส่วนใหญ่แล้วข้อมูลที่ต้องการจากการทดลอง คือ เบรคทวร์จ์ เคฟ (Breakthrough curve) จากการทดสอบคอลัมน์ดูดติดผิว ซึ่งสมการของ Thomas สำหรับคอลัมน์การดูดติดผิว ดังสมการที่ 2.28

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{k_1(q_0 M - C_0 V)}} \quad (2.28)$$

- เมื่อ
- C = ความเข้มข้นของสารละลายขาออก
 - C₀ = ความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า
 - k₁ = อัตราค่าคงที่
 - q₀ = ความเข้มข้นสูงสุดที่สารละลายดูดติดผิวบนตัวดูดติดผิว (กรัมต่อกรัม)
 - M = น้ำหนักของตัวดูดติดผิว (กรัม)
 - V = ปริมาตรที่บำบัดได้ (ลิตร)
 - Q = อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)

ภายใต้สมมติฐานด้านซ้ายเท่ากับด้านขวา

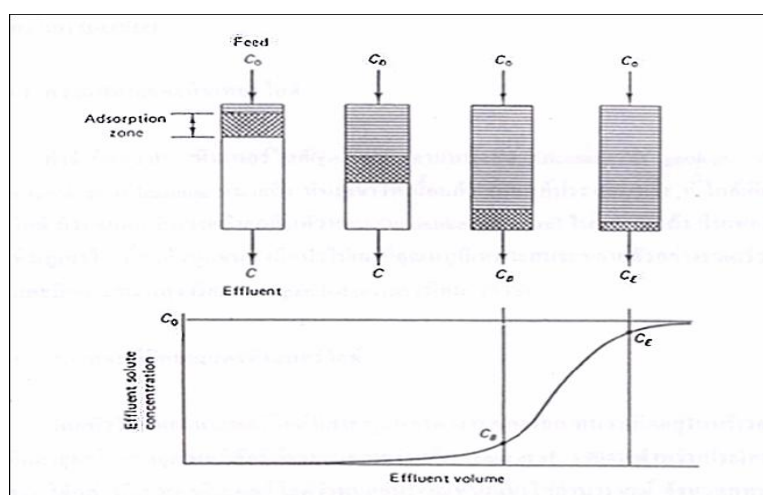
$$1 + e^{\frac{k_1 (q_0 M - C_0 V)}{Q}} = \frac{C_0}{C} \quad (2.29)$$

เทค ln ทั้งสองข้างของสมการที่ 2.29 ได้เป็นสมการที่ 2.30

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - \frac{k_1 C_0 V}{Q} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ 2.30 สามารถนำไปสร้างสมการเส้นตรงได้ $y = mx + b$ โดยในเทอมของ $y = \ln(C_0/C - 1)$, $x = V$, $m = k_1 C_0 / Q$ และ $b = k_1 q_0 M / Q$

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ของชั้นตัวดูดติดผิว ตัวดูดติดผิวชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของตัวดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาการใช้งาน ดังภาพที่ 2.14 ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นจึงถึงค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ที่จุดนี้ เรียกว่า จุดเบรคทราจ (Breakthrough point) โดยเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดเบรคทราจ เรียกว่า เวลาการใช้งาน (Service time) (เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2525) และเมื่อตัวดูดติดผิวไม่สามารถดูดติดผิวได้อีก เรียกว่า จุดที่ตัวดูดติดผิวหมดประสิทธิภาพ (Exhaust point) ซึ่งจุดนี้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (C_e) จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบ (C_0)



ภาพที่ 2.14 การเคลื่อนตัวของ Adsorption Zone สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย (Sundstrom และ Klei, 1979)

ในการทดลองถ้าวัดความเข้มข้นที่จุดต่างๆ ภายในคอลัมน์ จะได้กราฟความเข้มข้นของสารลดลงเรื่อยๆ จากความเข้มข้นเท่ากับน้ำเสียขาเข้า ออกจนเป็นความเข้มข้นเป็นศูนย์ โดยกราฟนี้จะค่อยๆ เคลื่อนที่เข้าไปเรื่อยๆ จากปลายด้านหนึ่งของคอลัมน์ (ขาเข้าของน้ำเสีย) ไปยังปลายขาออกของน้ำเสีย เพราะช่วงแรกๆ ตัวดูดติดผิวถูกใช้งานก่อน และเมื่อพื้นที่ผิวเต็มก็จะไม่ดูดติดผิวอีกต่อไป ดังนั้นจึงเกิดการลดลงของความเข้มข้น เรียกส่วนที่เกิดการดูดติดผิวนี้ว่า Mass Transfer Zone (MTZ) และเมื่อ MTZ เคลื่อนที่จนถึงปลายขาออกของน้ำเสีย ซึ่งจะพบว่า มีสารบนตัวดูดติดผิวส่วนหนึ่งที่เล็ดลอดออกไปกับน้ำเสีย เรียกจุดที่น้ำเสียเริ่มมีสารถูกดูดติดผิวเจือปนออกมาว่า จุดเบรคทราจ (Breakthrough point) ซึ่งเป็นจุดที่คอลัมน์ไม่สามารถทำงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์อีก

เวลาการใช้งาน (Service time) จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังนี้

1. ความสูงของชั้นตัวดูดติดผิว โดยเวลาการใช้งานของตัวดูดติดผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มชั้นความสูงของตัวดูดติดผิว และจะลดลงเมื่อความสูงของตัวดูดติดผิวลดลง
2. พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดติดผิว (Specific surface area) ตัวดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้เวลาการใช้งานมากกว่าตัวดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย
3. อัตราการกรอง จะส่งผลต่อเวลาในการใช้งานของตัวดูดติดผิว คือ ถ้าอัตราการกรองสูงจะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าอัตราการกรองต่ำ
4. ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบจะส่งผลต่อเวลาการใช้งาน เมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสูง จะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นของตัวดูดติดผิว สามารถเลือกใช้ได้ ดังนี้

1. การไหลลง (Down Flow) คือ การให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดติดผิว โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เมื่อตัวดูดติดผิวเสื่อมสภาพจะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ทั้งคอลัมน์
2. การไหลขึ้น (Up Flow) คือ การให้น้ำที่ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นตัวดูดติดผิวขึ้นข้างบน สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นตัวดูดติดผิวที่หมดสภาพแล้วเป็นระยะๆ โดยเอาตัวดูดติดผิวออกด้านล่างคอลัมน์ เมื่อนำไปทำการฟื้นฟูสภาพแล้ว สามารถนำกลับมาใส่ในส่วนบนของคอลัมน์

2.9 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษากระบวนการดูดติดผิว โดยการนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งนิยมมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะว่ากระบวนการดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่ไม่มีความยุ่งยาก ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการหรือติดตั้งมีราคาถูกลง และที่สำคัญยังสามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนทั้งในดิน และในน้ำได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง และมีการทำการวิจัยอย่างกว้างขวาง เพื่อช่วยในการนำกระบวนการดูดติดผิวมาใช้งานมีประสิทธิภาพดีขึ้น การศึกษาที่ผ่านมา มีดังนี้

2.9.1 ตัวกลางที่เป็นเหล็กออกไซด์

การนำโลหะออกไซด์มาใช้เป็นตัวกลางในกระบวนการดูดติดผิว มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่แสดงให้เห็นว่า ตัวกลางที่เป็นโลหะออกไซด์นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดติดผิวได้เป็นอย่างดี ในที่นี้ขอยกตัวอย่าง การนำเหล็กออกไซด์มาใช้เป็นตัวกลางได้แก่

Aoki และ Munemori (1982) ได้ทำการศึกษากำหนด Cr(VI) จากน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ด้วยการดูดติดผิว Iron (III) hydroxide พบว่าการดูดติดผิวของ Cr(VI) ในรูปของ HCrO_4 บน Iron (III) hydroxide ที่พีเอชต่ำกว่า 8.5 การดูดติดผิวของ Cr(VI) สามารถบอกได้โดยการมีแอนไอออนตัวอื่นๆ อย่างเช่น SO_4^{2-} และ SCN^- และการเพิ่มขึ้นโดยการมีโลหะไอออนอยู่อย่าง Cd(II) และ Pb(II) การเกิดนี้อธิบายจากการดูดติดผิวที่แข่งขันกันของแอนไอออนอื่นๆ จะขึ้นอยู่กับความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก การเพิ่มขึ้นอาจจะเนื่องมาจากการเพิ่มตำแหน่งการดูดติดผิวอันเป็นผลมาจากการตกตะกอนร่วม ของโลหะไอออนกับ Iron (III) hydroxide ได้

Namasivayam และ Ranganathan (1998) ได้ทำการศึกษาผลของลิแกนด์ของสารอินทรีย์ที่มีต่อการกำจัด Pb(II), Ni(II), Cd(II) โดยการดูดติดผิวบน Fe(III)/Cr(III) ไฮดรอกไซด์ที่เป็นของเสีย ซึ่งพบว่าลิแกนด์สามารถทำให้การดูดติดผิวของ Pb(II) ในช่วงพีเอช 3.5-8.5 ลดลง ในขณะที่มีซีเตรท และ EDTA ทำให้การดูดติดผิวของ Ni(II) ลดลง แต่อะซีเตรทจะทำให้การดูดติดผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการดูดติดผิวของ Cd(II) จะลดลงอย่างมาก ถ้ามีอะซีเตรทและซีเตรทอยู่

2.9.2 ตัวกลางที่เป็นไคโตซาน

เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าตัวดูดติดผิวชนิดอื่นๆ คือมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักต่างๆ ได้หลายชนิด เช่น แคดเมียม ทองแดง โคบอลต์ ตะกั่ว และปรอท ทั้งยังสามารถดูดติดิวานาเดียม นิกเกิล และสารกัมมันตรังสีจำพวกยูเรเนียม โมลิบดีนัม ออกจากรน้ำเสียได้อีกด้วย (Bassi และคณะ, 1999) นอกจากนี้ไคโตซานยังเป็นวัสดุทางชีวภาพ ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และไม่มีความเป็นพิษ จึงปลอดภัยในการนำมาใช้ประโยชน์ ทำให้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการนำไคโตซานมาใช้งาน ซึ่งก็เพื่อที่จะพัฒนาเป็นตัวดูดซับหรือตัวดูดติดผิว ที่มีประสิทธิภาพในขนาดที่ ได้แก่

เกษม สีดอกบัว (2543) ศึกษาประสิทธิภาพของไคโตซานซึ่งสกัดมาจากเปลือกกุ้ง กระจง และกุ้งผสมปู ในการกำจัดไอออน Pb^{2+} และ Hg^{2+} ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากห้องปฏิบัติการ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 ใช้ปริมาณไคโตซาน 1.7 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 90.3 และสภาวะที่ใช้ในการกำจัด Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.0 ใช้ปริมาณไคโตซาน 2.2 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 97.8 สำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} และ Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 โดยใช้ปริมาณไคโตซาน 1.5 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 66.4-67.6 และ 48.0-76.7 ตามลำดับ

รามนรี เนตรวิเชียร (2543) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวอาร์ซีเนตในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ไคโตซานแบบเม็ด พบว่าเวลาการดูดติดผิวของอาร์ซีเนตบนไคโตซานภายในเวลาน้อยกว่า 24 ชั่วโมง และพบว่าที่พีเอชต่ำทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์ซีเนตสูงกว่าที่พีเอชสูง ความสามารถของไคโตซานในการดูดติดผิวอาร์ซีเนตมีค่าอยู่ในช่วง 0.0061-1.3167 มิลลิกรัมต่อกรัม สภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้ปริมาณไคโตซาน 0.5 กรัม ที่พีเอช 6 ภายในเวลา 24 ชั่วโมง อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที การเพิ่ม $NaNO_3$ และ SO_4^{2-} ไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาการดูดติดผิวอาร์ซีเนตบนไคโตซานแบบเม็ด

อรุณี เทอดเทพพิทักษ์ (2534) แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดติดผิวของโลหะโดยไคติน และไคโตซานที่ผลิตได้ พบว่าไอออนโลหะ Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} ถูกดูดติดผิวโดยไคตินได้เท่ากับ 7.0×10^{-3} , 3.4×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ และโดยไคโตซานได้เท่ากับ 7.0×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ สามารถลดปริมาณโลหะ Pb^{2+} ในแหล่งน้ำทิ้งบริเวณใกล้โรงงานอุตสาหกรรมจากความเข้มข้น 2.17×10^{-3} และ 1.3×10^{-3} มิลลิโมลต่อลิตร ให้เหลือ 1.06×10^{-3} และ 0.53×10^{-3} มิลลิโมลต่อลิตร

Bassi และคณะ (1999) ได้ศึกษาความสามารถของไคโตซานในการจับโลหะหนักที่ถูกชะออกมาในกระบวนการล้างดินด้วยกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งจะได้ไอออนโลหะหนักหลายๆ ชนิดผสมกัน ได้แก่ Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ไคโตซาน 0.5 กรัม ใส่ในน้ำชะปริมาณ 25 มิลลิลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 6 อัตราเร็วของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ผลในการดูดติดผิวของไอออนโลหะหนักผสมที่ดี โดยมีการดูดติดผิว Zn^{2+} มากที่สุด คือ ร้อยละ 75 รองลงมาคือ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} โดยมีการดูดติดผิวเท่ากับร้อยละ 71.55, 60 และ 40 ตามลำดับ ที่อัตราเร็วของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที นั้นไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิวของไอออนโลหะหนัก และการดูดซับไอออนโลหะหนักในสารละลายผสมจะเกิดขึ้นได้มากกว่าในสารละลายของไอออนโลหะหนักชนิดเดียว ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากค่าความแรงไอออน (ionic strength) ที่สูงกว่า

Feng และคณะ (2000) ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของโลหะหนัก และสีย้อมโดยใช้เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากของเสียจากการประมง ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของไคโตซาน (เม็ด, เกล็ด) และชนิดของของเสียจากการประมง (เปลือกกุ้ง, เปลือกกุ้งมังกร, เปลือกปู) เมื่อนำไคตินและไคโตซานไปวัดค่าพื้นที่ผิวโดยใช้วิธี BET พบว่า เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานมีพื้นที่ผิว 4-6 และ 30-40 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของไคโตซานที่ได้จาก เปลือกปู เปลือกกุ้งมังกร และเปลือกกุ้ง จะมีค่าลดลงตามลำดับ (เปลือกปู > เปลือกกุ้งมังกร > เปลือกกุ้ง) เป็นผลให้ไคโตซานเม็ดมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวดีกว่าไคโตซานเกล็ด และไคโตซานเม็ดที่เตรียมได้จากเปลือกปูจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไคโตซานเม็ดชนิดอื่นๆ ทั้งการดูดติดผิวไอออนทองแดงและการดูดติดผิวสีย้อมชนิด RR222

Schmuhl และคณะ (2001) ได้ศึกษาการใช้โคโตซานในการดูดติดผิว Cu(II) และ Cr(VI) โดยโคโตซานที่ใช้มีทั้งที่ทำการเชื่อมขวางและไม่ได้ทำการเชื่อมขวาง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก พีเอชของสารละลาย และรอบการกวน โลหะหนักที่ใช้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชระหว่าง 2 ถึง 11 รอบการกวนที่ใช้ คือ 200 รอบต่อนาที 400 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที สารเชื่อมขวางที่ใช้คือ อีพียาโลไฮดรินเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พบว่า โคโตซานสามารถดูดติดผิวโลหะหนักได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 และความสามารถในการดูดติดผิว ลดลงเมื่อพีเอชเปลี่ยนไป รอบการกวนไม่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เมื่อทำการเชื่อมขวางโคโตซานด้วยอีพียาโลไฮดรินทำให้ประสิทธิภาพของการดูดติดผิว ลดลง ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการดูดติดผิว โลหะหนักถูกใช้ไปในการเชื่อมขวาง โคโตซานที่ไม่ได้ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดติดผิวได้ 78 มิลลิกรัมต่อกรัมโคโตซาน และโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดติดผิวได้ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมโคโตซาน การดูดติดผิวไอออนทองแดงและไอออนโครเมียมสามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ตามลำดับ

2.9.3 ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์และโคโตซาน

ธรรม ฐิประกอบกิจ (2541) ทดลองกำจัดอาร์เซนิก As(V) ในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ พบว่าทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก As(V) สูงกว่าทราเยเคลือบแมงกานีสออกไซด์ โดยพีเอชของน้ำสังเคราะห์ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนไอออนอาร์เซนิก As(V) เท่ากับ 7 ซึ่งที่พีเอชเท่ากับ 7 ทราเยเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก As(V) ใกล้เคียงกับที่พีเอช 3 และอัตราการที่เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนไอออนอาร์เซนิก As(V) ของทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์ อยู่ในช่วง 12-20 BV/hr ส่วนทราเยแมงกานีสออกไซด์อยู่ในช่วง 2-30 BV/hr

ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์ (2543) ได้ทำการศึกษาผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าการดูดติดผิวของตะกั่ว และฟลูออไรด์บนทราเยเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ จะเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยการดูดติดผิวของตะกั่วจะน้อยลงหากมีตะกั่วในช่วงเริ่มต้นมากขึ้น ส่วนการดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มฟลูออไรด์ในช่วงเริ่มต้นมากขึ้น พีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิวของตะกั่วจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงพีเอช 5-8 โดยดีที่สุดในช่วงพีเอช 6 ส่วนการดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเกิดได้มากในช่วงพีเอชต่ำ คือ 4-5 และจะถูกดูดติดผิวได้ลดลงเมื่อเพิ่มพีเอชสูงขึ้น และพบว่าความ

เข้มข้นไอออนไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ แสดงว่าการดูดติดผิวของตะกั่วจะเป็นการดูดติดผิวทางเคมี และเมื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมกันระหว่างตะกั่วและฟลูออไรด์นั้น ไม่มีความแตกต่างกับการดูดติดผิวของตะกั่วและฟลูออไรด์ในช่วงที่ไม่ได้ผสมกัน แสดงว่าการดูดติดผิวของฟลูออไรด์จะเป็นการดูดติดผิวทางกายภาพ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์ คือ อัตราส่วนจำนวนโมลของตะกั่วต่อฟลูออไรด์ เท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่พีเอช 6 เมื่อทำการทดลองกับน้ำเสียจริง พบว่า จะกำจัดได้ดีที่พีเอชเท่ากับ 8

พงศ์ภัทร ศรีขจร (2549) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม Cr(VI) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า มีลักษณะการดูดติดผิวแบบสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ ในการศึกษาอายุการใช้งานและผลของความสูงของชั้นทรายเคลือบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ในการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้น 4 พบว่าอายุการใช้งานในการกำจัดโครเมียมประมาณ 2 ชั่วโมง ในการศึกษาผลของการฟื้นฟูประสิทธิภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ภายหลังการฟื้นฟูประสิทธิภาพสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

Boujelben และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสออกจากสารละลายโดยใช้วัสดุธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นตัวดูดติดผิว โดยศึกษาวัสดุที่ใช้ดูดติดผิว 3 ชนิด คือ ทรายสังเคราะห์ ทรายแม่น้ำ และเศษอิฐ เคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าทั้งสามตัวดูดติดผิวมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและปริมาณเหล็กออกไซด์สูง สามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำได้ และเห็นได้ว่าเหล็กที่สะสมบนทรายและอิฐ คือ $FeO(OH)$ นอกจากนี้การดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับพีเอชโดยฟอสฟอรัสจะถูกกักไว้มากที่สุดที่พีเอชประมาณ 5

Chang และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัดอาร์เซนิก ในคอลัมน์ด้วยทรายเคลือบเหล็ก (ICS) และทรายเคลือบแมงกานีส (MCS) ทดลองโดยให้ MCS อยู่ล่างและ ICS อยู่บน โดยผ่านกระบวนการออกซิเดชันและดูดติดผิว พบว่าความสามารถการดูดติดผิวและอัตราการดูดติดผิวของอาร์เซนิก As(V) บน ICS ดีกว่าอาร์เซนิก As(III) และพบว่ายังช่วยในการออกซิเดชัน As(III) เป็น As(V) โดยที่ MCS จะดูดติดผิว As(V) ดังนั้นชี้ให้เห็นว่า MCS สามารถเป็นตัวออกซิไดซ์ As(III) และเป็นตัวดูดติดผิวที่ดีของ As(V)

Gupta และคณะ (2005) ทำการศึกษาการดูดติดิฟิวสารละลายอาร์เซนิก As(III) โดยทรายที่เคลือบเหล็กออกไซด์ ทำการทดลองแบบที่ละเทและคอลัมน์ พบว่าการดูดติดิฟิวเป็นแบบแลงเมียร์ไอโซเทอม ที่พีเอช 7.5 ในเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความสามารถการดูดติดิฟิวสูงสุดของทรายที่เคลือบเหล็กออกไซด์ (28.57 ไมโครกรัมต่อกรัม) ซึ่งสูงกว่าทรายที่ไม่เคลือบเหล็กออกไซด์มาก (5.63 ไมโครกรัมต่อกรัม) และพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดอาร์เซนิก 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณตัวดูดติดิฟิว 20 กรัมต่อลิตร ด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิก 400 ไมโครกรัมต่อกรัม สามารถลดความเข้มข้นอาร์เซนิกเหลือน้อยกว่า 24 ไมโครกรัมต่อลิตร

Hsu และคณะ (2008) ทำการศึกษาการดูดติดิฟิวอาร์เซนินेट As(V) และอาร์เซนไนต์ As(III) บนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCS) โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ภายใต้พีเอช 5-8 พบว่า pH_{zpc} ของ IOCS มีค่าประมาณ 7.0 ± 0.4 ซึ่งเหมาะสมในการดูดติดิฟิวอาร์เซนิกที่อยู่ในรูปของแอนไอออน As(V) และพบว่า การดูดติดิฟิว As(V) และ As(III) ลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิกเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณ IOCS จะส่งผลให้การกำจัดอาร์เซนิกเพิ่มขึ้นด้วย ในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิก และปริมาณตัวรองรับที่ พบว่าการดูดติดิฟิว As(V) และ As(III) ลดลง เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยสามารถสรุปลำดับประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ในสภาวะที่ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิก ปริมาณตัวรองรับ และพีเอชเริ่มต้นของสารละลายอาร์เซนิกคงที่ ดังนี้ $As(V) > As(V) + As(III) > As(III)$ และในการดูดติดิฟิวนี้เป็นแลงเมียร์ไอโซเทอม

Wan และคณะ (2010) ทำการศึกษาสภาวะที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อการดูดติดิฟิวน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง Cu(II) และตะกั่ว Pb(II) บนทรายเคลือบโคโคซาน (CCS) โดยทำการทดลองแบบที่ละเท พบว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การดูดติดิฟิว Pb(II) สูงขึ้น แต่ส่วนของ Cu(II) จะถูกดูดติดิฟิวเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งกลไกการดูดติดิฟิวสามารถอธิบายด้วยแลงเมียร์ไอโซเทอม โดยค่าความสามารถการดูดติดิฟิวสูงสุดของ Cu(II) และ Pb(II) เป็น 8.18 และ 12.32 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าในสภาวะที่เป็นกรดสามารถนำโลหะที่ถูกดูดติดิฟิวบน CCS สามารถเอากลับคืนมาได้

Qu และคณะ (2009) ทำการศึกษาการกำจัดและการนำเอากลับคืนมาใหม่ของ Hg(II) จากสารละลาย ด้วยการเคลือบโคโคซาน 2 ชนิด บนเส้นใยฝ้ายเป็น SCCH และ RCCH พบว่าสามารถอธิบายกลไกการดูดติดผิวได้ทั้งไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และฟรุนด์ลิช และพบว่า SCCH และ RCCH เป็นตัวดูดติดผิวที่มีความจำเพาะกับ Hg(II) จากการทดลองที่มีโลหะประจุสองบวกอยู่ร่วมกัน ซึ่งประกอบด้วยไอออนของ Pb(II), Cu(II), Ni(II), Cd(II), Zn(II), Co(II), Mn(II) and Ag(I) และการเพิ่มของอุณหภูมิมีผลดีต่อการดูดติดผิว Hg(II) บน SCCH และ RCCH ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการดูดติดผิวดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และในสภาวะที่เหมาะสมที่มีธาตุหมู่ที่ 1 (Alkali) และธาตุหมู่ที่ 2 (Alkaline earth metals) มากเกินพอ เช่น K(I), Na(I), Ca(II) and Mg(II) และโลหะหนัก เช่น Co(II), Mn(II) and Ag(I) สามารถเอา Hg(II) กลับมาใหม่ได้

Boddu และคณะ (2008) ทำการศึกษาการกำจัดสารละลายอาร์เซนิก As(III) และ As(V) โดยใช้ลูมินาเซรามิกเคลือบโคโคซาน (CCB) พบว่าความสามารถการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิวเป็นแบบชั้นเดียว โดยใช้แบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอม ค่าการดูดติดผิว As(III) 56.50 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดติดผิว As(V) 96.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ สามารถนำมารีเจนเนอเรชันคอลัมน์ได้

Diamadopoulos และคณะ (1993) ศึกษาการนำซีเถ้าลอยมาใช้ในการกำจัดสารหนูออกจากน้ำ โดยในการทดลองใช้ซีเถ้าลอย 1 กรัม เพื่อกำจัดสารหนูที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทดลองที่พีเอช 4 7 และ 10 ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด คือระยะเวลาสัมผัส โดยอยู่ในช่วง 20 ชม.แรกของการทดลองซึ่งจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 4 ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือ 30 มิลลิกรัม สารหนูต่อซีเถ้าลอย 1 กรัม และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่า เมื่อเทียบกับค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ

บทที่ 3

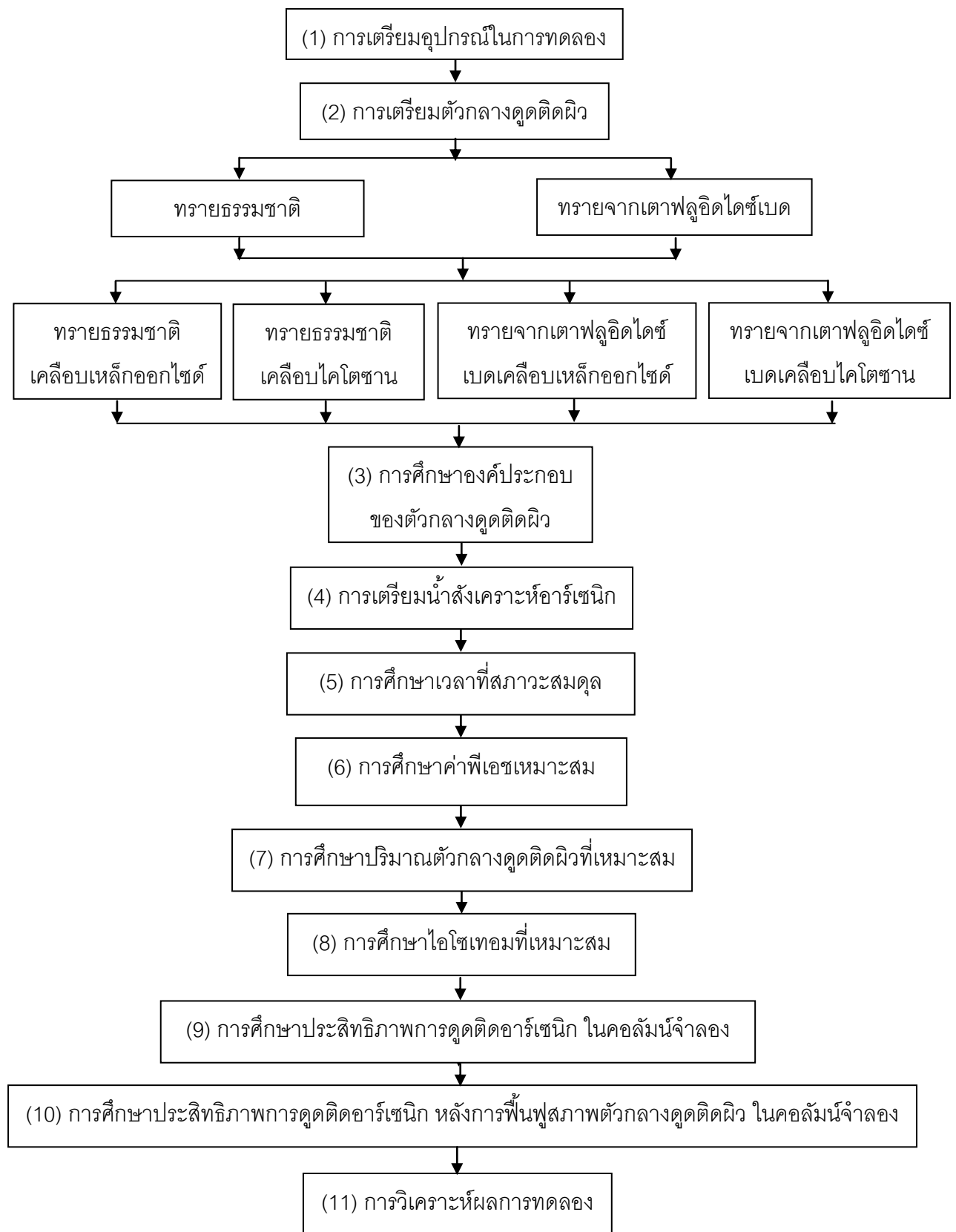
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ณ หน่วยวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม (Research Unit of Industrial Waste Management) ห้องปฏิบัติการกำจัดขยะ (Solid wastes laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดการดำเนินการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.1 แผนการดำเนินการทดลอง ดังภาพที่ 3.1

ในการวิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 11 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
2. การเตรียมตัวกลางดูดติดผิว (ในกรณีนี้ คือ ทราเยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ และทรายเคลือบโคโคซาน)
3. การศึกษาองค์ประกอบของตัวกลางดูดติดผิว
4. การเตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก
5. การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกไอออนด้วยทราย 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน กับทรายเก่าที่ผ่านการเผาในเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน
6. การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทราย 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน กับทรายเก่าที่ผ่านการเผาในเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน
7. การศึกษาหาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมที่สุดในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทราย 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน กับทรายเก่าที่ผ่านการเผาในเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน
8. การศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก
9. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดอาร์เซนิก ในถังคอลัมน์
10. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดอาร์เซนิก หลังจากทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ในถังคอลัมน์
11. การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ตู้อบความร้อน (Oven)
- 3.2.2 ภาชนะอลูมิเนียม
- 3.2.3 โถดูดความชื้น (Dessicator)
- 3.2.4 ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 35 (0.5 มิลลิเมตร) และเบอร์ 30 (0.6 มิลลิเมตร)
- 3.2.5 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่งของกรัม
- 3.2.6 เครื่องเขย่าสารที่ปรับความเร็วรอบได้ (Shaker)
- 3.2.7 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) pH 211 Microprocessor pH meter
- 3.2.8 กระดาษกรอง Whatman no.42
- 3.2.9 น้ำกลั่น
- 3.2.10 ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 3.2.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400
- 3.2.12 เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) บริษัท Perkin-Elmer รุ่น 1760X
- 3.2.13 เครื่องเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟเอกซเรย์ดิฟเฟรกันสเปกโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) บริษัท Oxford รุ่น ISIS-300
- 3.2.14 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Area Analyzer) บริษัท Micromeritics Instrument coporation ASAP 2000 v.3.03
- 3.2.15 เครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา (Inductively Couple Plasma, ICP) บริษัท JY JOBIN IVON รุ่น ULTIMA 2

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวกลางทราย
 - ทรายที่เคลือบเหล็กออกไซด์ สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ เพอร์ริคไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
 - ทรายเคลือบโคโคซาน สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โคโคซาน จากเปลือกกุ้ง ขนาดน้ำหนักโมเลกุล 250,000 ดาลตัน (Dalton) ที่ระดับร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทิล 90 จากบริษัท Biolife Eland Corporation และกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
2. สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก ได้แก่ โซเดียมอาร์ซิเนต ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
3. สารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO_3)
4. สารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์
5. สารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก สำหรับวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคอบเบิลพลาสมา

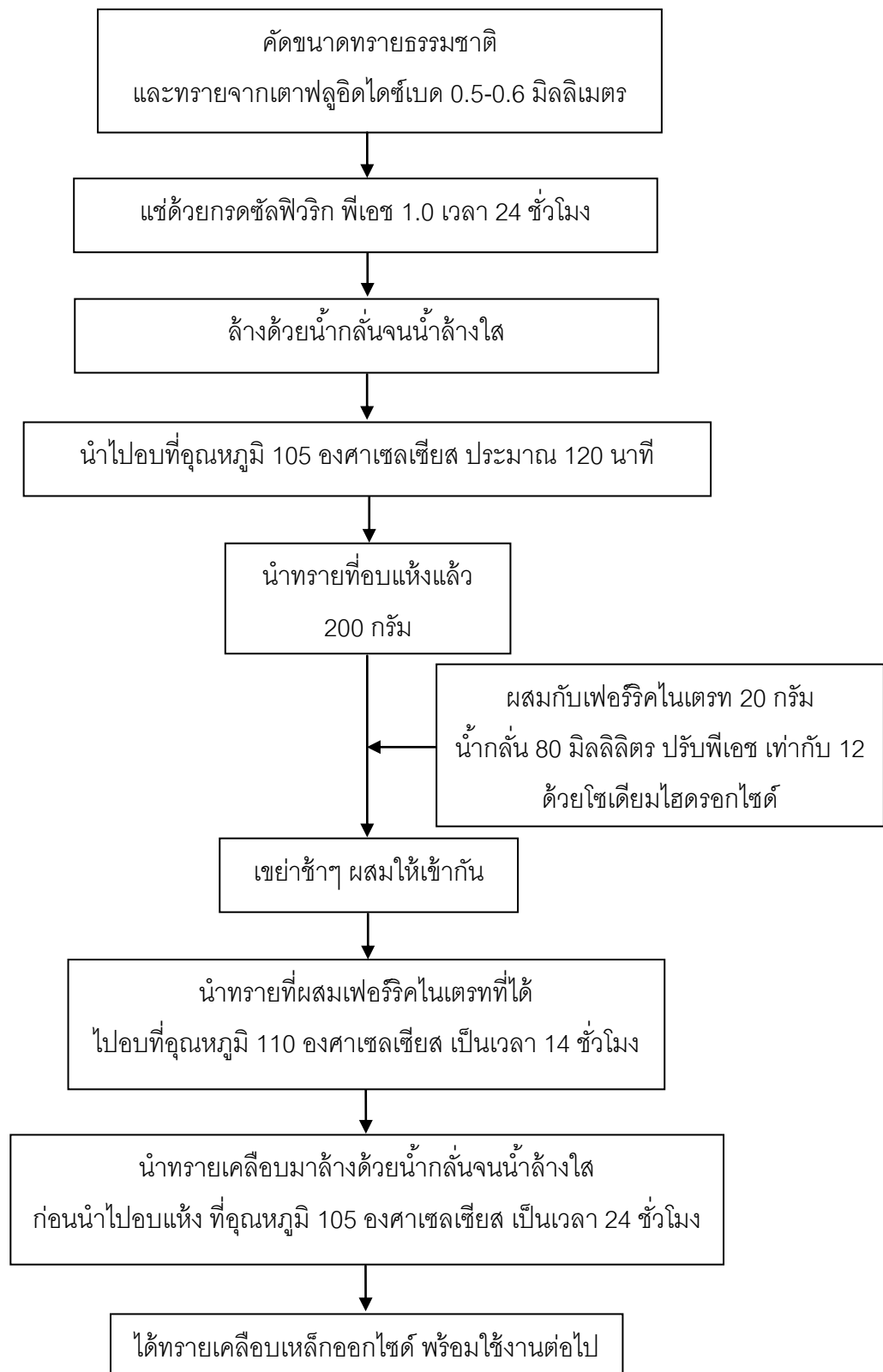
หมายเหตุ ทรายที่ใช้ในการทดลองมี 2 ประเภท คือ ทรายธรรมชาติที่ไม่ผ่านการเผามาก่อน และทรายเก่าที่ผ่านการเผาจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวกลางดูดติดผิว

3.3.1.1 การเตรียมตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (Benjamin และคณะ, 1996 อ้างถึงใน เบญจวรรณ วงศ์ศิริ, 2547)

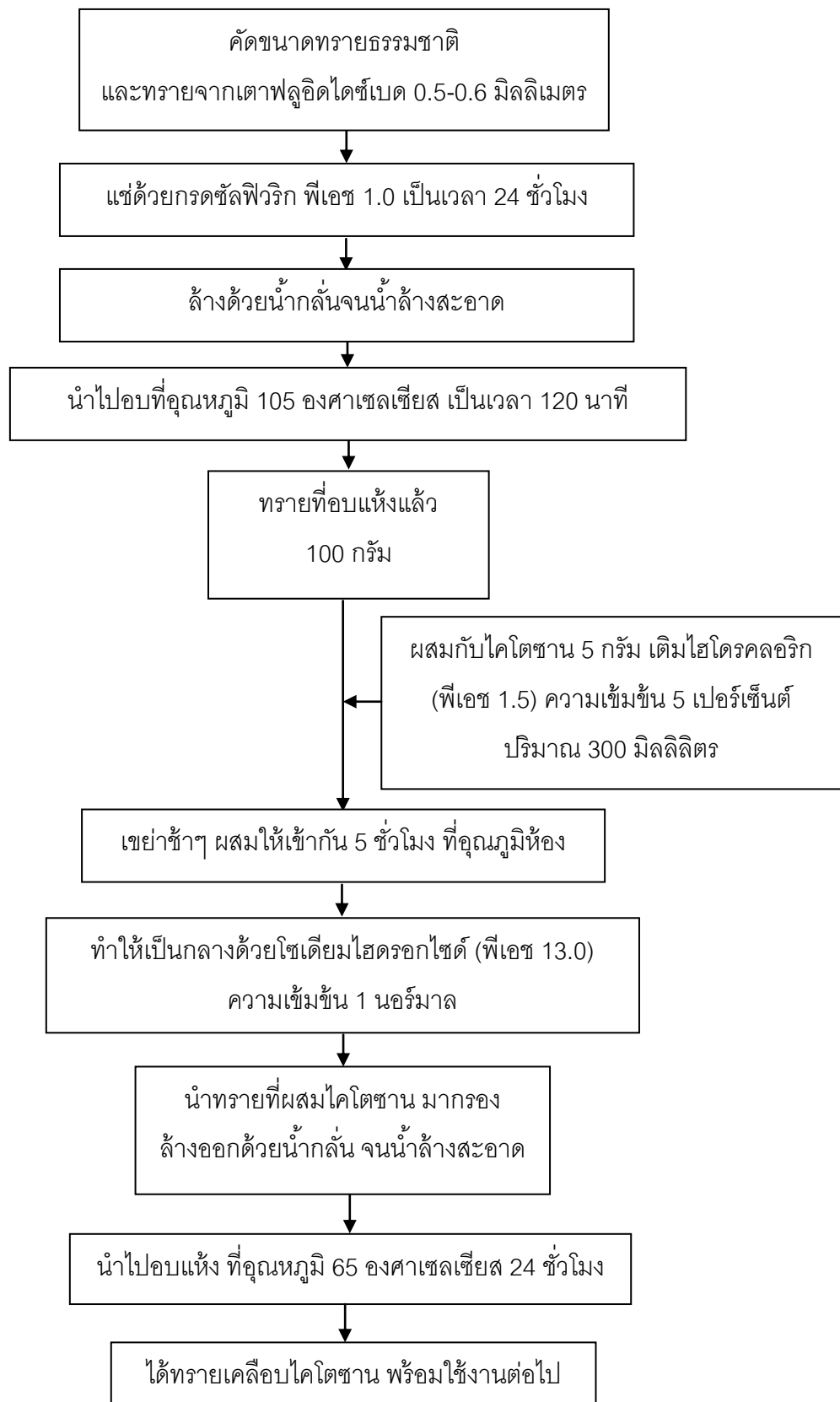
1. คัดทรายจากธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ให้มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 35 และ 30 (0.5-0.6 มิลลิเมตร)
2. การเตรียมทรายที่จะนำมาเคลือบเหล็กออกไซด์จะต้องมีการทำความสะอาดทรายก่อน โดยแช่เม็ดทรายด้วยกรดซัลฟิวริก 50 เปอร์เซ็นต์ (พีเอช 1.0) ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ล้างออกด้วยน้ำกลั่น จนน้ำล้างใส และวัดค่าพีเอชเท่ากับ 7
4. นำเม็ดทรายที่ล้างสะอาดแล้วใส่ถาดสเตนเลส ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
5. นำทรายที่อบแห้งแล้ว 200 กรัม ผสมกับสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทที่เตรียมจากเฟอร์ริกไนเตรท 20 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชให้เป็น 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 โมลาร์ ใส่ในขวดรูปชมพู่
6. เขย่าช้าๆ จนกระทั่งสารละลายเฟอร์ริกไนเตรทผสมเข้ากันกับทรายจากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงในถาดสเตนเลส
7. นำถาดสเตนเลสไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง
8. นำทรายเคลือบมาล้างออกด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำล้างใส แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. ได้ทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ที่จะนำไปใช้งานในการทดลองต่อไป ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

3.3.1.2 การเตรียมตัวกลางทรายเคลือบโคโตซาน (Wan และคณะ, 2004)

1. คัดทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดให้มีขนาดระหว่าง ตะแกรงเบอร์ 35 และ 30 (0.5-0.6 มิลลิเมตร)
2. การเตรียมทรายที่จะนำมาเคลือบโคโตซานจะต้องมีการทำความสะอาดทรายก่อน โดยแช่เม็ดทรายด้วยกรดซัลฟิวริก 50 เปอร์เซ็นต์ (พีเอช 1.0) ที่อุณหภูมิ 24 ชั่วโมง
3. ล้างออกด้วยน้ำกลั่น จนน้ำล้างใส และวัดค่าพีเอชเท่ากับ 7
4. นำเม็ดทรายที่ล้างสะอาดแล้วใส่ถาดสเตนเลส ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
5. นำทรายที่อบแห้งแล้ว 100 กรัม ผสมกับโคโตซาน 5 กรัม และเติม กรดไฮโดรคลอริก (พีเอช 1.5) ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่
6. เขย่าซ้ำๆ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ทรายและโคโตซาน ผสมกัน
7. นำสารที่เตรียมได้จากข้อ 6. มาทำให้เป็นกลางด้วยการเติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (พีเอช 13.0) ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล ครั้งละหยดจน สารละลายเป็นกลาง
8. หลังจากนั้นนำทรายที่ถูกเคลือบด้วยโคโตซานแล้ว มากรองออกจาก สารละลาย และล้างออกด้วยน้ำกลั่น จนน้ำล้างสะอาด
9. นำถาดสเตนเลสไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. ได้ทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ที่เคลือบโคโตซาน ที่จะนำไปใช้งานในการทดลองต่อไป ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมทลายเคลือบไคโตซาน

3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดติดผิว ดังตารางที่ 3.1

โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดติดผิว 4 ชนิด คือ

1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
2. ทรายธรรมชาติเคลือบโคโตซาน
3. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์
4. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบโคโตซาน

ตารางที่ 3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีกับวิธีวิเคราะห์

หัวข้อที่ศึกษา	วิธีที่วิเคราะห์
1. <u>ทางกายภาพ</u> • พื้นที่ผิวและพื้นที่ผิวจำเพาะ • ลักษณะโครงสร้าง	เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธี BET กล้องจุลทรรศน์แบบส่องส่องกราด (SEM)
2. <u>ทางเคมี</u> • ปริมาณธาตุที่พื้นผิว • รูปของหมู่ฟังก์ชัน	เครื่องเอนเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟเอกซเรย์ดิฟเฟรกชันสเปกโตรมิเตอร์ (EDS) เครื่องฟูรีเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR)

3.3.3 การเตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก

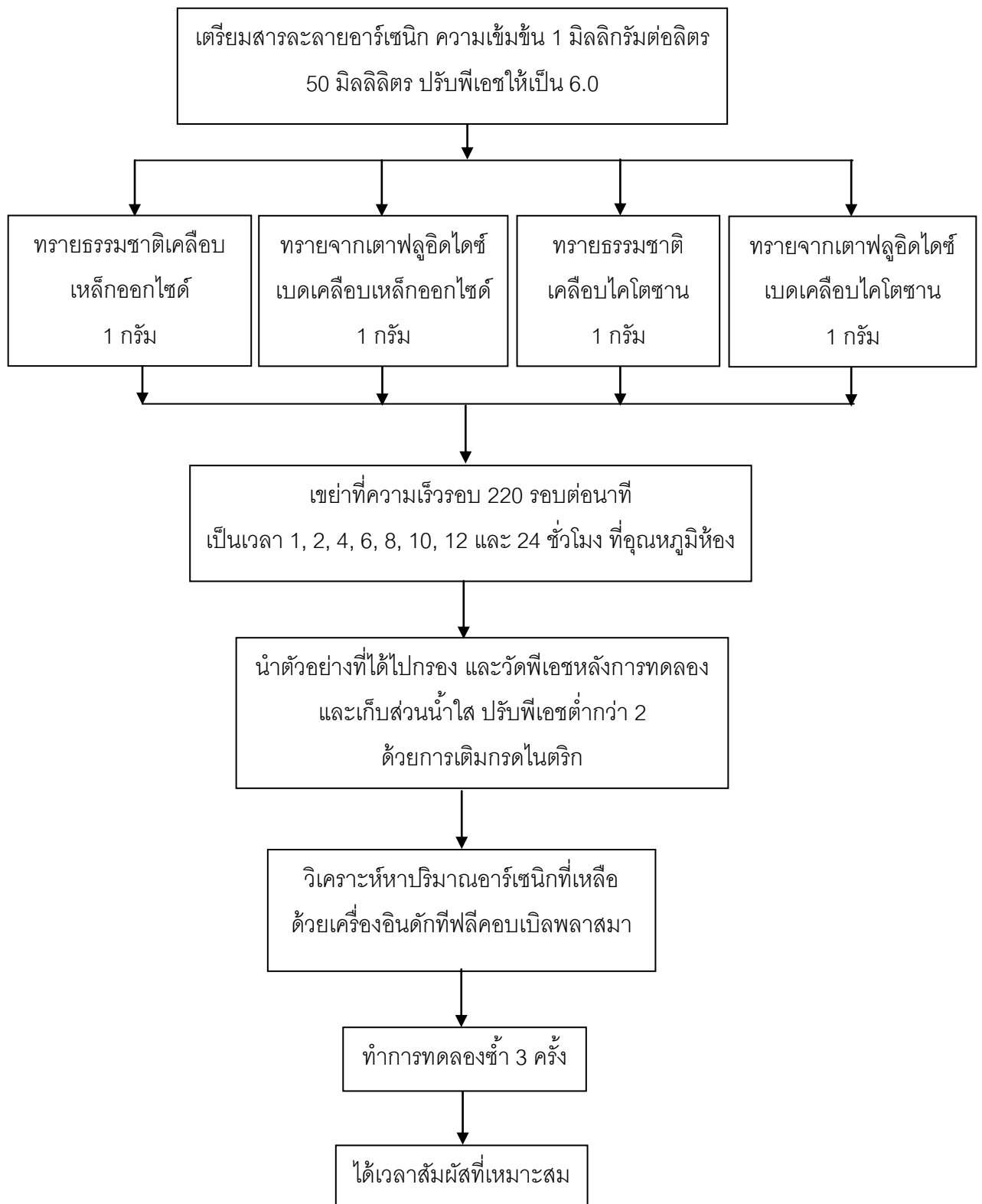
1. การเตรียมน้ำละลายอาร์เซนิกมาตรฐานความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) โดยละลาย $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 4.1633 กรัม ในกรดไนตริกเข้มข้น (16 โมลาร์) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายอาร์เซนิก 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. เตรียมน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นอาร์เซนิกไอออน $\text{As}(+5)$ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.3.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดอาร์เซนิกไอออนในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก

3.3.4.1 การศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

1. เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้นอาร์เซนิกไอออน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 6.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล
2. ชั่งตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด คือ ทราบธรรมชาติ และทราบจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน ที่มีขนาดระหว่าง 0.5-0.6 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิตร (จำนวน 8 ใบ/ทรายเคลือบหนึ่งชนิด)
3. นำน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่เตรียมจากข้อ 1. ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ
4. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
5. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 จากนั้นวัดพีเอชตัวอย่างทั้งหมดที่เก็บตามเวลาต่างๆ นั้น เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิตร และเติมกรดไนตริก ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
6. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณอาร์เซนิกไอออนที่เหลือ โดยเครื่องอินดักทีฟลึคอบเบิลพลาสมา
7. นำค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่เหลือไปหักออกจากความเข้มข้นของอาร์เซนิกก่อนเขย่า จะได้ความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ถูกดูดติดผิว ไปหาร้อยละของการถูกดูดติดอาร์เซนิกบนทรายเคลือบแต่ละชนิด จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับประสิทธิภาพการดูดติดอาร์เซนิก สังเกตจากกราฟดังกล่าวจะทราบระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดติดอาร์เซนิกในช่วงที่เส้นกราฟคงที่ และได้เวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบแต่ละชนิด เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.2 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.4



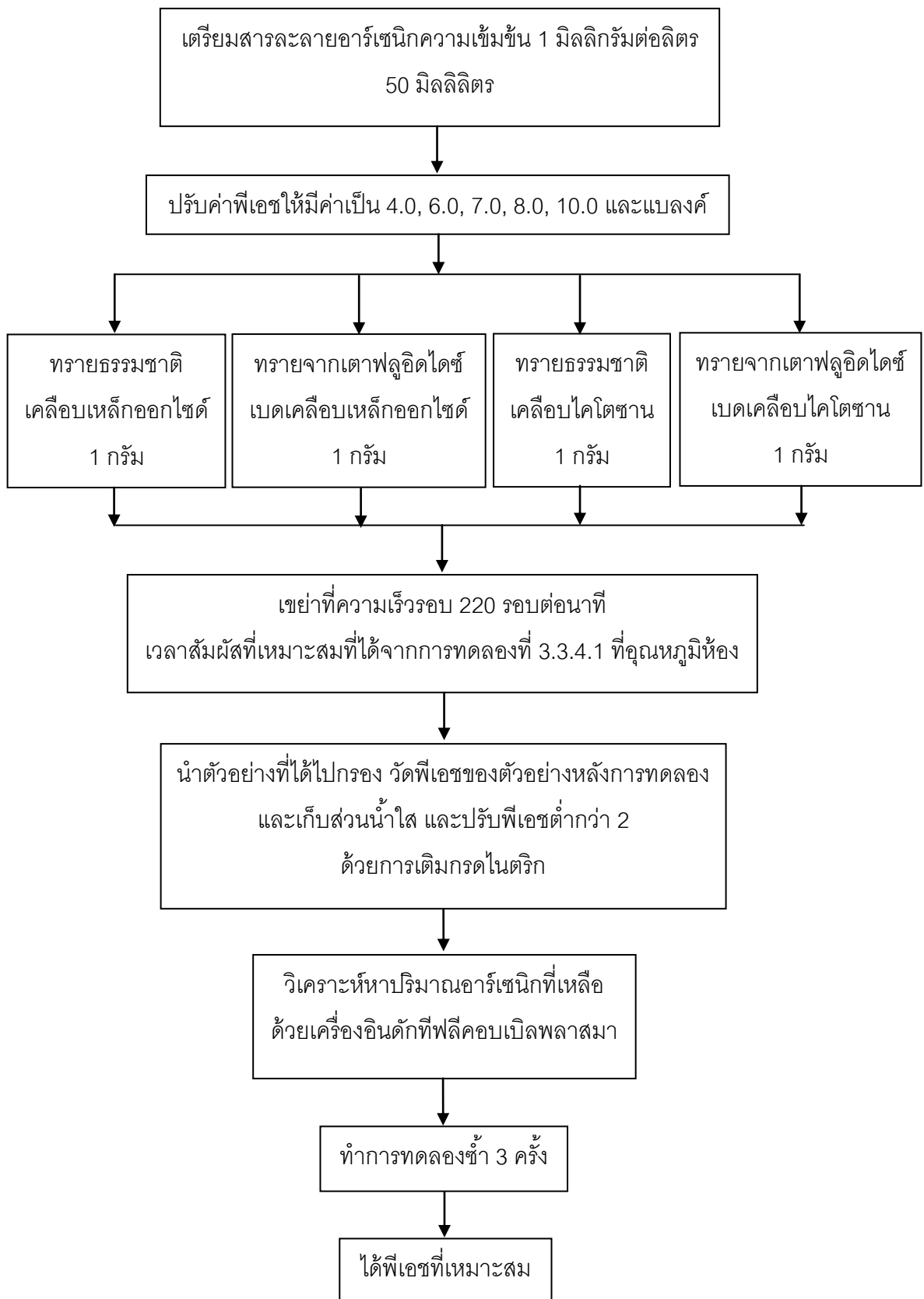
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรในการศึกษาผลของเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> 1. เวลาที่สัมผัส 2. ชนิดของตัวกลางดูดติดผิว	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 24 ชั่วโมง 1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 2. ทรายธรรมชาติเคลือบโคโตซาน 3. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ 4. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบโคโตซาน
<u>ตัวแปรควบคุม</u> 1. ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 2. ค่าพีเอช 1. ปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 2. ความเร็วรอบในการเขย่า 3. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว 4. ขนาดของตัวกลาง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร 6.0 50 มิลลิลิตร 220 รอบต่อนาที 1 กรัม 0.5-0.6 มิลลิลิตร
<u>ตัวแปรตาม</u> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์ 2. ประสิทธิภาพการดูดติดผิว	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง ร้อยละการดูดติดอาร์เซนิก

3.3.4.2 การศึกษาผลของพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

1. เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปริมาตรใบละ 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มอล ให้มีค่าพีเอชเป็น 4.0, 6.0, 7.0, 8.0 และ 10.0 พร้อมกับทำแบลนด์ เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันแต่ไม่มีการเติมตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด ลงในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก
2. ชั่งดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด คือ ทราเยอร์รามาติ และทราเยอร์จากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน ที่มีขนาด 0.5-0.6 มิลลิเมตร ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบที่เตรียมจากข้อ 1.
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที เป็นเวลาสามชั่วโมงที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3.3.4.1 ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และวัดพีเอชของตัวอย่างหลังการทดลอง เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริกให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณอาร์เซนิกไอออนที่เหลือ ด้วยเครื่องอินดักทีฟฟลูออโรมิเตอร์
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทราเยอร์เคลือบแต่ละชนิด และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช กับประสิทธิภาพการดูดติดอาร์เซนิกจะได้พีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทราเยอร์เคลือบแต่ละชนิด เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.3 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.5



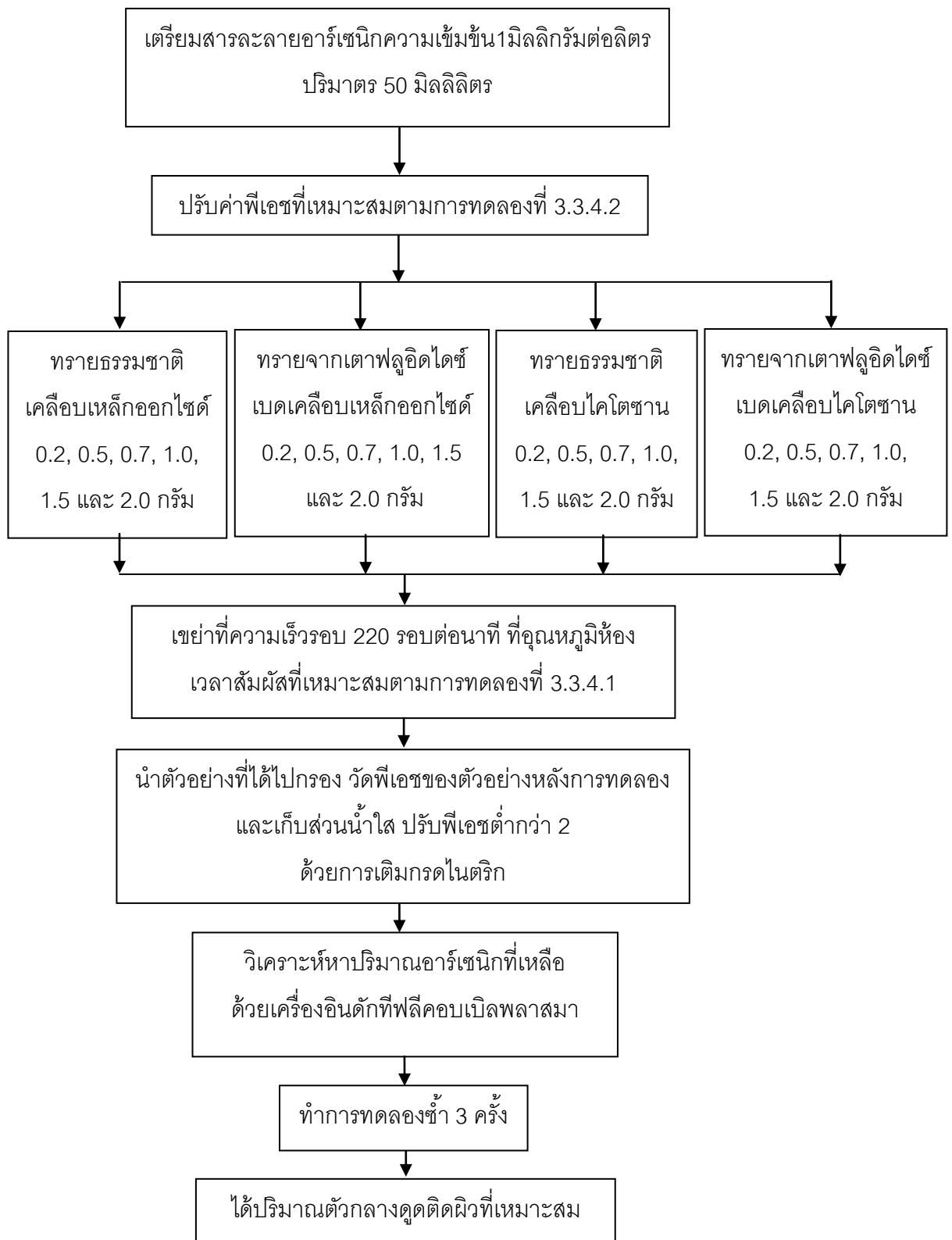
ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> 1. ค่าพีเอช 2. ชนิดของตัวกลางดูดติดผิว	4.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0 1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 2. ทรายธรรมชาติเคลือบโคโตซาน 3. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ 4. ทรายจากเตาฟูดไคซ์เบดเคลือบโคโตซาน
<u>ตัวแปรควบคุม</u> 1. ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 2. เวลาที่สัมผัส 3. ปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 4. ความเร็วรอบในการเขย่า 5. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว 5. ขนาดของตัวกลาง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.1 50 มิลลิลิตร 220 รอบต่อนาที 1 กรัม 0.5-0.6 มิลลิลิตร
<u>ตัวแปรตาม</u> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์ 2. ประสิทธิภาพการดูดติดผิว	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง ร้อยละการดูดติดอาร์เซนิก

3.3.4.3 การศึกษาผลของปริมาณตัวกลางที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

1. เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่เหมาะสมตามผลการทดลองที่ 3.3.4.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. ชั่งตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติ และทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน ที่มีขนาด 0.5-0.6 มิลลิเมตร ปริมาณ 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบที่เตรียมจากข้อ 1
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาที่เหมาะสมตามข้อ 4.3.4.1
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และวัดพีเอชของตัวอย่างหลังการทดลอง เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริกให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณอาร์เซนิกไอออนที่เหลือ ด้วยเครื่องอินดักทีฟฟลูออโรมิเตอร์
6. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละของการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบแต่ละชนิด และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวกลางดูดติดผิว กับประสิทธิภาพการดูดติดอาร์เซนิก จะได้ปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบแต่ละชนิด โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.4 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.6



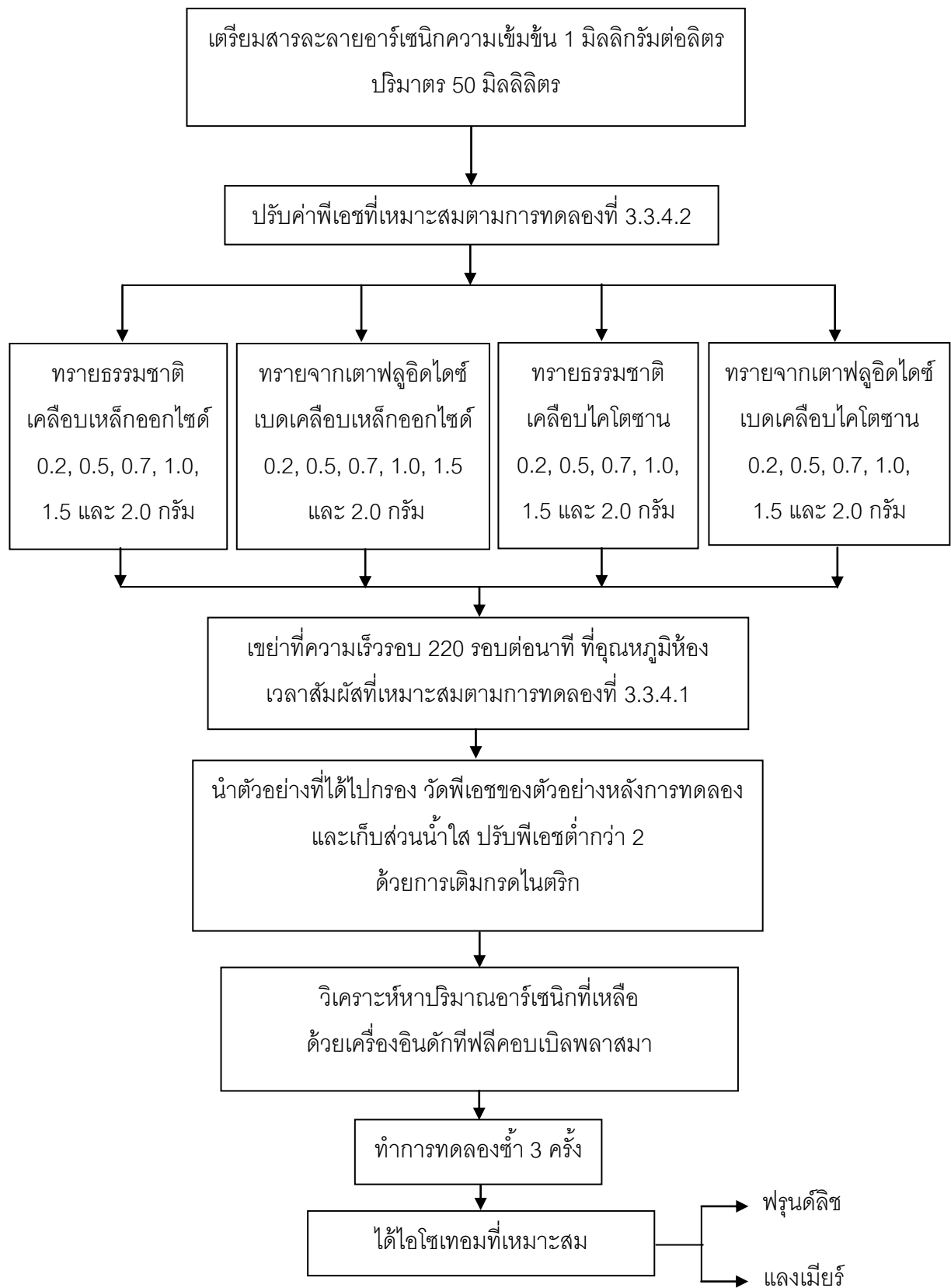
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก
ในน้ำสังเคราะห์

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> 1. ชนิดของตัวกลางดูดติดผิว 2. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว	1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 2. ทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน 3. ทรายจากเตาฟูลิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ 4. ทรายจากเตาฟูลิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม
<u>ตัวแปรควบคุม</u> 1. ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 2. เวลาที่สัมผัส 3. พีเอช 4. ปริมาตรน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 5. ความเร็วรอบในการเขย่า 6. ขนาดของตัวกลาง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.1 ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.2 50 มิลลิลิตร 220 รอบต่อนาที 0.5-0.6 มิลลิลิตร
<u>ตัวแปรตาม</u> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์ 2. ประสิทธิภาพการดูดติดผิว	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง ร้อยละการดูดติดอาร์เซนิก

3.3.5 การศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

1. เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่เหมาะสมตามผลการทดลองที่ 3.3.4.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
2. ชั่งตัวอย่างดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด คือ ทราบัรรมชาติ และทราบจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน ที่มีขนาด 0.5-0.6 มิลลิเมตร จำนวน 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมจากข้อ 1.
3. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาที่เหมาะสมตามข้อ 4.3.4.1
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และวัดพีเอชของตัวอย่างหลังการทดลอง เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร และเติมกรดไนตริก ให้พีเอชต่ำกว่า 2 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
5. นำน้ำตัวอย่างไปวัดปริมาณอาร์เซนิกไอออนที่เหลือ ด้วยเครื่องอินดักทีฟลีคอบเบิลพลาสมา
6. นำค่าที่ได้มาอธิบายด้วยสมการการดูดติดผิวทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ เพื่อเลือกสมการที่สอดคล้องและเหมาะสมกับผลการทดลองมากที่สุด โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.5 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.7



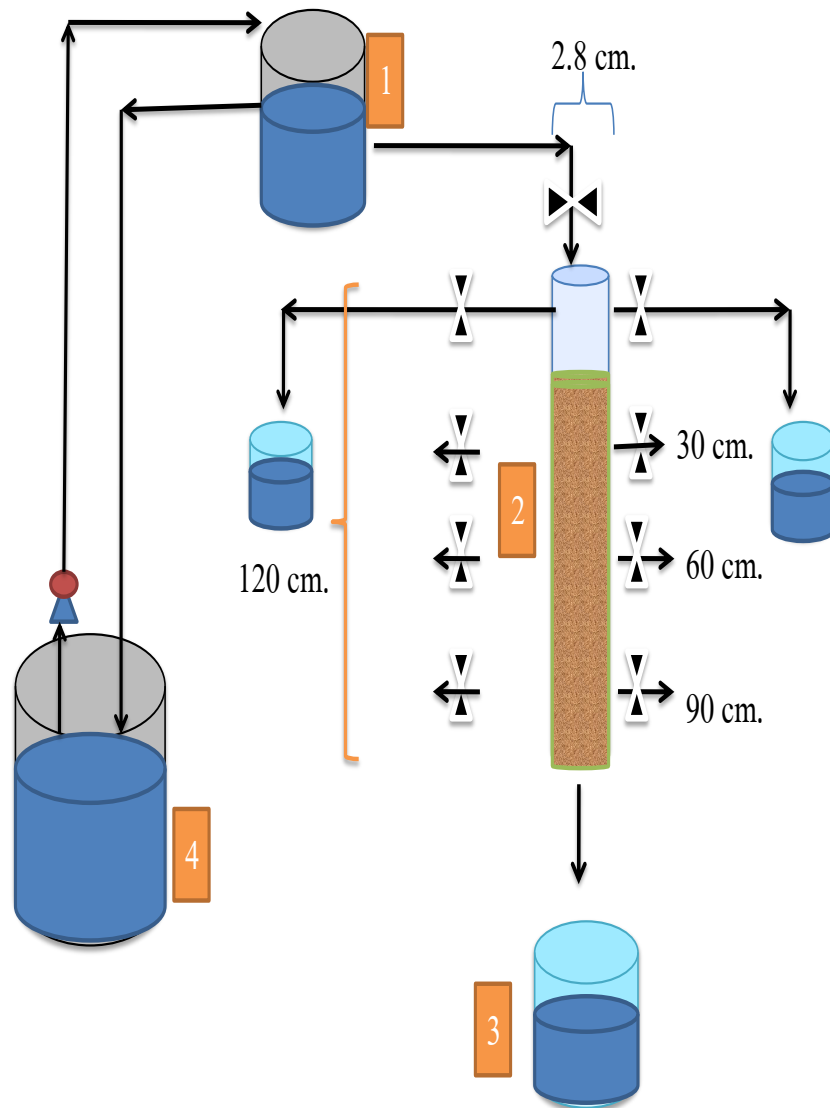
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาไอโซโทม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวอาร์เซนิก

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> 1. ชนิดของตัวกลางดูดติดผิว 2. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิว	1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 2. ทรายธรรมชาติเคลือบโคโตซาน 3. ทรายจากเตาฟูดิโอซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ 4. ทรายจากเตาฟูดิโอซ์เบดเคลือบโคโตซาน 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัม
<u>ตัวแปรควบคุม</u> 1. ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 2. เวลาที่สัมผัส 3. พีเอช 4. ปริมาตรน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 5. ความเร็วรอบในการเขย่า 6. ขนาดของตัวกลาง	1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.1 ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.2 50 มิลลิลิตร 220 รอบต่อนาที 0.5-0.6 มิลลิลิตร
<u>ตัวแปรตาม</u> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์ 2. ประสิทธิภาพการดูดติดผิว	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง ร้อยละการดูดติดอาร์เซนิก

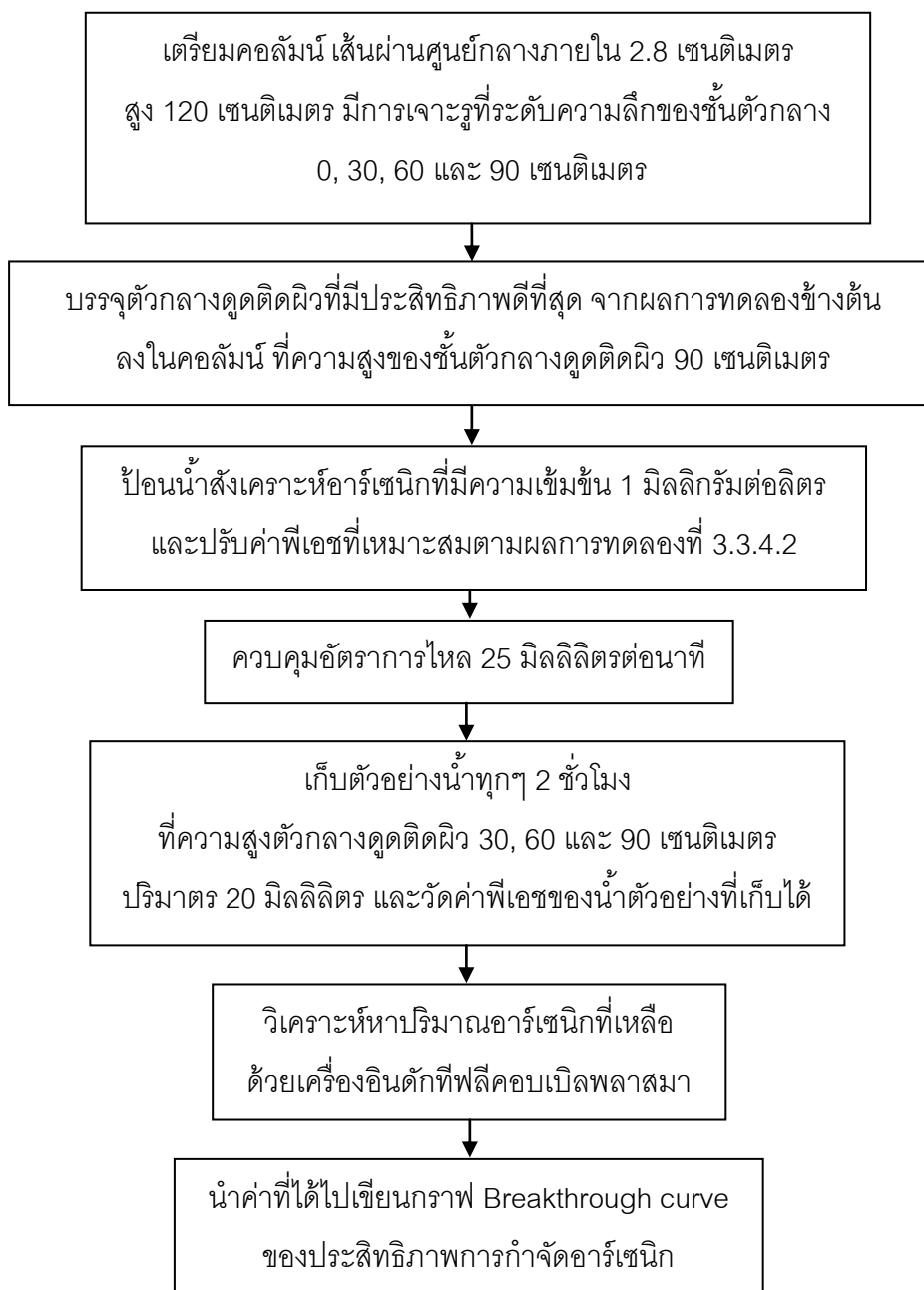
3.3.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวในคอลัมน์จำลอง

1. เตรียมคอลัมน์สำหรับบรรจุตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด คือ ทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์และเคลือบโคโคซาน ที่ทำจากท่ออะคริลิคแบบใส เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร และมีการเจาะรูเพื่อเก็บน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ระดับความลึกของชั้นตัวกลางดูดติดผิว 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.8
2. นำตัวกลางดูดติดผิวที่มีประสิทธิภาพในการดูดติดอาร์เซนิกที่ดีที่สุด จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมข้างต้น บรรจุลงในคอลัมน์ ที่ความสูงของชั้นตัวกลางดูดติดผิว 90 เซนติเมตร
3. เตรียมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมผลจากการทดลองที่ 3.3.4.2
4. ป้อนน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่เตรียมจากข้อ 3. เข้าคอลัมน์ โดยปล่อยให้ไหลจากด้านบนสู่ด้านล่าง (Down flow) อย่างต่อเนื่อง ควบคุมอัตราการไหลที่ 25 มิลลิตรต่อนาที โดยใช้เครื่องสูบน้ำสำหรับป้อนน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกเข้าสู่ถังพักน้ำ และมีทางน้ำล้นสำหรับควบคุมระดับน้ำให้คงที่
5. เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมงของน้ำที่ไหลผ่านระบบ จากทางน้ำออกที่ตำแหน่ง 30, 60 และ 90 เซนติเมตรของความสูงชั้นตัวกลาง แต่จะเก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิตร โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ จนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า และวัดพีเอชของน้ำตัวอย่างทุกตำแหน่งที่เก็บได้
6. นำน้ำตัวอย่างไปตรวจหาปริมาณอาร์เซนิกที่เหลือ ด้วยเครื่องอินดักทีฟลิคอบเบิลพลาสมา
7. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ Breakthrough curve ของประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.6 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.8 การทำงานของคอลัมน์ดูดติดผิว

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1. ถังพักน้ำ, ถังน้ำรีเจนเนอเรนต์ | 4. ถังน้ำอาร์เซนิกสังเคราะห์ |
| 2. คอลัมน์บรรจุตัวกลาง | 5. ประตูน้ำ  |
| 3. ถังน้ำที่ผ่านการดูดติดผิว | 6. เครื่องสูบน้ำ  |



ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก ที่ความสูงต่างๆ

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวในคอแลมน์จำลอง

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> ระดับความลึกของชั้นตัวกลาง	30, 60 และ 90 เซนติเมตร
<u>ตัวแปรควบคุม</u> 1. ขนาดคอแลมน์ 2. ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 3. พีเอช 4. เวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ 5. อัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 6. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่บรรจุในคอแลมน์	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.2 ทุกๆ 2 ชั่วโมง 25 มิลลิตรต่อนาที ที่ความสูงของชั้นตัวกลางดูดติดผิว 90 เซนติเมตร
<u>ตัวแปรตาม</u> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์ 2. ประสิทธิภาพการกำจัด	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิก

3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิว หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ในคอลัมน์จำลอง

1. เมื่อทำการทดลองในขั้นตอนที่ 3.3.6 เสร็จสมบูรณ์ หลังจากนั้นจะทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว ด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.2 นอร์มอล โดยปล่อยให้ไหลจากด้านบนสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที

2. หลังจากนั้นจะล้างสารเคมีด้วยน้ำกลั่น ควบคุมอัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที จนกระทั่งพีเอชของน้ำออกอยู่ระหว่าง 8-8.5 จึงดำเนินการทดลองดูดติดผิวรอบต่อไป

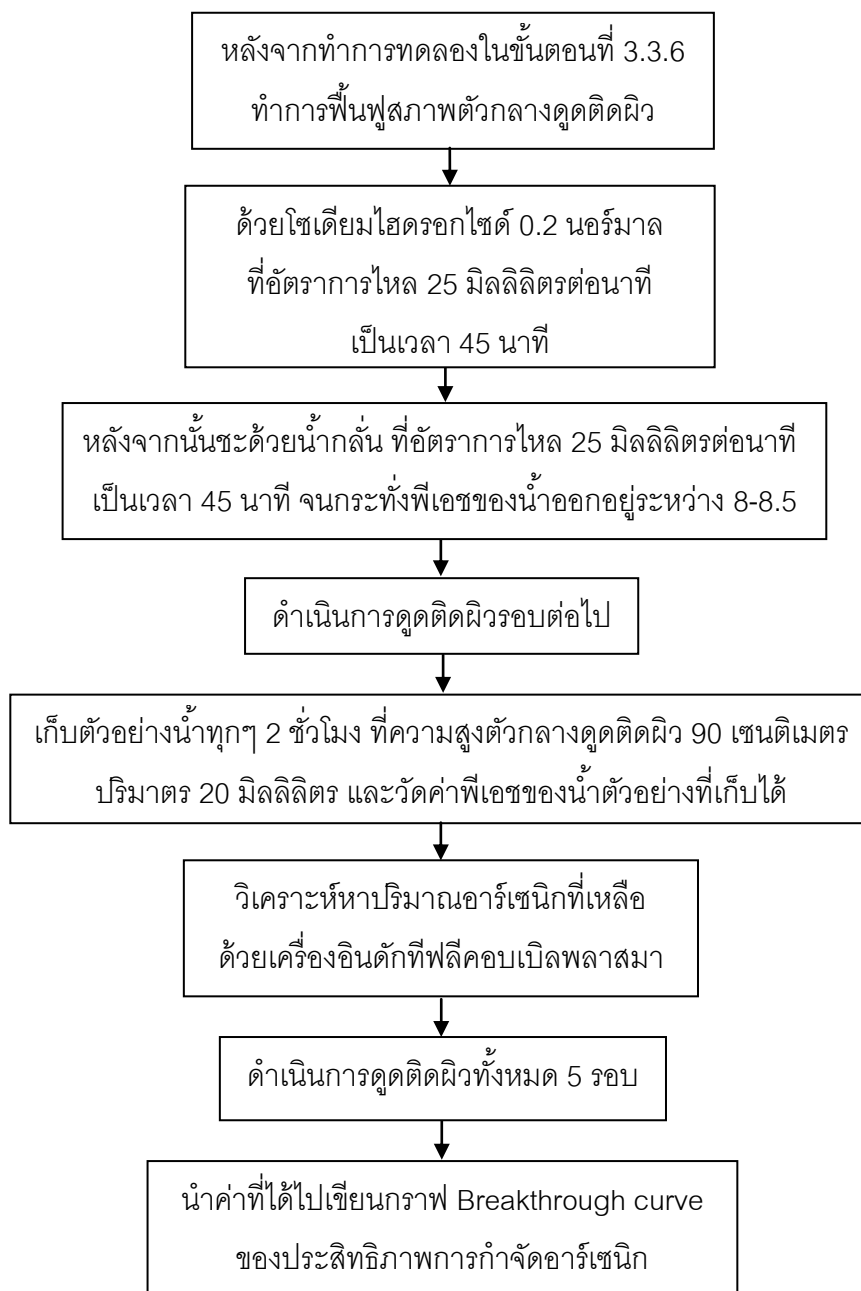
3. ป้อนน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการปรับค่าพีเอชที่เหมาะสมผลจากการทดลองที่ 3.3.4.2 โดยปล่อยให้ไหลจากด้านบนสู่ด้านล่างของคอลัมน์ ควบคุมอัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที

8. เก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมงของน้ำที่ไหลผ่านระบบ จากทางน้ำออกที่ตำแหน่ง 90 เซนติเมตร ของความสูงชั้นตัวกลาง แต่ละครั้งจะเก็บตัวอย่างน้ำ 20 มิลลิลิตร โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ จนกระทั่งความเข้มข้นขาออกเท่ากับความเข้มข้นขาเข้า และวัดพีเอชของน้ำตัวอย่างที่เก็บได้

4. ทำการทดลองซ้ำจากข้อ 1. ถึง ข้อ 4. อีก 4 รอบการทดลอง

5. นำน้ำตัวอย่างไปตรวจหาปริมาณอาร์เซนิกที่เหลือ ด้วยเครื่องอินดักทีฟฟลูออโรมิเตอร์

6. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ Breakthrough curve ของประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกหลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว โดยตัวแปรในการศึกษาดังตารางที่ 3.7 และขั้นตอนการทดลองดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิก
หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิว หลังการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง
ดูดติดผิว ในคอลัมน์จำลอง

ตัวแปร	ขอบเขตการทดลอง
<u>ตัวแปรอิสระ</u> จำนวนรอบการฟื้นฟูสภาพตัวกลางดูดติดผิว	5 รอบ
<u>ตัวแปรควบคุม</u>	
1. ขนาดคอลัมน์	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.8 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร
2. ความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก	1 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. พีเอช	ค่าจากการทดลองที่ 3.3.4.2
4. เวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำ	ทุกๆ 2 ชั่วโมง
5. อัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก	25 มิลลิเมตรต่อนาที่
6. ปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่บรรจุในคอลัมน์	ที่ความสูงของชั้นตัวกลางดูดติดผิว 90 เซนติเมตร
7. ระดับความลึกของชั้นตัวกลาง	90 เซนติเมตร
<u>ตัวแปรตาม</u>	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำที่วิเคราะห์	1. ปริมาณของอาร์เซนิกที่เหลือ 2. พีเอชหลังการทดลอง
2. ประสิทธิภาพการกำจัด	ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิก

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิก ระหว่างทรายเคลือบเหล็ก และทรายเคลือบไคโตซานที่เตรียมจากทรายใช้แล้วของเตาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งอาร์เซนิกที่เลือกศึกษาในที่นี้อยู่ในรูปของอาร์เซนิต As (+5) โดยทำการเตรียมเป็นน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก เพื่อใช้เป็นตัวแทนน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนอาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นของอาร์เซนิก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ 4.1) การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดติดผิว 4.2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกบนตัวกลางดูดติดผิวแต่ละชนิด 4.3) การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดติดอาร์เซนิกของตัวกลางดูดติดผิวแต่ละชนิด 4.4) การศึกษาไอโซเทอมการดูดติดอาร์เซนิกของตัวกลางดูดติดผิวแต่ละชนิด 4.5) การศึกษาดูดติดผิวแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (Adsorption Column) ผลการทดลองมีดังนี้

โดยการศึกษาได้ทำการทดลองดูดติดผิวด้วยตัวกลางดูดติดผิว 4 ชนิด คือ

1. ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (Iron-oxide coated natural sand, IOCNS)
2. ทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน (Chitosan coated natural sand, CCNS)
3. ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (Iron-oxide coated fluidize bed sand, IOCFBS)
4. ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน (Chitosan coated fluidize bed sand, CCFBS)

4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของทางกายภาพและเคมีของตัวกลางติดผิว

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมเป็นตัวกลางติดผิว คือ ทรายธรรมชาติ จากทรายแม่น้ำ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด จากบริษัทไทยโทเรเท็กซ์ไทมิลลส์ จำกัด อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม นำทรายทั้งสองชนิดมาคัดขนาด ด้วยตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 35 (0.5 มิลลิเมตร) และเบอร์ 30 (0.6 มิลลิเมตร) เอาเฉพาะทรายส่วนที่ค้างบนตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 35 เพื่อให้ได้ทรายที่มีขนาดระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 มิลลิเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับขนาดของทรายขนาดกลาง สำหรับการกรองเร็วที่มีขนาดระหว่าง 0.45 ถึง 0.7 มิลลิเมตร (MaCabe, 2005) นำทรายทั้งสองชนิดมาทำความสะอาดด้วยการแช่กรดซัลฟิวริก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำล้างสะอาด สังเกตได้ว่าทรายธรรมชาติก่อนล้างกรดมีสีเหลืองนวล หลังล้างกรดจะเปลี่ยนเป็นสีขาว ส่วนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์ก่อนล้างกรดมีสีน้ำตาลปนแดง หลังล้างกรดจะเปลี่ยนเป็นสีขาวปนแดงเล็กน้อย หลังจากล้างทำความสะอาดทรายทั้งสองชนิดเรียบร้อยแล้ว จึงนำทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมาอบให้แห้งสนิทก่อนเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และโคโตซาน ซึ่งสังเกตได้ว่าทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีสีที่เปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาลแดงอิฐ ส่วนทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังเคลือบด้วยโคโตซาน สังเกตได้ว่าสีก่อนและหลังเคลือบด้วยโคโตซานไม่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 4.1



(ก) ทรายธรรมชาติก่อนทำความสะอาด



(ข) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนทำความสะอาด



(ค) ทรายธรรมชาติหลังทำความสะอาด



(ง) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังทำความสะอาด



(จ) ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์



(ฉ) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์



(ช) ทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน



(ซ) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน

ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของทรายก่อนและหลังเคลือบ

4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางดูดติดผิว ด้วยวิธี BET

จากการศึกษาพื้นที่ผิวของทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์ และเคลือบโคโคซาน ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วย BET ดังตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีพื้นที่ผิวมากกว่าทรายธรรมชาติ เนื่องจากผ่านกระบวนการเผาที่ให้ความร้อนสูงมาก่อน (ที่อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส) จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่า และพบว่าค่าพื้นที่ผิวของทรายแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นหลังจากเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และโคโคซาน โดยค่าพื้นที่ผิวของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์และโคโคซานเพิ่มขึ้นจาก 0.47 เป็น 0.77 และ 0.97 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์และโคโคซานมีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 1.156 เป็น 1.44 และ 1.93 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

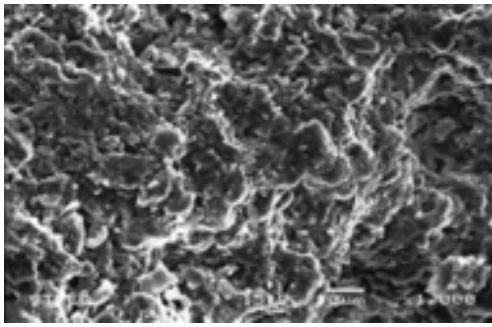
ถ้าทำการเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่ผิวที่ได้กับตัวดูดติดผิวที่เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์มีความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก คือ อยู่ในช่วง 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม (Reynolds, 1996) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบโคโคซานที่เตรียมได้ พบว่าค่าพื้นที่ผิวของทรายที่เตรียมได้มีค่าน้อยกว่าถ่านกัมมันต์มาก อาจเนื่องมาจากขั้นตอนวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน และเป็นวัสดุคนละชนิดกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับทรายเคลือบแมงกานีสทางการค้าที่ค่าพื้นที่ผิวประมาณ 4-5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าทรายเคลือบที่เตรียมได้ แต่ค่าไม่แตกต่างกันเท่ากับถ่านกัมมันต์ อาจเป็นเพราะว่าวัสดุที่ใช้ในการเตรียมเป็นชนิดเดียวกัน นั่นก็คือ ทราย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของตัวกลางดูดติดผิว

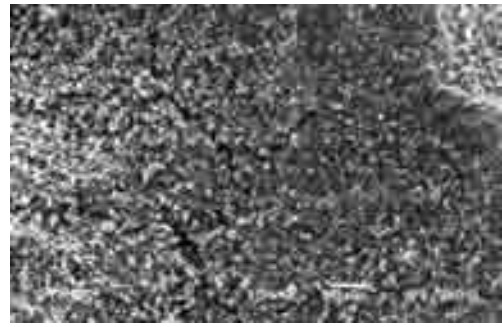
ตัวกลาง	ลักษณะทางกายภาพที่ศึกษา		
	ขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร/ กรัม)	ปริมาตรโพรง (ลูกบาศก์เซนติเมตร/ กรัม)
ทรายธรรมชาติ	65.87	0.47	0.000002
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด	60.45	1.156	0.000362
ทรายธรรมชาติ เคลือบเหล็กออกไซด์	63.68	0.77	0.000032
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์	59.39	1.44	0.000275
ทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน	80.23	0.97	0.0019
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบไคโตซาน	86.46	1.93	0.0042

4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างตัวกลางดูดติดผิว ด้วยเครื่อง SEM

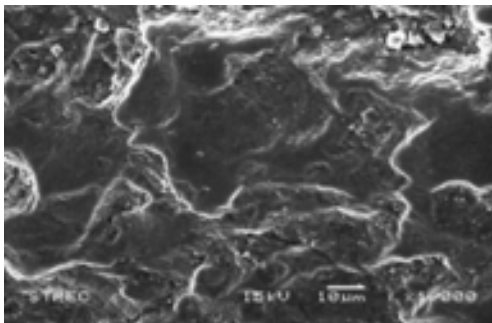
จากการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ก่อนเคลือบ และหลังเคลือบเหล็กออกไซด์และไคโตซาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800LV กำลังขยาย 1000 เท่า ผลการศึกษาสามารถเปรียบเทียบลักษณะทรายก่อนทำความสะอาด และหลังทำความสะอาดด้วยการแช่กรดซัลฟิวริก สังเกตได้ว่าลักษณะพื้นที่ผิวของทรายธรรมชาติหลังล้างกรดมีผิวเรียบกว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังล้างกรด จึงทำให้เหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนผิวทรายธรรมชาติสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอไม่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเหมือนเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์จะส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิกได้ ส่วนลักษณะทรายหลังเคลือบไคโตซานมีลักษณะผิวขรุขระมากขึ้น และมีรูพรุนเพิ่มขึ้น แสดงว่าทรายได้ถูกเคลือบด้วยไคโตซานเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 4.2



(ก) ทราบยธรรมชาติก่อนทำความสะอาด



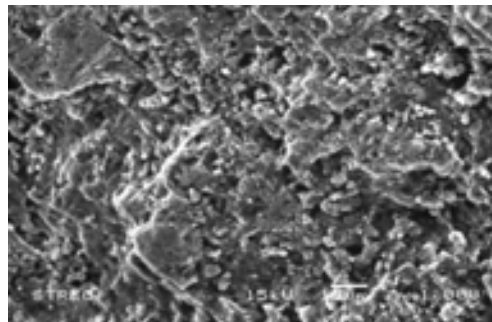
(ข) ทราบยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนทำความสะอาด



(ค) ทราบยธรรมชาติหลังทำความสะอาด



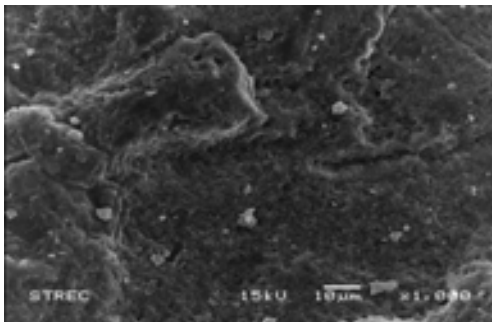
(ง) ทราบยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังทำความสะอาด



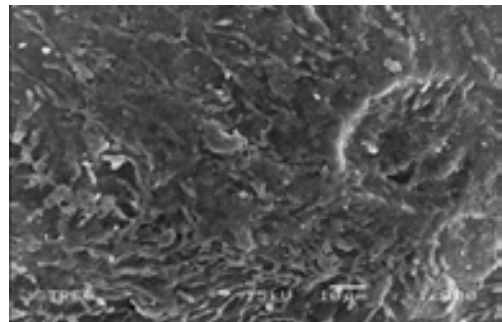
(จ) ทราบยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์



(ฉ) ทราบยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์



(ช) ทราบยธรรมชาติเคลือบไคโตซาน



(ซ) ทราบยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน

ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวของทรายที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางเคมี

4.2.1 การวิเคราะห์ตัวกลางดูดติดผิวด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy

จากการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวดูดติดผิวด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ Oxford รุ่น ISIS-300 ดังตารางที่ 4.2 พบว่าธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของทรายธรรมชาติ และทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดก่อนทำความสะอาดที่สำคัญ คือ ออกซิเจน (O) เมื่อออกซิเจนรวมตัวกับธาตุต่างๆ จะเกิดสารประกอบในรูปออกไซด์ต่างๆ ส่วนธาตุที่เป็นองค์ประกอบรองลงมา คือ ซิลิกอน (Si) คาร์บอน (C) อะลูมิเนียม (Al) แคลเซียม (Ca) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีธาตุเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบเดิมอยู่ร้อยละโดยน้ำหนัก 1.43 และ 10.38 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีธาตุแมกนีเซียม (Mg) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย แต่ไม่พบในทรายธรรมชาติ ซึ่งโดยรวมแล้วจะเห็นได้ว่าทรายทั้งสองชนิดมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบไม่แตกต่างกันมาก หลังจากนำทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมาทำความสะอาด พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียม แคลเซียม และเหล็กลดลง โดยเฉพาะแคลเซียมในทรายธรรมชาติลดลงเป็น 0 เนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบเหล่านี้สามารถถูกกรดแก่ชะออกได้ ส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของออกซิเจน ซิลิกอน และคาร์บอนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อนำทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0.42 เป็น 4.87 และจาก 0.72 เป็น 6.59 ตามลำดับ การที่ร้อยละโดยน้ำหนักของเหล็กที่พบในทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กมากกว่าในทรายธรรมชาติเคลือบเหล็ก นั้นไม่ได้หมายความว่าความสามารถการดูดติดผิวจะดีขึ้น เพราะลักษณะของเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่กระจายตัวเหมือนกับเหล็กออกไซด์ที่เกาะบนทรายธรรมชาติ ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของเหล็กออกไซด์ดังที่กล่าวมาข้างต้นส่งผลโดยตรงให้ความสามารถการดูดติดผิวของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กมีความสามารถน้อยกว่าทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กได้ ดังรูปที่ 4.1 (จ) และ 4.1 (ข) เมื่อนำทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน ซึ่งไคโตซานมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก 52.02) และออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก 47.98) พบว่าทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังเคลือบไคโตซาน มีร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 15.01 เป็น 23.21 และ 15.02 เป็น 21.09 ตามลำดับ และร้อยละโดยน้ำหนักของออกซิเจนเพิ่มขึ้นจาก 46.66 เป็น 48.09 และ 43.18 เป็น 47.55 ตามลำดับ จากการศึกษาของ Wan และคณะ, 2010 ได้ทำการเตรียมทรายเคลือบไคโตซาน พบว่าปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอนและ

ออกซิเจนเท่ากับ 21.64 และ 52.99 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณคาร์บอนและออกซิเจนของทรายเคลือบโคโตซานที่เตรียมได้จากการทดลองนี้มีค่าไม่แตกต่างจากการทดลองของ Wan และคณะ (2010) จึงเป็นการยืนยันได้ว่าโคโตซานสามารถเคลือบบนผิวของทรายได้เรียบร้อยดี นอกจากนี้สังเกตได้ว่าปริมาณของธาตุซิลิกอน พบว่าซิลิกอนลดลงเล็กน้อยหลังจากการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และโคโตซานอาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมจะต้องเตรียมโดยใช้ความร้อน ดังนั้นจึงทำให้บางส่วนของซิลิกอนเกิดการแตกหักของผลึกหรือถูกทำลายออกไปบางส่วนได้

ตารางที่ 4.2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางทรายเคลือบแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS

ตัวกลาง	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
ทรายธรรมชาติ ก่อนทำความสะอาด	C	14.31	22.02
	O	44.41	51.32
	Si	35.54	23.42
	Al	3.41	2.34
	K	0.58	0.27
	Ca	0.04	0.16
	Fe	1.43	0.48
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ก่อนทำความสะอาด	C	12.65	20.87
	O	43.16	53.53
	Si	7.91	5.60
	Al	7.36	5.44
	Mg	5.29	4.31
	Ca	13.25	6.57
	Fe	10.38	3.67
ทรายธรรมชาติ หลังทำความสะอาด	C	15.01	22.59
	O	46.66	52.74
	Si	34.59	22.37
	Al	3.05	2.04
	K	0.29	0.13
	Fe	0.42	0.14

ตารางที่ 4.2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางทรายเคลือบแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

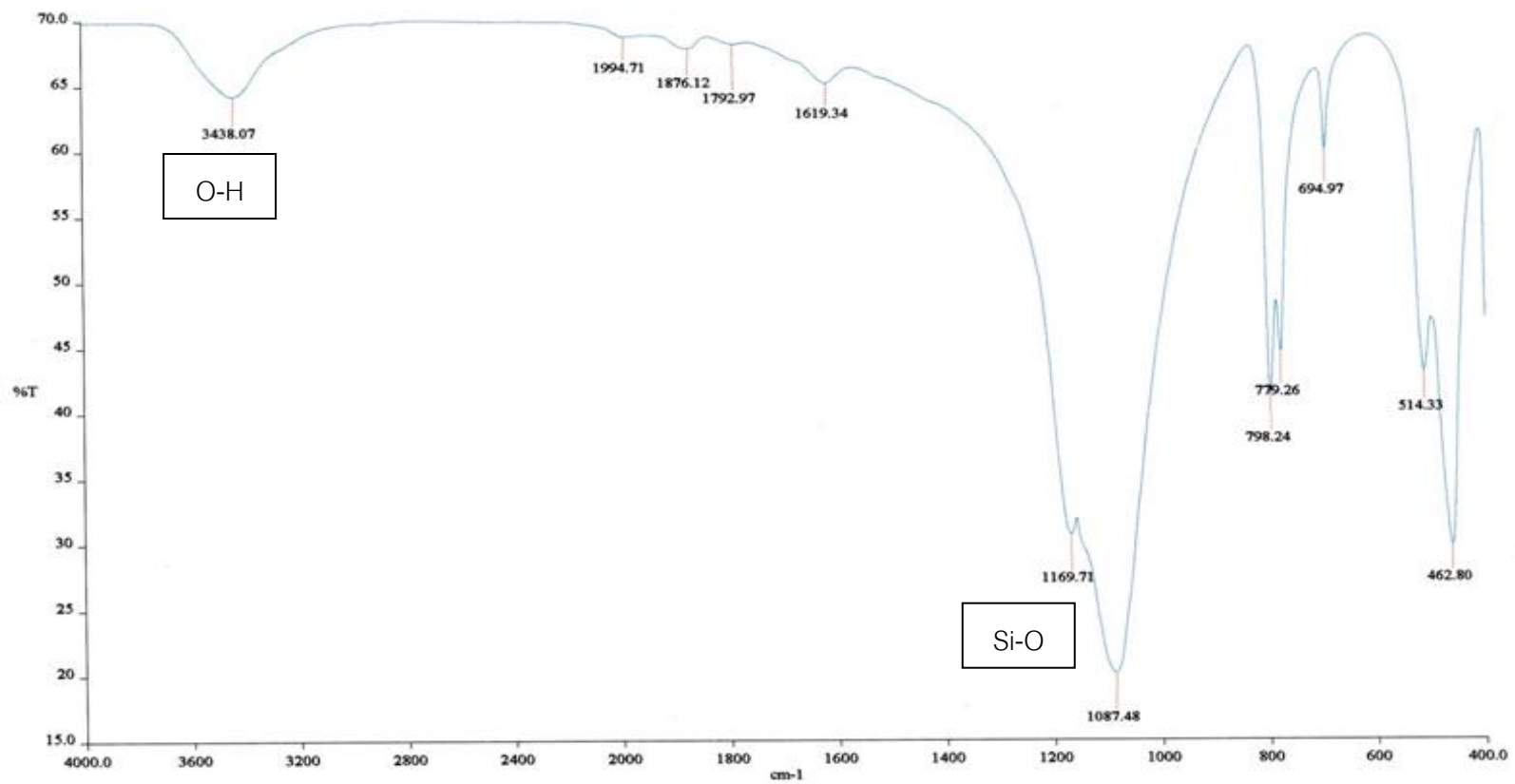
ตัวกลาง	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด หลังทำความสะอาด	C	15.02	23.30
	O	43.18	49.81
	Si	37.56	24.89
	Al	0.58	0.40
	Mg	0.40	0.30
	K	0.35	0.16
	Ca	2.19	1.02
	Fe	0.72	0.24
ทรายธรรมชาติเคลือบ เหล็กออกไซด์	C	16.79	25.56
	O	45.00	51.59
	Si	20.25	13.23
	Al	8.89	6.07
	K	4.21	1.97
	Fe	4.87	1.60
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบเหล็กออกไซด์	C	16.93	26.37
	O	41.98	49.04
	Si	25.27	16.87
	Al	5.12	3.56
	Ca	1.57	0.73
	K	2.54	1.23
	Fe	6.59	2.20
	โคโคซาน	C	52.02
O		47.98	40.93
ทรายธรรมชาติ เคลือบโคโคซาน	C	23.21	32.16
	O	48.09	50.67
	Si	27.01	16.19
	Al	1.43	0.90
	Fe	0.27	0.08

ตารางที่ 4.2 ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของตัวกลางทรายเคลือบแต่ละชนิด ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS (ต่อ)

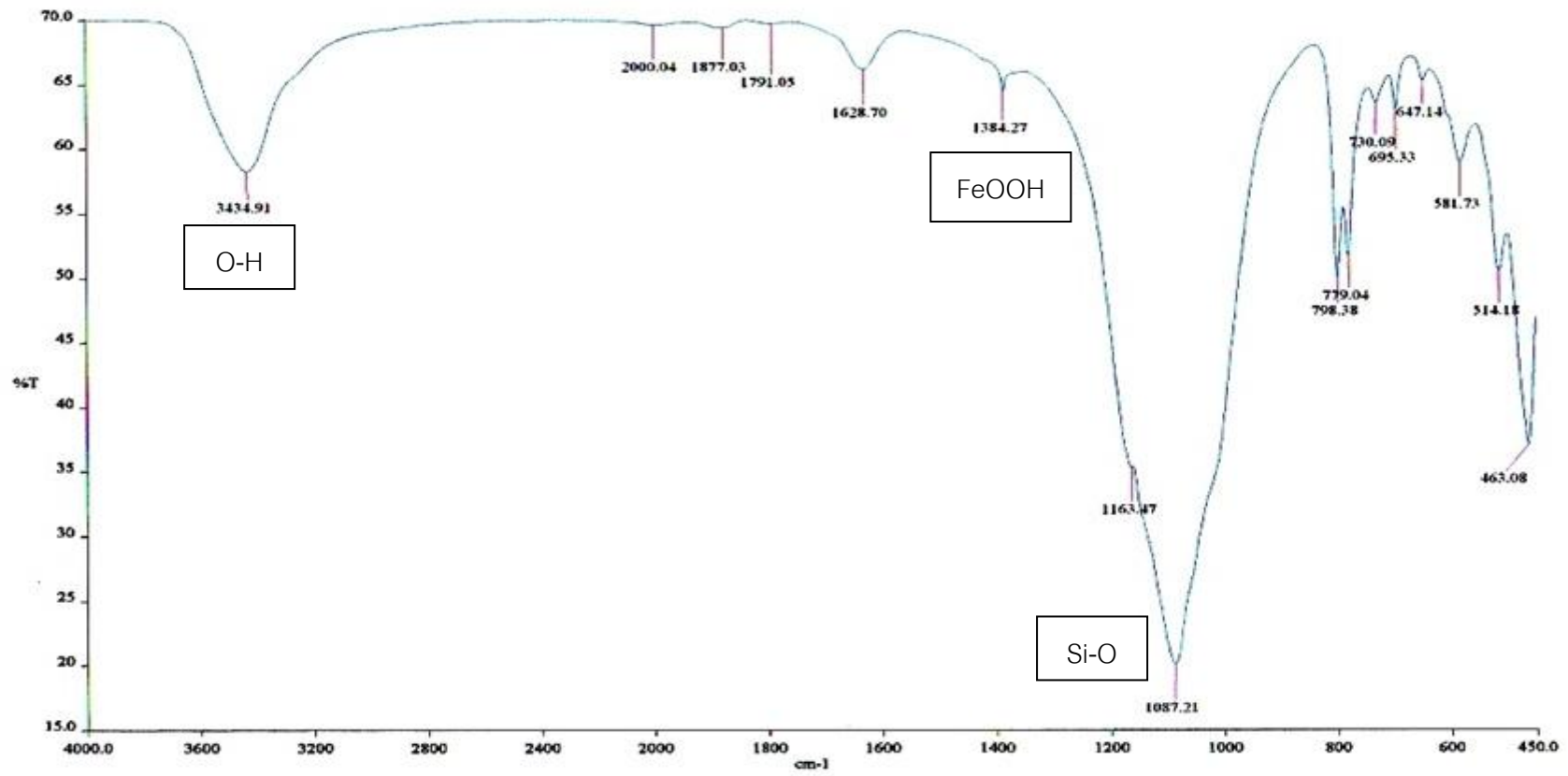
ตัวกลาง	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ร้อยละโดยอะตอม
ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด เคลือบโคโตซาน	C	21.09	30.22
	O	47.55	51.12
	Si	25.88	15.86
	Al	2.39	1.54
	K	1.94	0.86
	Ca	0.46	0.20
	Fe	0.69	0.21

4.2.2 การวิเคราะห์ตัวกลางดูดติดผิว ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared pectrometer

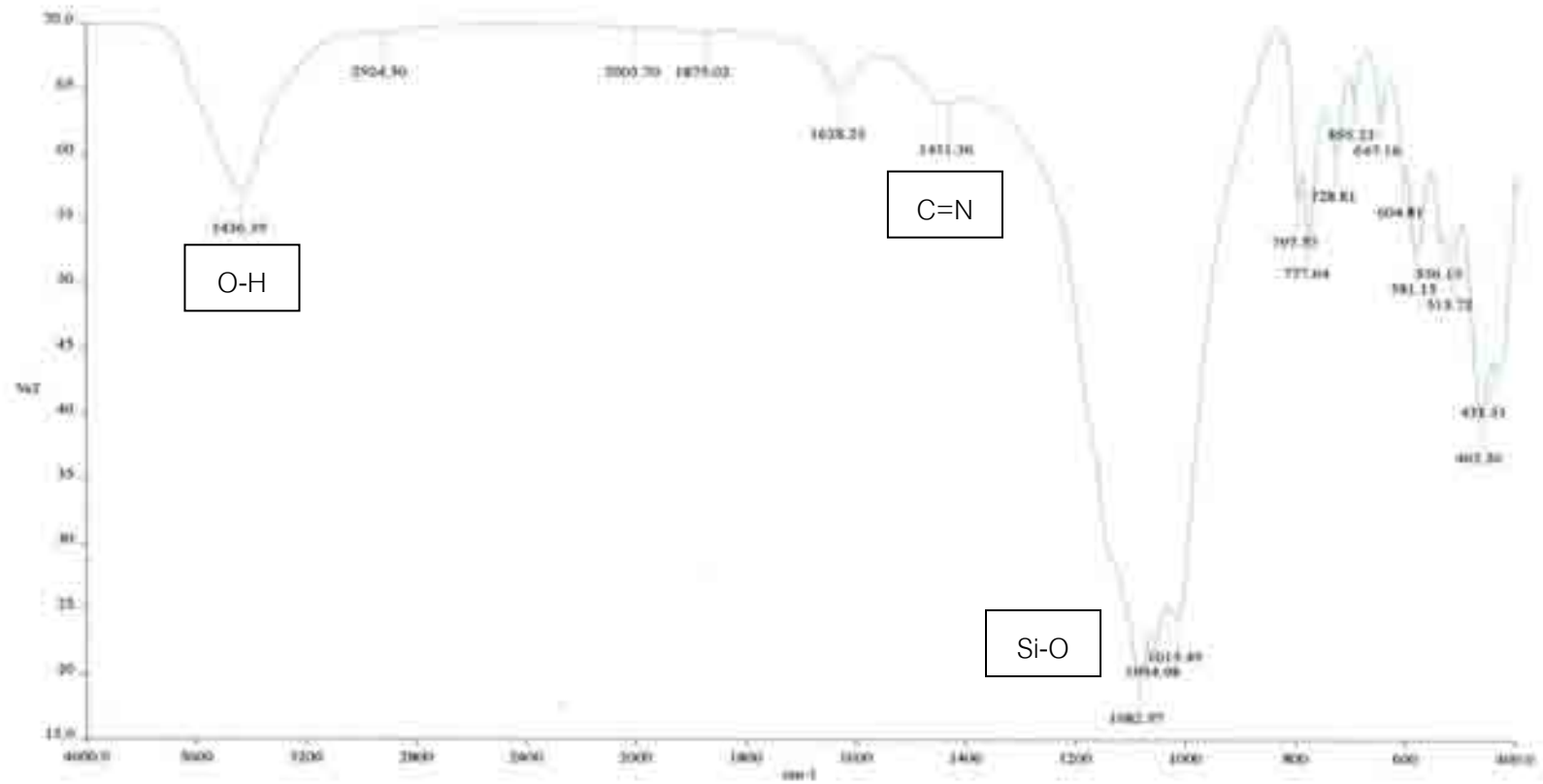
จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของตัวกลางดูดติดผิวด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared pectrometer (FTIR) สามารถวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของทรายทั้งก่อนหลังเคลือบเหล็กออกไซด์และโคโตซาน ได้ดังนี้ ที่ความถี่ที่แสดงลักษณะชิลิกาของทรายธรรมชาติก่อนเคลือบ คือ 1619.34 1087.48 798.24 779.26 694.97 514.33 และ 462.80 cm^{-1} ส่วนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด คือ 1626.78 1086.90 798.20 779.26 695.01 512.32 และ 463.15 cm^{-1} ซึ่งพบว่าทรายธรรมชาติหลังจากเคลือบเหล็กออกไซด์มีแถบความถี่เพิ่มขึ้น คือ 1384.27 cm^{-1} ส่วนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด คือ 1384.93 ซึ่งที่ความถี่ดังกล่าวแสดงลักษณะของ เกอร์ไทต์ (Goethite) ที่มีโครงสร้างเป็น FeOOH เป็นเหล็กที่สะสมบนตัวกลางดูดติดผิว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Boujelben และคณะ, 2008 ที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Infra-red spectroscopy (IR) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดติดผิว พบว่าที่ความถี่ 1382 และ 1382.94 cm^{-1} ถือว่าเป็นเกอร์ไทต์ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการทดลองนี้เป็นการเคลือบเหล็กบนผิวทรายที่อยู่ในรูปเกอร์ไทต์ และส่วนทรายธรรมชาติเคลือบโคโตซานมีแถบความถี่ที่เพิ่มขึ้น คือ 1431.36 cm^{-1} ส่วนทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโตซาน คือ 1447.21 cm^{-1} ซึ่งที่แถบดังกล่าวแสดงลักษณะของหมู่อะมีน (Amine) ที่มีโครงสร้างเป็น $\text{C}=\text{N}$ จึงเป็นการยืนยันได้ว่าทรายธรรมชาติและทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์ได้ถูกเคลือบโคโตซานเรียบร้อยแล้ว



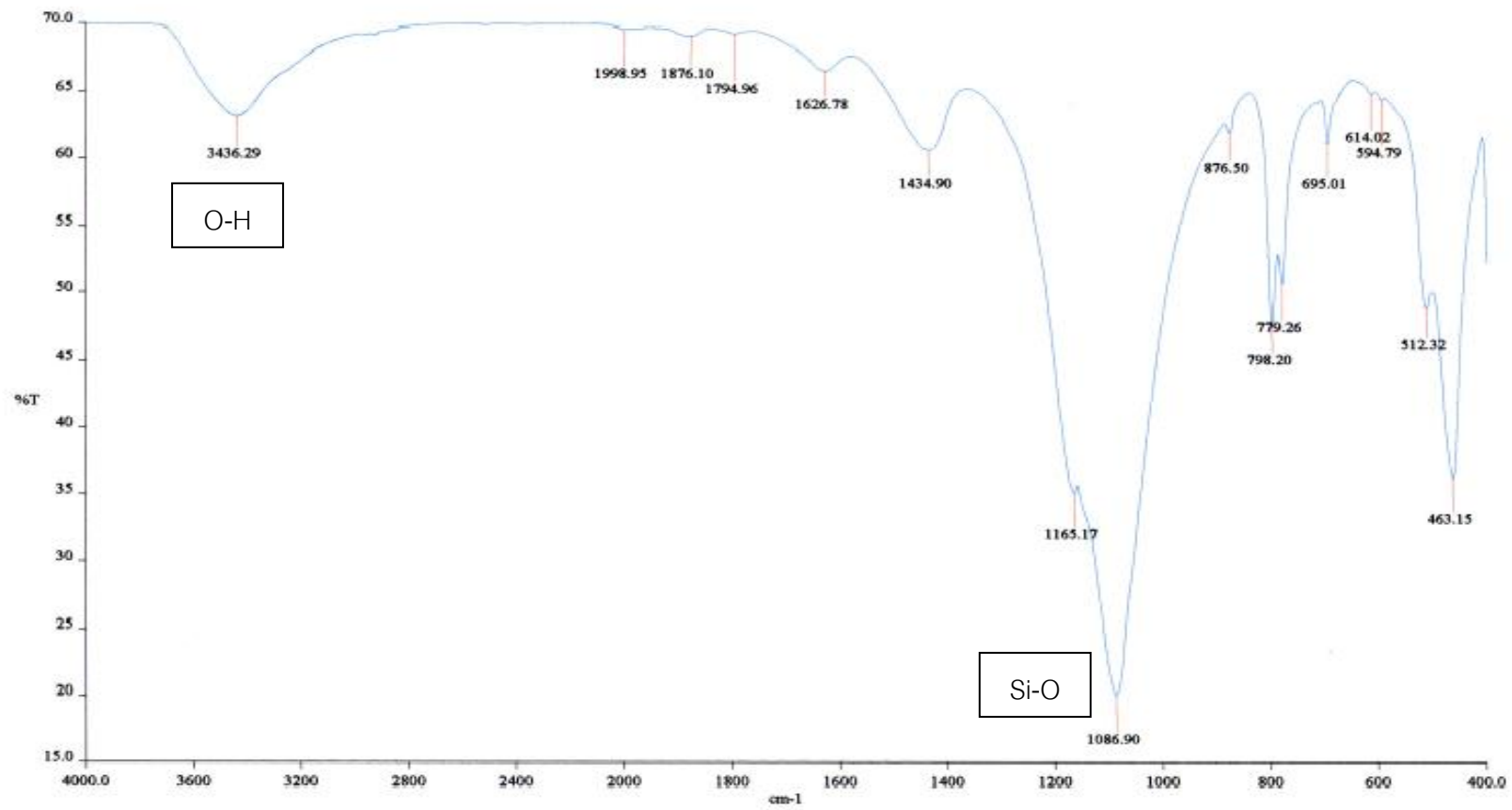
ภาพที่ 4.3 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm⁻¹) ของทรายเป็นธรรมชาติหลังก่อนเคลือบ ด้วย FTIR



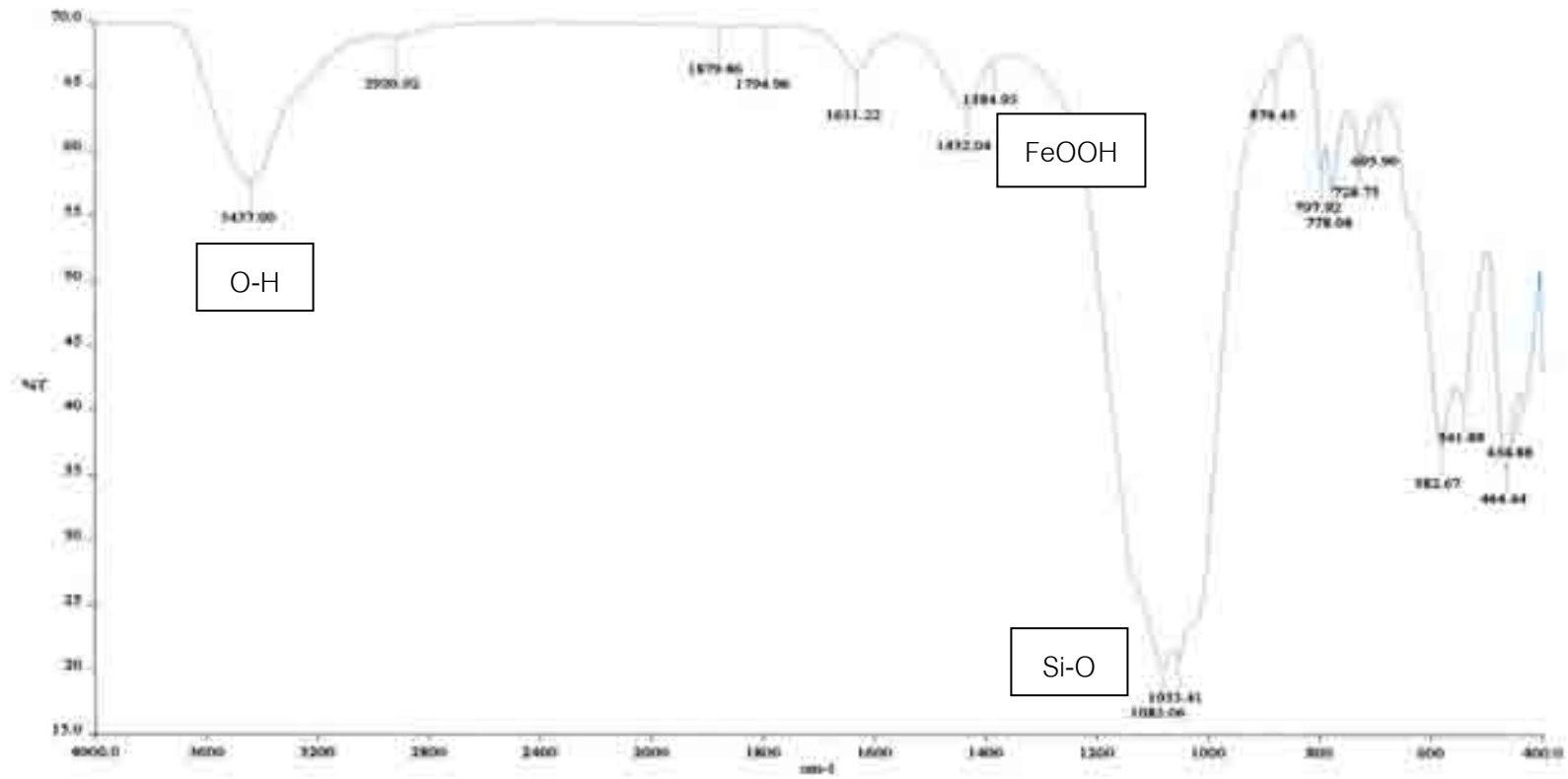
ภาพที่ 4.4 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายเป็นธาตุเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วย FTIR



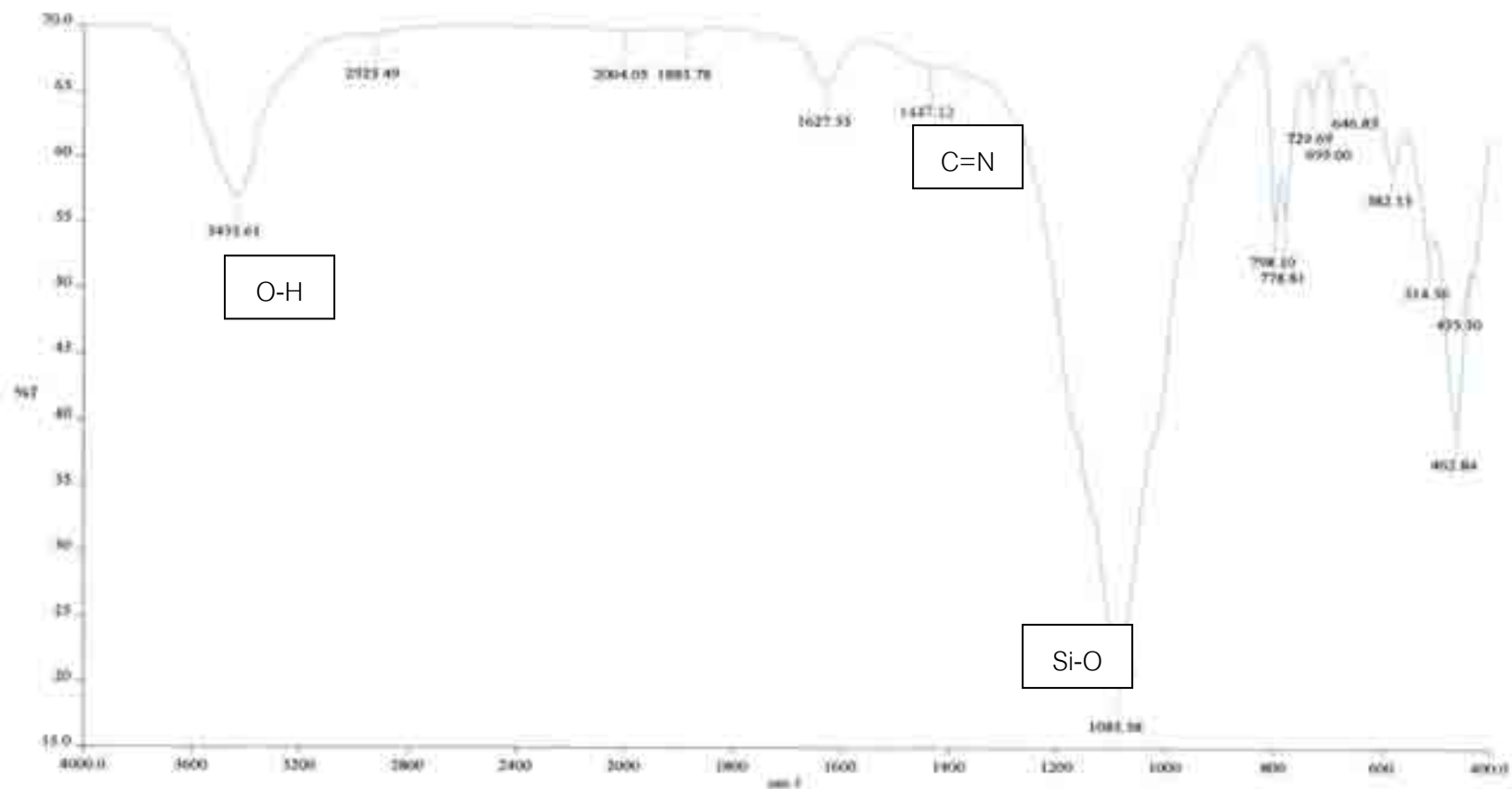
ภาพที่ 4.5 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm⁻¹) ของทนายธรรมชาติเคลีบโคโตซาน ด้วย FTIR



ภาพที่ 4.6 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm⁻¹) ของทรายจากฟลูอิดไดซ์เบดก่อนเคลือบ ด้วย FTIR



ภาพที่ 4.7 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm^{-1}) ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ด้วย FTIR



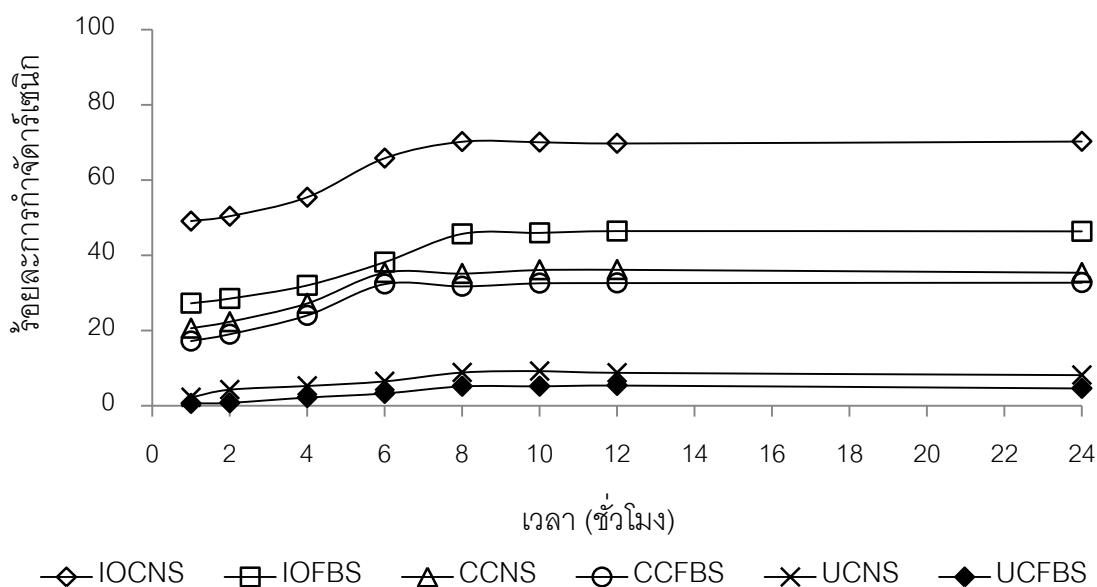
ภาพที่ 4.8 ค่าร้อยละของแสงที่ส่องผ่าน (%T) และช่วงความถี่ (cm⁻¹) ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคไตซาน ด้วย FTIR

4.3 การวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดติดอาร์เซนิก

4.3.1 ผลการศึกษาเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุคที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

จากการทดลองแบบทีละเท (Batch) เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุคที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก โดยเตรียมจากอาร์เซนิกที่อยู่ในรูปของสารประกอบอาร์เซนิต As(+5) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ใช้ปริมาณทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCNS) ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCFBS) ทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน (CCNS) และทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน (CCFBS) แต่ละชนิด 1 กรัมต่อน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็ว 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ระยะเวลายสัมผัสต่างๆ ตั้งแต่ 1-24 ชั่วโมง พบว่าอัตราการการดูดติดอาร์เซนิกด้วย IOCNS และ IOCFBS มีแนวโน้มคล้ายกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลา 1-6 ชั่วโมง อัตราการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟมีความชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เช่นกัน โดยมีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกของ IOCNS เพิ่มขึ้นจาก 48.93 เป็น 65.80 ส่วนค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกของ IOCFBS เพิ่มขึ้นจาก 27.22 เป็น 38.15 ส่วนช่วงเวลา 8-24 ชั่วโมง มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกที่เวลา 8 10 12 และ 24 ชั่วโมง ของ IOCNS เท่ากับ 70.20 70.07 69.73 และ 70.27ตามลำดับ และ IOCFBS เท่ากับ 45.65 45.92 46.39 และ 46.33 ตามลำดับ เห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งสองชนิดมีที่ค่าแตกต่างกันมาก โดยที่ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกน้อยกว่าทราจจากธรรมชาติมาก เนื่องมาจากชนิดของทรายที่ใช้เป็นตัวรองรับสำหรับเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์แตกต่างกัน เพราะทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดผ่านการให้ความร้อนมาก่อน และการที่ทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดหลังถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีค่าปริมาตรโพรงใหญ่กว่าทรายธรรมชาติหลังถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มาก จึงสามารถส่งผลให้ความจำเพาะในการจับกับอาร์เซนิตไอออนน้อยกว่า IOCNS ซึ่งมีปริมาตรโพรงเล็กกว่า และจากผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเหตุผลหนึ่งที่สนับสนุนว่าเหล็กออกไซด์ที่เคลือบบนผิวของทรายธรรมชาติสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่าทราจจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้ผลการกำจัดอาร์เซนิกด้วย IOCNS ดีกว่า IOCFBS มาก ส่วนค่าร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วย CCNS และ CCFBS แบ่งเป็น 2 ช่วง เช่นกัน คือ 1-4 ชั่วโมง มีค่าร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกเพิ่มขึ้นจาก 20.56 เป็น 27.14 และเพิ่มจาก 17.14

เป็น 23.97 ตามลำดับ ส่วนช่วงเวลา 6 8 10 12 และ 24 ชั่วโมง มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ด้วย CCNS เท่ากับ 35.35 35.12 36.09 36.14 และ 35.35 ตามลำดับ และ CCFBS มีค่า 32.33 31.72 32.56 32.61 และ 32.71 ตามลำดับ และเห็นได้ว่าการกำจัดอาร์เซนิกของทรายเคลือบโคโคซานน้อยกว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มาก เนื่องจากทรายเคลือบโคโคซานมีปริมาตรโพรงใหญ่กว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มาก ดังนั้นจึงส่งผลให้ความจำเพาะในการจับกับอาร์เซนเตไอออนลดลงเช่นกัน และการที่ปริมาตรโพรงของทรายเคลือบโคโคซานมีขนาดใหญ่มาก สามารถส่งผลให้อาร์เซนเตไอออนหลุดเข้าออกจากโพรงของทรายเคลือบโคโคซาน ระหว่างทำการทดลองที่มีการเขย่าด้วยความเร็วรอบ 220 รอบต่อนาที ได้ และมีผลการทดลองเพิ่มเติมเมื่อนำทรายธรรมชาติและทรายฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่เคลือบผิว (UCNS และ UCFBS) ที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 8 ชั่วโมง มีค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกเท่ากับ 8.78 และ 5.12 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเป็นการยืนยันได้ว่า ชนิดของทรายที่ใช้เป็นตัวรองรับสำหรับถูกเคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์และโคโคซานมีผลต่อการดูดติดอาร์เซนิก และทรายที่ถูกเคลือบผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกดีกว่าทรายที่ไม่ถูกเคลือบผิว ดังภาพที่ 4.9 และรายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวก ง

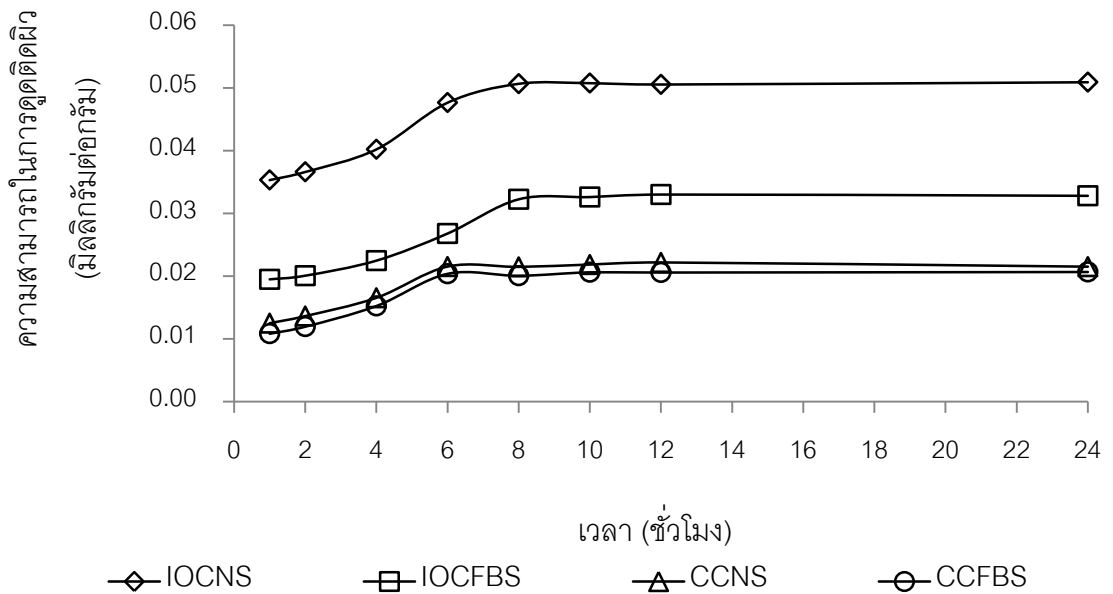


ภาพที่ 4.9 ร้อยละกำจัดอาร์เซนิกในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก ที่ระยะเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุต่างๆ

นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิก ด้วยทรายเคลือบทั้ง 4 ชนิด และเวลาสัมผัส พบว่าที่เวลาสัมผัส 1-6 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิกด้วย IOCNS และ IOCFBS มีค่าเท่ากับ 0.0476 และ 0.0268 มิลลิกรัมของ อาร์เซนิกต่อน้ำหนักของ ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ตามลำดับ ในขณะที่เวลาสัมผัส 8 10 12 และ 24 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิกของ IOCNS มีค่าเท่ากับ 0.0508 0.0507 0.0506 0.0506 มิลลิกรัมของอาร์เซนิกต่อน้ำหนักของ IOCNS ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการดูดติด อาร์เซนิกด้วย IOCFBS ที่เวลาสัมผัส 8 10 12 และ 24 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 0.0322 0.0326 0.0330 0.0328 มิลลิกรัมของอาร์เซนิกต่อน้ำหนักของ IOCFBS ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการดูดติด อาร์เซนิกของ CCNS และ CCFBS มีค่าใกล้เคียงกันมาก คือ ที่เวลาสัมผัส 1-4 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิกมีค่าเท่ากับ 0.0165 และ 0.0152 มิลลิกรัมของอาร์เซนิกต่อ น้ำหนักของทรายเคลือบโคโคซาน ตามลำดับ ส่วนที่เวลาสัมผัส 6 8 10 12 และ 24 ชั่วโมง ความสามารถในการดูดติดผิวของ CCNS มีค่าเท่ากับ 0.0215 0.0215 0.0218 0.0222 และ 0.0215 มิลลิกรัมของอาร์เซนิกต่อ CCNS ตามลำดับ และความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิก ของ CCFBS มีค่าเท่ากับ 0.0204 0.0201 0.0206 0.0206 และ 0.0207 มิลลิกรัมของอาร์เซนิกต่อ CCFBS ตามลำดับ ดังนั้นสังเกตได้ว่าความสามารถในการดูดติดผิวของ IOCNS มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ IOCFBS CCNS CCFBS ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลอง ข้างต้น ดังภาพที่ 4.10 และรายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวกที่ ง-7 ง-8 ง-9 และ ง-10

เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างพีเอชเริ่มต้น และพีเอชสุดท้ายในการดูด ติดผิวอาร์เซนิก ของแต่ละภาวะการทดลอง โดยที่พีเอชของสารละลายอาร์เซนิกเริ่มต้นเท่ากับ 6 พบว่า เมื่อทำการดูดติดผิวอาร์เซนิกด้วย IOCNS และ IOCFBS ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา สัมผัสที่เพิ่มขึ้น ช่วงเวลา 1-8 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 6.9-7.2 และ 7.1-7.3 ตามลำดับ แต่หลังจาก เข้าสู่ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมค่าพีเอชจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการที่พีเอชเพิ่มขึ้นในช่วงแรกเนื่องจากในระหว่างการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีการปล่อยหมู่ ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเหล็กออกไซด์ออกมา ส่วน CCNS และ CCFBS พบว่า พีเอชสุดท้ายมี แนวโน้มเช่นเดียวกับตัวกลาง IOCNS และ IOCFBS ที่ระยะเวลา 1-6 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 6.2-6.5 และ 6.4-6.6 ตามลำดับ และหลังจากเข้าสู่ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมค่าพีเอชจะคงที่ หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการที่พีเอชสุดท้ายเพิ่มขึ้นก็ส่งผลโดยตรงต่อการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทราย เคลือบโคโคซาน เพราะยิ่งพีเอชสูงหมู่อะมีนของโคโคซานไม่สามารถปล่อยโปรตอนได้ จึงทำให้การ กำจัดอาร์เซนิกได้อ่อนลง และพีเอชสุดท้ายของแต่ละตัวกลางดูดติดผิวก็ยังคงมากกว่าพีเอช เริ่มต้น และการทดลองเพิ่มเติมที่ใช้ตัวกลางทรายธรรมชาติและทรายฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่เคลือบผิว

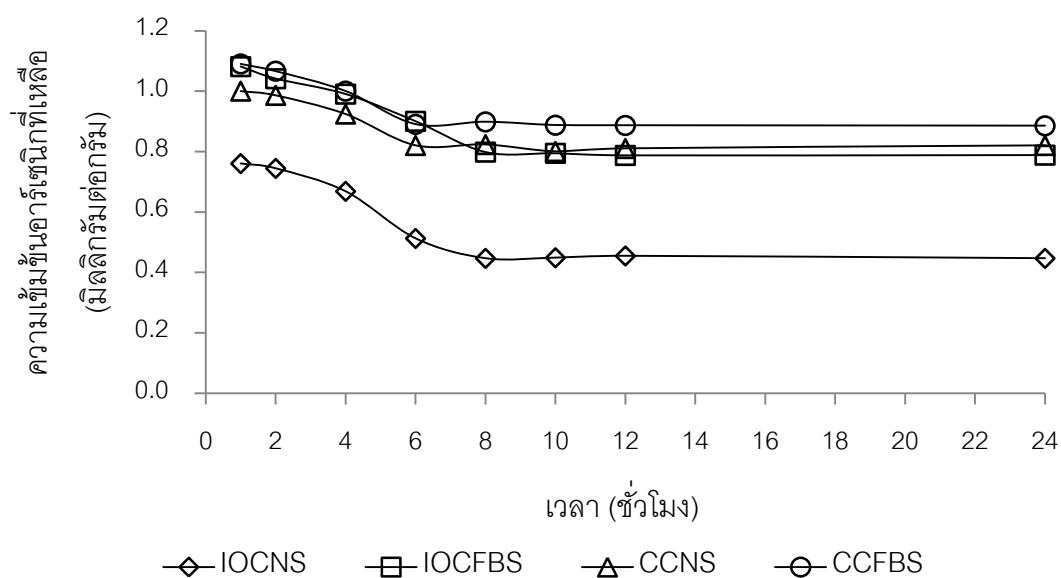
พบว่า พีเอชสุดท้ายของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าสูงกว่าทรายธรรมชาติทุกภาวะการทดลอง ซึ่งเป็นข้อสนับสนุนค่าพีเอชสุดท้ายที่เปลี่ยนไปของชนิดตัวรองรับที่ต่างกัน ดังตารางภาคผนวก



ภาพที่ 4.10 ความสามารถในการดูดติดผิวอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบชนิดต่างๆ
ที่ระยะเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุลการดูดติดผิว

4.3.2 การศึกษาจลนพลศาสตร์ ในการดูดติดอาร์เซนิก

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด ซึ่งทำการทดลองแบบที่ละที โดยการเตรียมอาร์เซนิกในรูปน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้ในการดูดติดผิว 1-24 ชั่วโมง พบว่าการดูดติดผิวของ IOCNS และ IOCFBS เข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมง ส่วนตัวกลางดูดติดผิวชนิด CCNS และ CCFBS เข้าสู่สมดุลภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 จลนพลศาสตร์ในการดูดของตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ

การวิเคราะห์อัตราเร็วในการดูดติดผิวโดยเลือกใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo first-order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo second-order model) อธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดติดผิว สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 และ 4.2

1) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4.1)$$

- เมื่อ k_1 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ชั่วโมง⁻¹)
 q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของตัวดูดติดผิวที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของตัวดูดติดผิวที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดติดผิว (ชั่วโมง)

2) ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.2)$$

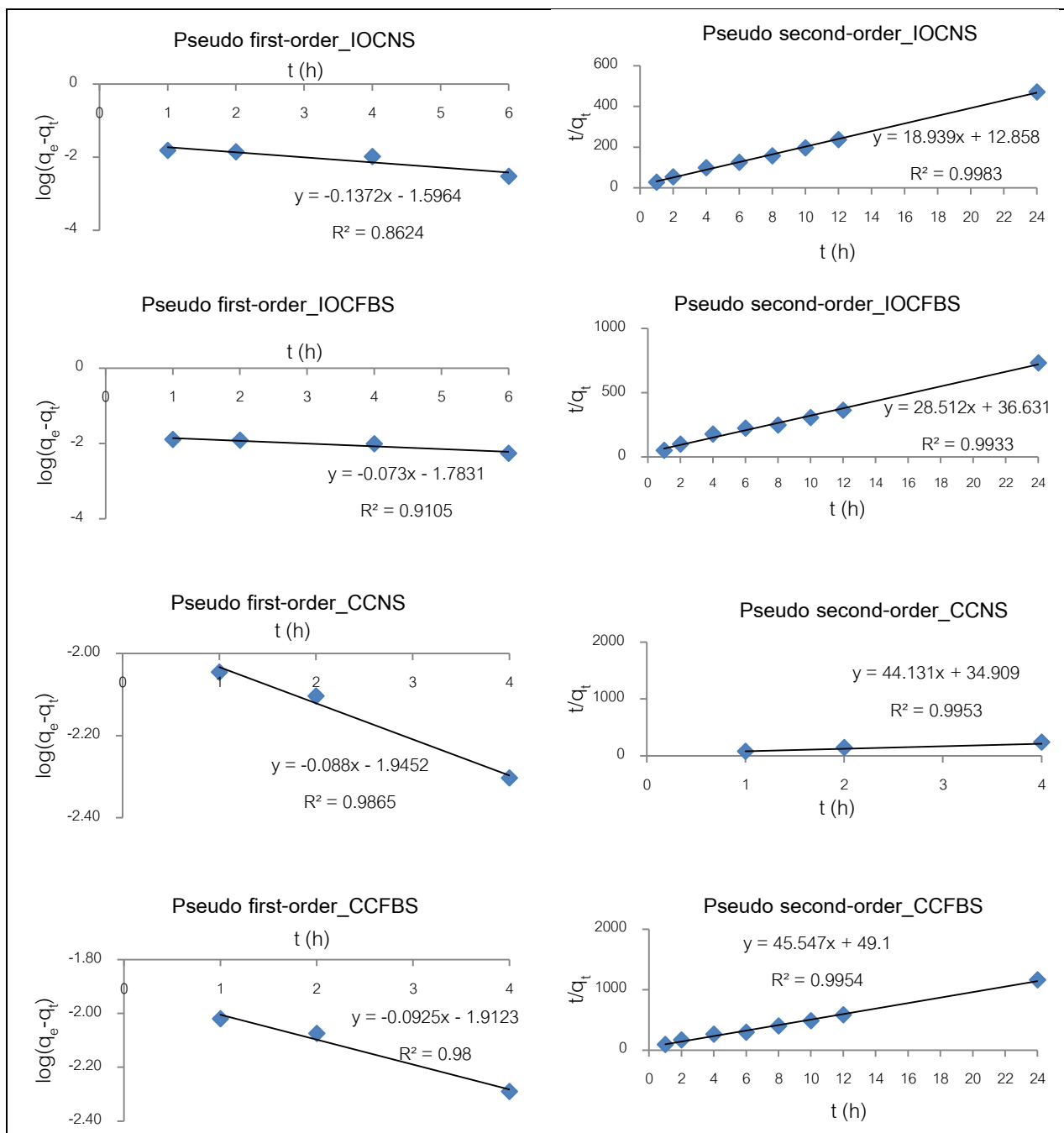
- เมื่อ k_2 = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง)
 q_e = ปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของตัวดูดติดผิวที่ใช้ที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q_t = ปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวต่อปริมาณของตัวดูดติดผิวที่ใช้ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 t = เวลาที่ใช้ในการดูดติดผิว (ชั่วโมง)

ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดติดผิวของอาร์เซนิกโดยตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ ด้วยสมการอันดับหนึ่งเสมือนและสมการอันดับสองเสมือน ดังภาพที่ 4.12 และค่าตัวแปรต่างๆ ทางจลนพลศาสตร์ ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่า R^2 สมการอันดับหนึ่งเสมือน ของ IOCNS

IOCFBS CCNS และ CCFBS เท่ากับ 0.862 0.910 0.986 และ 0.98 ตามลำดับ ส่วนค่า R^2 สมการอันดับสองเสมือน ของ IOCNS IOCFBS CCNS และ CCFBS เท่ากับ 0.998 0.993 0.995 และ 0.995 ตามลำดับ ดังนั้นการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดกลืนดูดติดผิวทุกชนิดที่ศึกษาในที่นี้ มีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสอดคล้องกับสมการอันดับสองเสมือน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้หนึ่งมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันผลการคำนวณค่าความสามารถในการดูดติดผิวของสมการอันดับสองเสมือนมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการอันดับหนึ่งเสมือน ดังนั้นจึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าการดูดติดผิวด้วยตัวกลางทรายเคลือบทั้ง 4 ชนิด เป็นการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) ที่เป็นขั้นกำหนดอัตรา (Rate determining step) การดูดติดผิว (Boddu และคณะ, 2003)

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ

ชนิด ตัวกลาง	q_e (exp) (mg/g)	Pseudo First Order			Pseudo Second Order		
		R^2	k_1 (h^{-1})	q_e (cal) (mg/g)	R^2	k_2 (g/mg-h)	q_e (cal) (mg/g)
IOCNS	0.0508	0.862	0.137	0.025	0.998	27.887	0.053
IOCFBS	0.0322	0.910	0.073	0.016	0.993	22.190	0.035
CCNS	0.0215	0.986	0.088	0.011	0.995	55.801	0.023
CCFBS	0.0204	0.98	0.092	0.012	0.995	42.238	0.022



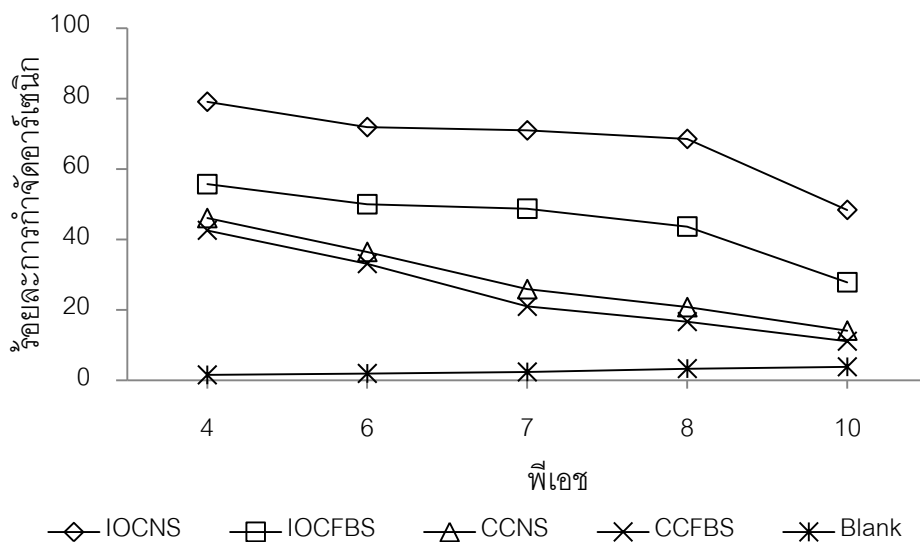
ภาพที่ 4.12 จลนพลศาสตร์การดูดติดคาร์บอนิกด้วยตัวกลางทรายเคลือบ
วิเคราะห์ด้วยสมการอันดับหนึ่งและสมการอันดับสอง

4.3.3 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

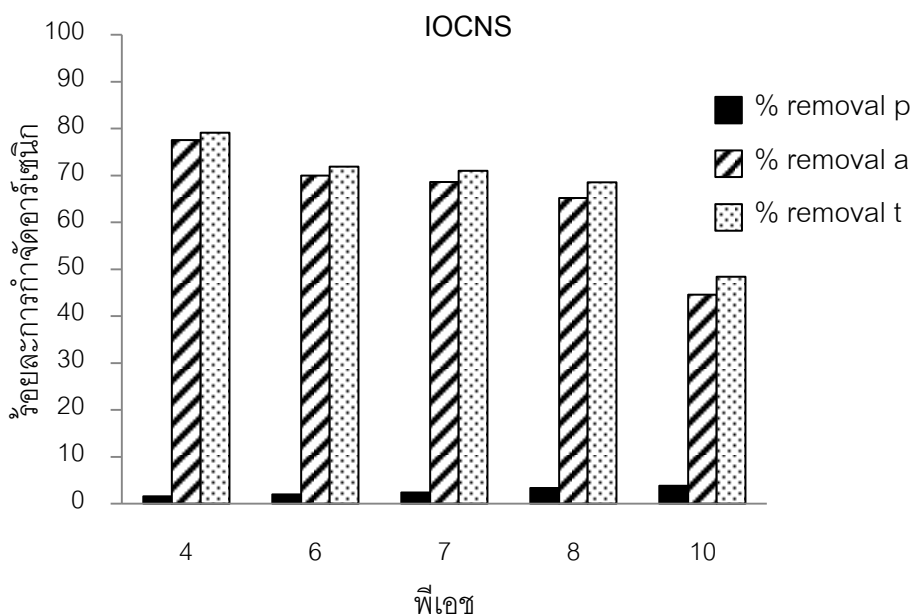
จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ด้วยตัวกลางดูดติดทั้ง 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCNS) ทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCFBS) ทราเยธรรมชาติเคลือบโคโคซาน (CCNS) ทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคซาน (CCFBS) โดยทำการทดลองแบบทีละเท เปรียบความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชด้วยสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 นอร์มอล ให้มีพีเอชเริ่มต้นที่ 4 6 7 8 และ 10 เติมตัวกลางดูดติดผิวแต่ละชนิดปริมาณ 1 กรัมต่อน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 50 มิลลิตร หลังจากนั้นนำมาเขย่าที่อัตราความเร็ว 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนระบบเข้าสู่ระยะเวลาสัมผัสที่สมดุลเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับตัวกลางดูดติดที่เป็น IOCNS และ IOCFBS ส่วนตัวกลางดูดติดที่เป็น CCNS และ CCFBS ระยะเวลาสัมผัสที่สมดุลเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ระยะเวลาสัมผัสที่สมดุลเป็นผลการทดลองที่ได้จากข้อ 4.3.1 จากการทดลองสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอช ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก และในตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด ที่พีเอชของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกเท่ากับ 4 ให้ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกดีที่สุด โดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวม (% removal) ซึ่งมีค่าเท่ากับการตกตะกอน (% removal) รวมกับการดูดติดผิว (% removal) เมื่อตัวกลางดูดติดเป็น IOCNS เท่ากับ 79.10 (1.54 + 77.56) IOCFBS เท่ากับ 55.69 (1.54 + 54.15) CCNS เท่ากับ 46.07 (1.54 + 45.53) และ CCFBS เท่ากับ 42.59 (1.54 + 41.04) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการกำจัดอาร์เซนิกส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการดูดติดผิวมากกว่ากระบวนการตกตะกอน ซึ่งร้อยละการตกตะกอนอยู่ในช่วง 1.54 ถึง 3.85 เท่านั้น ดังภาพที่ 4.13 4.14 4.15 4.16 และ 4.17 รายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวกที่ ๖

นอกจากนี้สามารถสังเกตได้ว่าช่วงพีเอช 4 ถึง 7 ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวมลดลงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วย IOCNS ที่พีเอช 4 6 และ 7 มีค่าเท่ากับ 70.10 71.91 และ 70.98 ตามลำดับ ส่วน IOCFBS เท่ากับ 55.69 50.00 และ 48.73 ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 8 และ 10 ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่พีเอช 10 ค่าลดต่ำลงอย่างชัดเจน โดยร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกด้วย IOCNS ที่พีเอช 8 และ 10 เท่ากับ 68.55 และ 48.39 ตามลำดับ ส่วน IOCFBS เท่ากับ 43.67 และ 27.85 ตามลำดับ ส่วนตัวกลางดูดติดผิวที่เป็น CCNS และ CCFBS สังเกตได้ว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวมจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก ด้วย CCNS ที่พีเอช 4 6 7 8 และ 10 เท่ากับ 46.07 36.47 25.88 20.78 และ 14.12

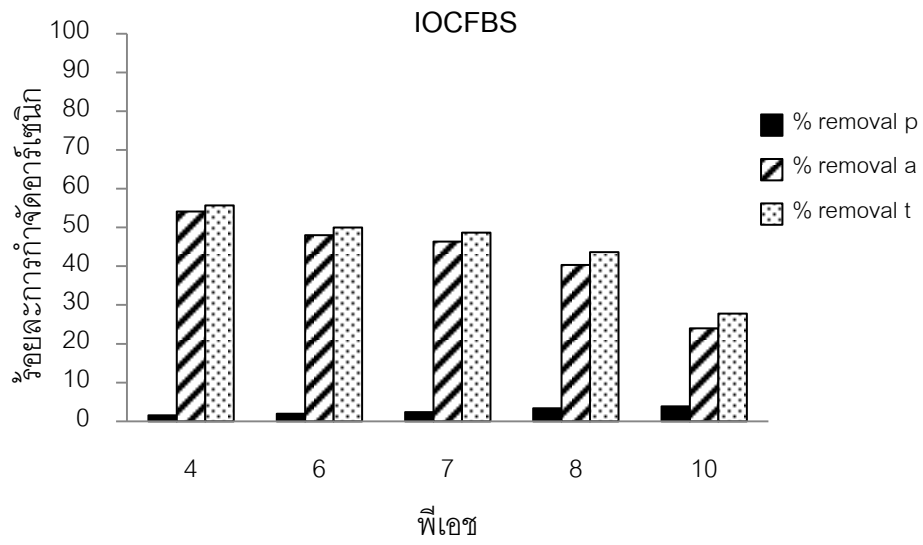
ตามลำดับ ส่วน CCFBS ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกเท่ากับ 42.59 33.13 20.99 16.67 และ 11.11 ตามลำดับ



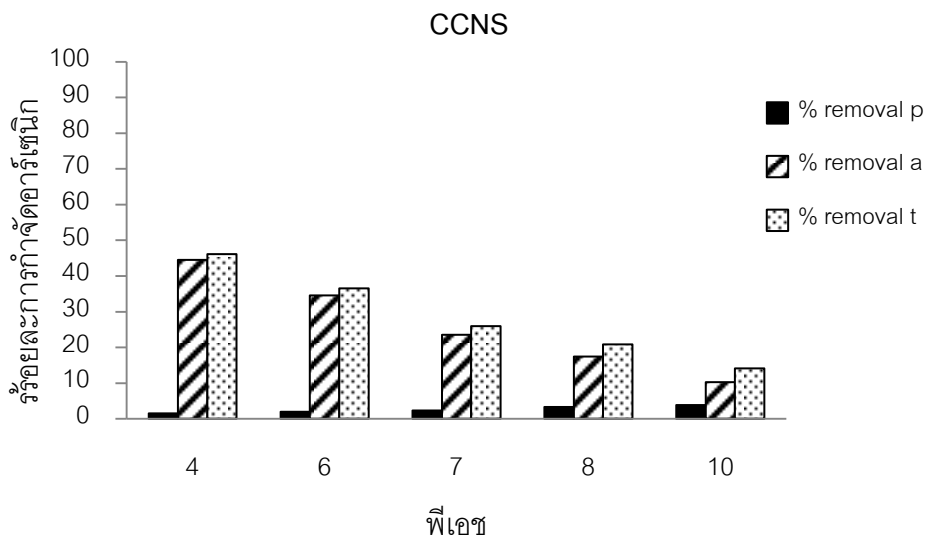
ภาพที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวมด้วยตัวกลางทรายเคลือบชนิดต่างๆ และแบบลงค์ที่พีเอชต่างๆ



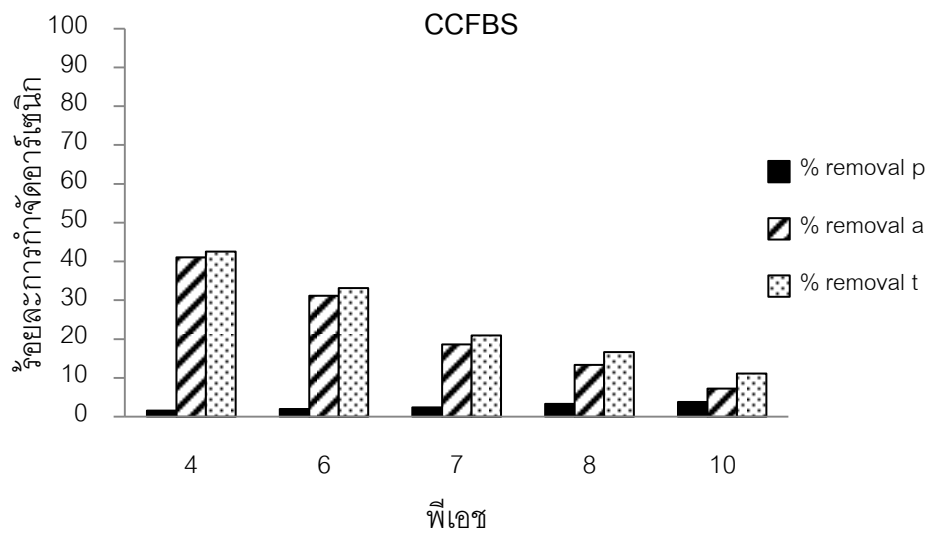
ภาพที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่พีเอชต่าง



ภาพที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน ที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 4.17 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน ที่พื้ต่างๆ

หมายเหตุ

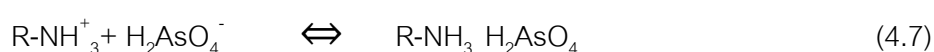
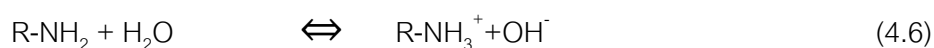
- % removal_p = ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอน
- % removal_a = ร้อยละการกำจัดโดยการดูดติดผิว
- % removal_t = ร้อยละการกำจัดโดยการตกตะกอนรวมกับการดูดติดผิว

อาร์เซนิต As (+5) เมื่ออยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูปของแอนไอออนแบบ โพลีอะตอมมิก ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ หรือเรียกว่า ออกซีแอนไอออน (Oxanion) โดยประจุรวมที่เกิดขึ้น (Net valence) ของอาร์เซนิต ขึ้นกับพีเอชของสารละลาย จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอช 4 ให้ค่าร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกดีที่สุดในที่สุด ซึ่งผลพีเอชสอดคล้องกับ Diamadopoulos และคณะ. (1993) ที่ได้ทำการศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสมมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำ พบว่าที่พีเอช 4 เป็นพีเอชให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวดีที่สุด แสดงว่าอาร์เซนิตไอออนที่พบมากที่สุดในการทดลองนี้อยู่ในรูป $H_2AsO_4^-$ สามารถอธิบายดังภาพที่ 4.18 โดยกลไกการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ สามารถอธิบายด้วยสมการที่ 4.3 4.4 และ 4.5 ดังต่อไปนี้

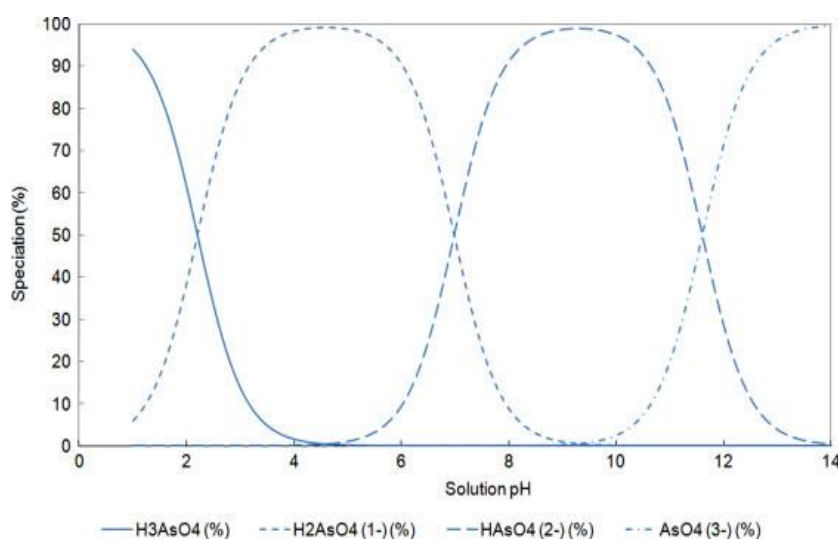


กลไกการดูดติดอาร์เซนิกบน IOCS และ IOCFBS เกิดโดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งเป็นลิแกนด์ของเหล็กไฮดรอกไซด์ (Iron hydroxide) กับอาร์เซนิตไอออน ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดติดอาร์เซนิตไอออนจะมีการปล่อยหมู่ไฮดรอกซิล โดยจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล สะสมที่ถูกปล่อยออกมาจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนอาร์เซนิกที่ถูกดูดติด และจำนวนของ เฟอริไฮไดรต์ (Ferrihydrite) บนผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นส่วนหนึ่งกับการกำจัดอาร์เซนิก (Jain และคณะ, 1991)

ส่วนกลไกการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายเคลือบไคโตซาน ซึ่งไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ของอะซีทิลกลูโคซามีน (Acetylglucosamine) ที่เกิดจากการกำจัดหมู่อะซีทิลของไคติน (Gerente และคณะ, 2007) ภายใต้สภาวะเป็นกรด ไคซานจะมีหมู่อะมีน (Amine) อิสระ ที่สามารถปล่อยโปรตอนได้ ดังนั้นการที่อาร์เซนิตไอออนจับกับไคโตซานเกิดได้โดยการให้โปรตอนของหมู่อะมีนอิสระ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 4.6 และกลไกการดูดติดผิวอาร์เซนิตไอออนด้วยการให้โปรตอนของหมู่อะมีนบนไคโตซาน สามารถอธิบายด้วยสมการที่ 4.7 คือ (Wang และคณะ, 2006)



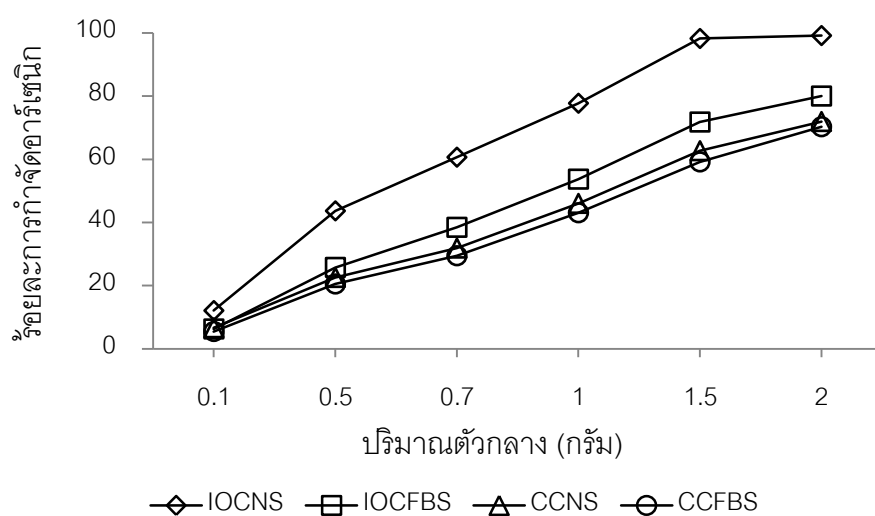
จากการทดลองผลของพีเอช เมื่อพีเอชของสารละลายอาร์เซนิกเริ่มต้น 4-10 พบว่า พีเอชสุดท้ายของการดูดติดอาร์เซนิกด้วย IOCNS มีค่าพีเอชประมาณ 6.4-8.4 และ IOCFBS มีค่าพีเอชประมาณ 6.5-8.5 ซึ่งจะเห็นว่าพีเอชสุดท้ายของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปล่อยหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิวของเหล็กออกไซด์ออกมา ดังสมการที่ 4.4-4.6 และมิงงานวิจัยของ Hse และคณะ, 2008 ได้ทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชในการกำจัดอาร์เซนิก ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยพีเอชเริ่มต้น 5-8 พบว่า พีเอชสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 6.0-7.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพีเอชสุดท้ายของการทดลองนี้ที่ใช้ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการกำจัดอาร์เซนิกเช่นเดียวกัน ส่วนตัวกลางที่เป็น CCNS และ CCFBS มีค่าพีเอชสุดท้ายประมาณ 5.3-8.4 และ 5.5-8.0 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นเห็นได้ว่า ยิ่งพีเอชของสารละลายอาร์เซนิกเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกลดลง ดังนั้นการที่พีเอชสุดท้ายยิ่งมากขึ้นก็สามารถส่งผลให้ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกลดลงเช่นกัน ดังตารางภาคผนวก จ



ภาพที่ 4.18 สปีชีส์ของอาร์เซนเตไออนที่พบมากที่สุด ในช่วงพีเอชต่างๆ (Kwok และ McKay, 2010)

4.3.4 ผลการศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิก

การศึกษ ปริมาณของตัวกลางดูดติด 4 ชนิด คือ ทราเยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCNS) ทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCFBS) ทราเยธรรมชาติเคลือบโคโคซาน (CCNS) ทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน (CCFBS) โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้ตัวกลางดูดติดแต่ละชนิดปริมาณ 0.2 0.5 0.7 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ที่เตรียมความเข้มข้นน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำมาเขย่าที่อัตราความเร็ว 220 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จนระบบเข้าสู่ระยะเวลาคงตัวที่สมดุลเป็นเวลา 8 ชั่วโมง สำหรับตัวกลางที่เป็น IOCNS และ IOCFBS ส่วนตัวกลางที่เป็น CCNS และ CCFBS ระยะเวลาคงตัวที่สมดุลเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และทำการปรับพีเอชของน้ำสังเคราะห์ อาร์เซนิกเท่ากับ 4 ทุกสภาวะการทดลอง (ค่าพีเอชที่เหมาะสมได้จากการทดลองที่ 4.3.3) ผลการทดลองหาปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสม พบว่า เมื่อปริมาณตัวกลางทราเยเคลือบแต่ละชนิดเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกจะสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวกลางดูดติดผิวเป็นการเพิ่มบริเวณที่มีความจำเพาะต่อการดูดติดผิวมากขึ้น โดยเมื่อปริมาณของ IOCNS และ IOCFBS เพิ่มจาก 1 กรัม เป็น 2 กรัม ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกเพิ่มจาก 77.71 เป็น 99.14 และเพิ่มจาก 53.69 เป็น 80.00 ตามลำดับ ส่วน CCNS และ CCFBS ค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกเพิ่มจาก 46.00 เป็น 71.93 และเพิ่มจาก 43.05 เป็น 70.28 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.19 และรายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวกที่ ฉ-1



ภาพที่ 4.19 ร้อยละการกำจัดอาร์เซนิก ที่ปริมาณตัวกลางดูดติดต่างๆ

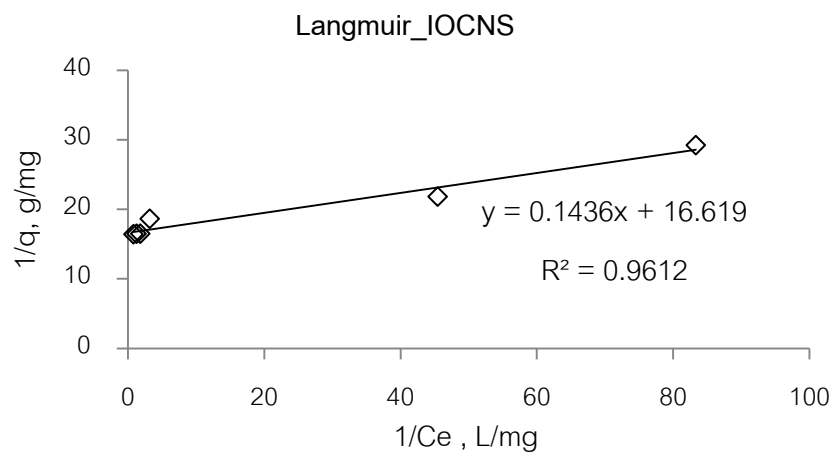
4.4 การวิเคราะห์หาไอโซเทอมที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวอาร์เซนิกของทรายเคลือบชนิดต่างๆ

การศึกษาไอโซเทอมที่เหมาะสมต่อการดูดติดอาร์เซนิกของตัวกลางดูดติด 4 ชนิด คือ ทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCNS) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCFBS) ทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน (CCNS) ทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน (CCFBS) ซึ่งผลการทดลองศึกษาปริมาณตัวกลางดูดติดที่เหมาะสมจากข้อที่ 4.3.4 สามารถนำมาอธิบายด้วยสมการการดูดติดผิวทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ไอโซเทอม 2 แบบ คือ ไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิช และไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งสามารถแสดงสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ได้ดังนี้

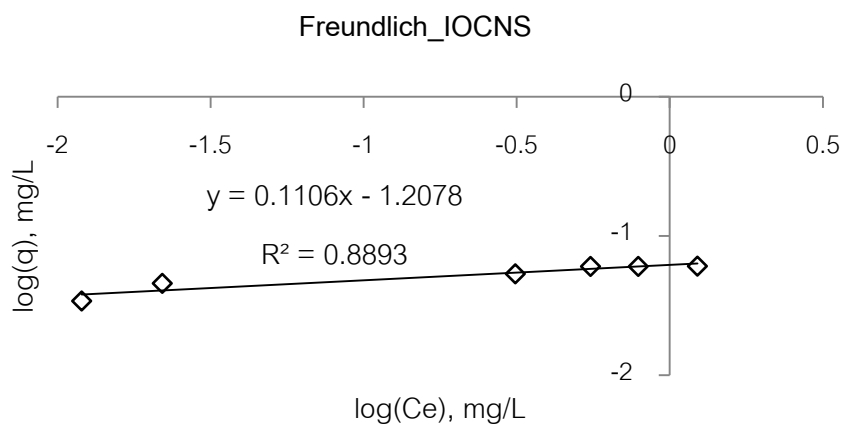
ตัวกลาง IOCNS คือ $(1/q) = 16.61 + 0.143 (1/Ce)$ ตัวกลาง IOCFBS คือ $(1/q) = 21.43 + 3.528 (1/Ce)$ ตัวกลาง CCNS คือ $(1/q) = 26.42 + 4.690 (1/Ce)$ ส่วนตัวกลาง CCFBS คือ $(1/q) = 30.83 + 3.968 (1/Ce)$ และสมการไอโซเทอมแบบฟรุนด์ลิชได้ดังนี้

ตัวกลาง IOCNS คือ $\log(q) = 0.110 \log(Ce) - 1.207$ ตัวกลาง IOCFBS คือ $\log(q) = 0.202 \log(Ce) - 1.401$ ตัวกลาง CCNS คือ $\log(q) = 0.182 \log(Ce) - 1.497$ ส่วนตัวกลาง CCFBS คือ $\log(q) = 0.139 \log(Ce) - 1.544$ โดยผลการวิเคราะห์ ค่า R^2 ของไอโซเทอมดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนด์ลิช ของตัวกลางดูดติดเป็น IOCNS มีค่า 0.961 และ 0.889 ตามลำดับ ของตัวกลาง IOCFBS มีค่า 0.911 และ 0.795 ตามลำดับ ของตัวกลาง CCNS มีค่า 0.864 และ 0.767 ตามลำดับ และตัวกลาง CCFBS มีค่า 0.830 และ 0.719 ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.20 4.21 4.22 4.23 4.24 4.25 4.26 และ 4.27

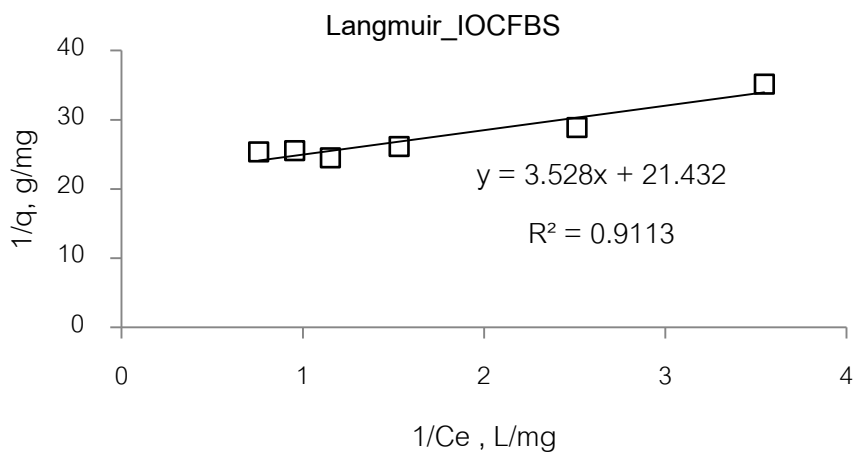
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่า สมการแบบแลงเมียร์ มีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายเคลือบทั้ง 4 ชนิด เนื่องจากค่า R^2 ของแลงเมียร์มีค่ามากกว่า R^2 ของฟรุนด์ลิช ดังนั้นการดูดติดอาร์เซนิกด้วย IOCNS IOCFBS CCNS และ CCFBS เป็นการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิวแบบชั้นเดียว เนื่องจากเป็นการดูดติดผิวทางเคมี โดยที่อาร์เซนิกจะสร้างพันธะทางเคมีกับตัวกลางดูดติดผิว และพบว่าความสามารถในการกำจัดอาร์เซนิกโดยตัวกลางดูดติดของ IOCNS IOCFBS CCNS และ CCFBS มากที่สุด ที่ปริมาณตัวกลางดูดติด 0.1 กรัม มีค่าเท่ากับ 0.0608 0.0395 0.0326 และ 0.0291 ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวก ฉ-2 ฉ-3 ฉ-4 และ ฉ-5



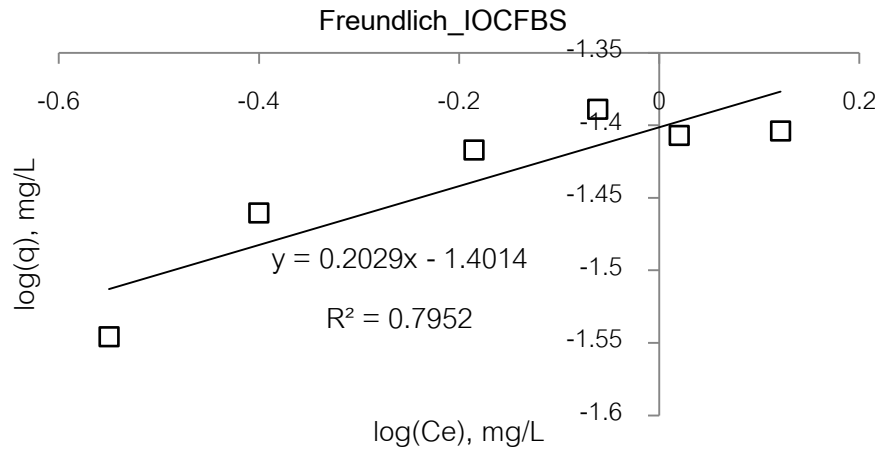
ภาพที่ 4.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์



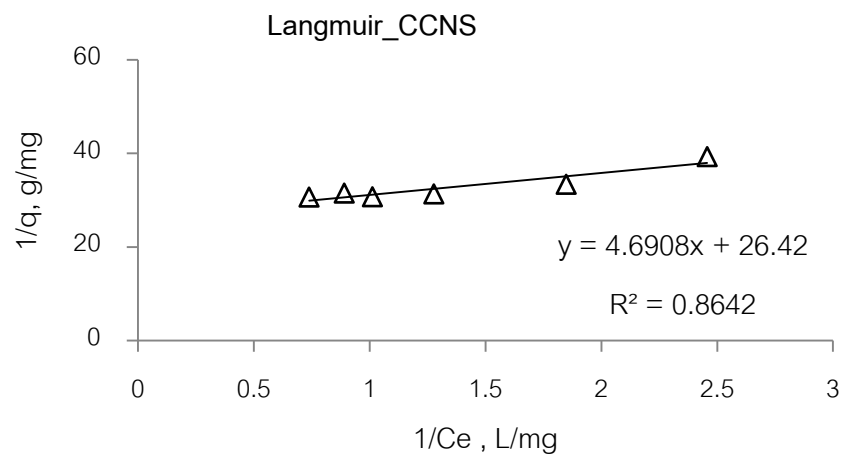
ภาพที่ 4.21 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชของทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์



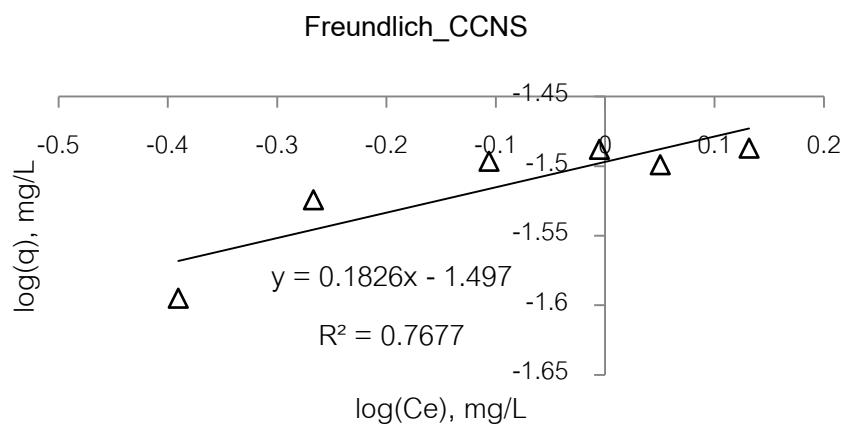
ภาพที่ 4.22 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์



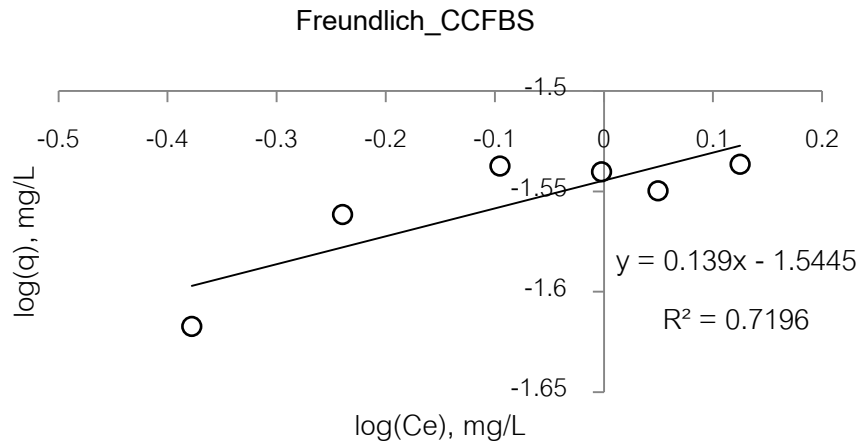
ภาพที่ 4.23 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชของทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์



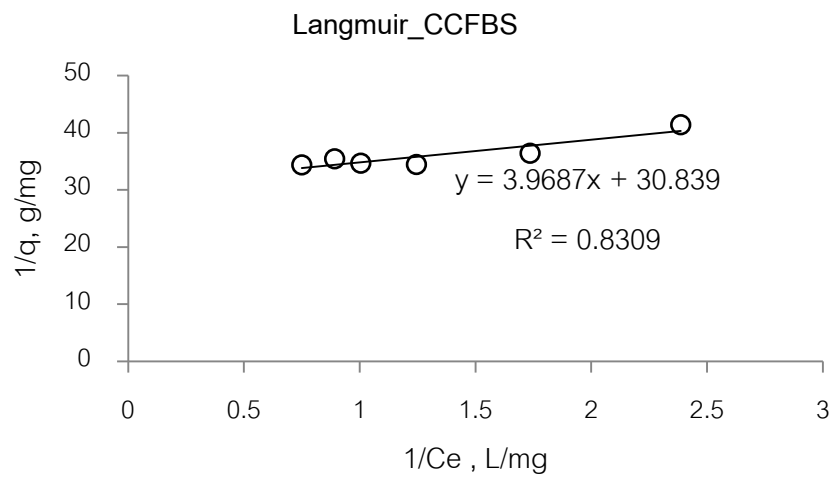
ภาพที่ 4.24 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน



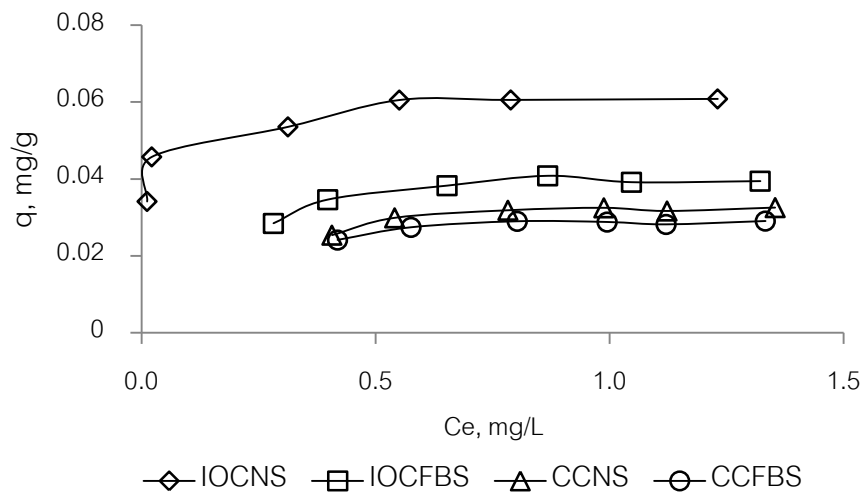
ภาพที่ 4.25 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชของทรายธรรมชาติเคลือบโคโคซาน



ภาพที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ของทรายจากเตาฟลูอิไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน



ภาพที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนด์ลิชของทรายจากเตาฟลูอิไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน



ภาพที่ 4.28 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดติดผิวของตัวดูดติดผิวชนิดต่างๆ

จากภาพที่ 4.28 สังเกตได้ว่ารูปกราฟของตัวกลางดูดติดผิวทุกชนิด มีลักษณะเป็นรูปร่างแบบ L-shape ซึ่งเป็นการช่วยยืนยันได้ว่าการดูดติดผิวของตัวกลางทุกชนิดเป็นการดูดติดผิวแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกันอย่างสูงระหว่างสารที่ถูกดูดติดผิวกับตัวกลางดูดติดผิว โดยมีการรบกวนจากตัวทำละลายน้อย และเป็นการบ่งชี้ว่าเป็นกระบวนการดูดติดผิวเคมีอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์ และพารามิเตอร์การดูดติดผิวของอาร์เซนิก ด้วยตัวกลางดูดติดผิวชนิดต่างๆ

ชนิดตัวกลางดูดติดผิว	ค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์			ค่าคงที่ของไอโซเทอมพรุนดิลิช		
	a (mg/g)	b (L/mg)	R ²	K _f (mg/g)	1/n (L/g)	R ²
IOCNS	0.060	116.15	0.961	0.062	0.110	0.889
IOCFBS	0.047	6.07	0.911	0.040	0.202	0.795
CCNS	0.038	5.63	0.864	0.039	0.182	0.767
CCFBS	0.032	7.77	0.830	0.029	0.139	0.719

จากตารางที่ 4.4 ค่า a ซึ่งเป็นค่าคงที่ของไอโซเทอมแลงเมียร์ คือ ค่าความสามารถดูดติดผิวของตัวกลางดูดติดผิวสูงสุด ซึ่งตัวกลาง IOCNS IOCFBS CCNS CCFBS มีค่าความสามารถดูดติดผิวของตัวกลางดูดติดผิวสูงสุดแตกต่างกัน ดังนี้ 0.060 0.047 0.038 และ 0.032 มิลลิกรัมอาร์เซนิก ต่อกรัมตัวกลางดูดติดผิว ตามลำดับ

เห็นได้ว่า IOCNS มีความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดมีค่ามากที่สุด (9.09×10^{-3} มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อ 1 กรัมตัวกลาง IOCNS) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองข้างต้นที่พบว่า IOCNS มีประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกสูงสุด ดังนั้นตัวกลาง IOCNS จึงเหมาะสมเป็นตัวกลางดูดติดที่จะนำมาใช้กำจัดอาร์เซนิกในการทดลองต่อไป

4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

การศึกษาดูประสิทธิภาพการดูดติดผิว ซึ่งทำการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ เติมน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปล่อยน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก จากด้านบนลงสู่ด้านล่างให้ไหลผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ที่ทำจากท่ออะคริลิกที่มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 25 มิลลิตรต่อนาที คิดเป็นอัตราเร็วในการไหลของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 0.04 เมตรต่อนาที ซึ่งจากผลการทดลองหา สภาวะที่เหมาะสมข้างต้น พบว่า IOCNS ให้ประสิทธิภาพการกำจัด อาร์เซนิกดีที่สุด ดังนั้นจึง เลือก IOCNS บรรจุลงในคอลัมน์ โดยบรรจุให้ความสูงของชั้น IOCNS เท่ากับ 90 เซนติเมตร และ ทำการเก็บน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ชั้นความลึกของ IOCNS ทุกๆ 30 เซนติเมตร ตั้งแต่ความสูงที่ 30 60 และ 90 เซนติเมตร จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของอาร์เซนิก เท่ากับความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำออก ต่อหน้าเข้ามีค่าประมาณ 1)

ในการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ ผ่านการบำบัดอาร์เซนิก ที่ความสูงของชั้นทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ต่างๆ กัน ส่วนที่ สองเป็นการศึกษาคำนวณค่า q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas ของ Breakthrough curve ส่วนที่สามเป็นการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

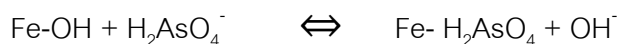
4.5.1 ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดอาร์เซนิก ที่ความสูงของทรายเคลือบเหล็ก ออกไซด์ต่างๆ

จากภาพที่ 4.29 แสดงปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดอาร์เซนิกที่ระดับความสูงของ ชั้น IOCNS 30 60 และ 90 เซนติเมตร โดยเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้น้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกไหลจากบนลงล่าง ซึ่งพบว่าตัวกลางดูดติดผิวจะ หมดสภาพจากส่วนบนก่อน จากนั้นจึงค่อยๆ หมดสภาพจนถึงส่วนกลาง และหมดสภาพถึง ส่วนล่างของคอลัมน์ ดังนั้นจุดสูงสุดของเส้นกราฟ คือ จุดที่ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์ อาร์เซนิกขาออกต่อความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์ขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 1 แต่จุดที่หมดสภาพการ ดูดติด คือ จุดที่ความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์ขาออกต่อความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์ขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 0.9

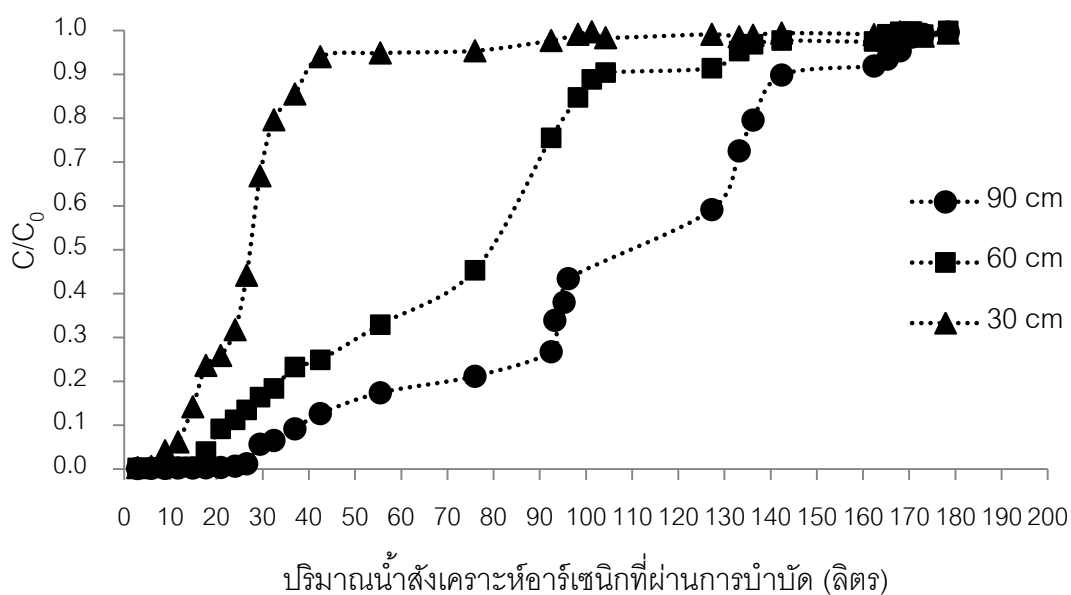
จากตารางที่ 4.5 และในภาคผนวก ข พบว่า ที่ความสูงของชั้นตัวกลางทรายเคลือบ เหล็กออกไซด์ 90 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดสูงสุด คือ 162.37 ลิตร หรือคิด

Bed Volume (BV) เป็น 292.88 ซึ่ง Bed Volume มีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัดต่อ ปริมาตรของชั้นตัวกลางดูดติดในคอลัมน์ โดยใช้เวลาในการบำบัด 118 ชั่วโมง ที่ความสูง 60 เซนติเมตร มีปริมาณน้ำ 96.15 ลิตร หรือคิดเป็น 260.15 BV ใช้เวลาในการบำบัด 80 ชั่วโมง ส่วน ที่ความสูง 30 เซนติเมตร 42.45 ลิตรหรือคิดเป็น 229.71 BV ใช้เวลาในการบำบัด 50 ชั่วโมง และจาก ภาพที่ 4.30 พบว่า ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และหลังจากนั้นจะเพิ่มอย่างคงที่

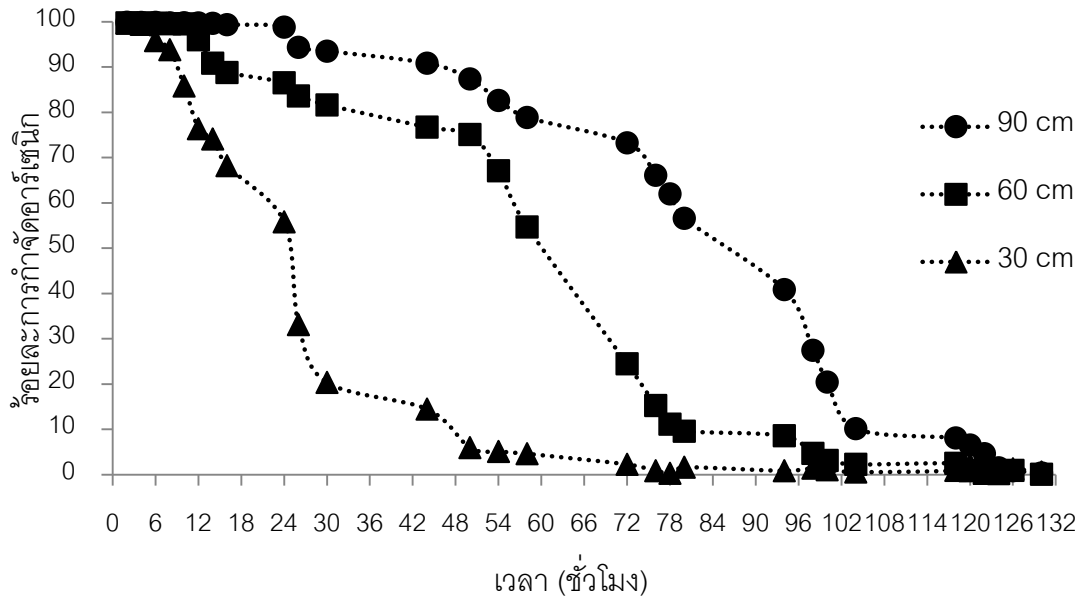
จากภาพที่ 4.31 แสดงค่าพีเอชของสารละลายอาร์เซนิกที่ออกจากระบบที่ความ สูงของตัวกลางดูดติดผิว 90 เซนติเมตร โดยพีเอชเริ่มต้น 4.13 พบว่า ในช่วงแรกที่เริ่มเดินระบบ พีเอชของน้ำที่ออกจากระบบอยู่ในช่วงที่ 7-8 เนื่องจากอิทธิพลของตัวดูดกลายที่มีค่าพีเอชที่สูงอยู่ แล้วในขั้นตอนการเตรียม และเนื่องจากในระหว่างการดูดติดอาร์เซนิกด้วย IOCNS จะมีการปล่อย หมู่ไฮดรอกซิล บนผิวของเหล็กออกไซด์ออกมา จึงทำให้พีเอชในช่วงแรกเพิ่มขึ้น จนมีสภาพความ เป็นด่าง ดังสมการต่อไปนี้



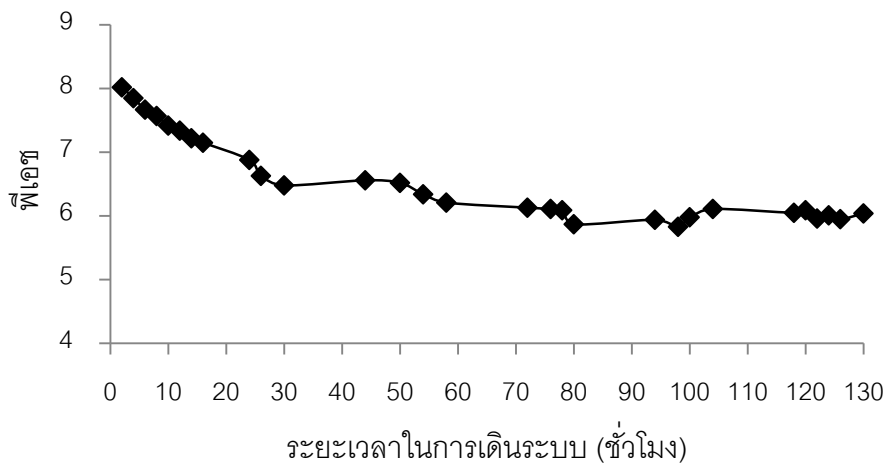
หลังจากนั้นเมื่อเดินระบบไประยะเวลาหนึ่งพีเอชจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนคงที่ อยู่ที่ พีเอชประมาณ 6 เนื่องจากตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของเหล็กออกไซด์ถูกแทนที่เต็มไปด้วย อาร์เซนเตอไอออนที่เป็นประจุลบ จึงทำให้ไฮดรอกซิลไอออนถูกปล่อยออกมาน้อยลง และพีเอช ของน้ำที่ออกจากระบบก็ยังมีพีเอชสูงกว่าน้ำที่เข้าระบบ



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ผ่านการบำบัดกับอัตราความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกขาออกต่อความเข้มข้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกขาเข้า



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกกับเวลา ที่ระดับความสูงของชั้นตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 30 60 และ 90 เซนติเมตร



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการเดินระบบกับค่าพีเอชของสารละลายอาร์เซนิกที่ออกจากระบบที่ความสูงของตัวกลางดูดซับที่ 90 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการดูดติดอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับความสูงของชั้นตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ 30 60 และ 90 เซนติเมตร

ชนิด ตัวกลาง	ความสูงชั้น ตัวกลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตรชั้น ตัวกลาง (ลิตร)	น้ำหนัก ตัวกลาง (กรัม)	ปริมาตรน้ำ ไหลผ่าน (ลิตร)	ปริมาตรน้ำไหล ผ่าน/ปริมาตรของ ชั้นตัวกลาง (BV)
ทรายธรรมชาติ	30	0.1848	198.3421	42.45	229.71
เคลือบเหล็ก	60	0.3696	400.5513	96.15	260.15
ออกไซด์	90	0.5544	598.7622	162.37	292.88

4.5.2 การศึกษา ค่าพารามิเตอร์ q_0 และ k_1 จากสมการของ Thomas จาก Breakthrough curve ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

จากการทดลองบำบัดอาร์เซนิก ในคอลัมน์ดูดติดผิวด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยใช้สมการของ Thomas เพื่อศึกษาหาค่า q_0 และ k_1 ดังสมการที่ 4.8

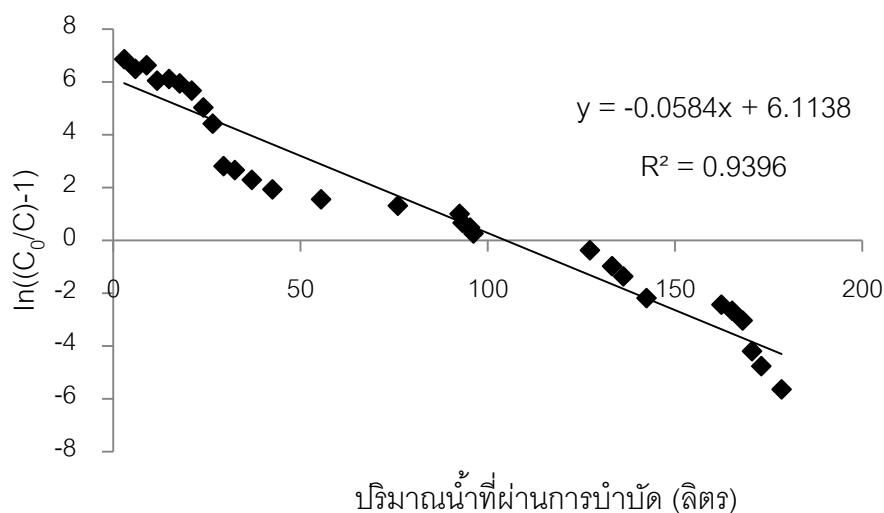
$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{k_1 q_0 M}{Q} - \frac{k_1 C_0 V}{Q} \quad (4.8)$$

เมื่อ	C	=	ความเข้มข้นของสารละลายขาออก
	C_0	=	ความเข้มข้นของสารละลายขาเข้า
	k_1	=	อัตราค่าคงที่
	q_0	=	ความจุสูงสุดที่สารละลายถูกติดบนตัวดูดติดผิว (กรัมต่อกรัม)
	M	=	น้ำหนักของตัวดูดติดผิว (กรัม)
	V	=	ปริมาตรที่บำบัดได้ (ลิตร)
	Q	=	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)

$$\text{โดยค่าความชัน (slope)} = \frac{k_1 C_0}{Q}$$

$$\text{ค่าจุดตัดแกน Y} = \frac{k_1 q_0 M}{Q}$$

จากผลการทดลองการบำบัดอาร์เซนิกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อลิตร ที่ความสูงของชั้นตัวกลางดูดติดผิว 90 เซนติเมตร อัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที (1.5 ลิตรต่อชั่วโมง) และน้ำหนักของตัวกลาง IOCNS เท่ากับ 598.7622 กรัม สามารถนำผลการทดลองมาคำนวณได้ดังตารางภาคผนวก ข และสามารถเขียนกราฟได้ดังภาพที่ 4.32 ซึ่งแสดงผลในรูปแบบสมการของ Thomas ได้ดังนี้ $\ln(C_0/C-1) = 6.113 - 0.058(V)$



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ผ่านการบำบัดกับ $\ln(C_0/C-1)$

ดังนั้นสามารถหา k_1 และ q_0 ของ IOCNS ได้ดังนี้

$$\text{หาค่า } k_1 \text{ จาก} \quad k_1 = \frac{0.058Q}{C_0} \text{ ลิตร}^{-1}$$

$$k_1 = 0.062 \text{ ลิตรต่อชั่วโมง-มิลลิกรัม}$$

$$\text{และหาค่า } q_0 \text{ จาก} \quad q_0 = \frac{6.113 \times Q}{k_1 M}$$

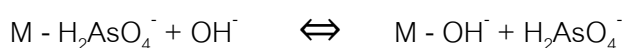
$$q_0 = 0.25 \text{ มิลลิกรัมต่อกรัม}$$

จากการทดลองเป็นการทำนายสมรรถนะของระบบ โดยใช้ค่า $k_1 = 0.062$ ลิตรต่อชั่วโมง-มิลลิกรัม ซึ่งเป็นอัตราค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณ Scale up เพื่อนำค่านี้ไปใช้ออกแบบระบบจริง โดยสามารถนำค่า k_1 นี้ไปคำนวณตามสมการของ Thomas เพื่อหาค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกขาเข้าหรือขาออกจากระบบที่ต้องการ หรือ ค่า q_0 ที่ได้เท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นค่าความจุสูงสุดที่นำไปใช้คำนวณหามวลหรือปริมาตรของตัวกลางดูดติดผิวที่ใช้ในการสร้างระบบจริง

4.5.3 การฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อการนำกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองเพื่อศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ (IOCNS) หลังจากทำการดูดติดอาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อดูรอบการทำงานว่าสามารถใช้ตัวกลาง IOCNS ได้กี่รอบ โดยการทดลองนี้จะทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง IOCNS ทั้งหมด 5 รอบด้วยกัน โดยทำการเก็บน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิกที่ชั้นความลึกของ IOCNS เท่ากับ 90 เซนติเมตร จนกระทั่งน้ำที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกเท่ากับความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่ป้อนเข้าสู่คอลัมน์ ในการทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง IOCNS ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 นอล์มาล ด้วยอัตราการไหล 25 มิลลิลิตรต่อนาที เข้าทางด้านบนคอลัมน์เป็นเวลา 45 นาที หลังจากนั้นชะล้างสารเคมีด้วยน้ำกลั่นใช้อัตราการไหลเท่ากับอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 45 นาที จนกระทั่งพีเอชของน้ำออกอยู่ระหว่าง 8-8.5 จึงทำการดูดติดผิวรอบต่อไป รายละเอียดผลการทดลองดังตารางภาคผนวก ฉ

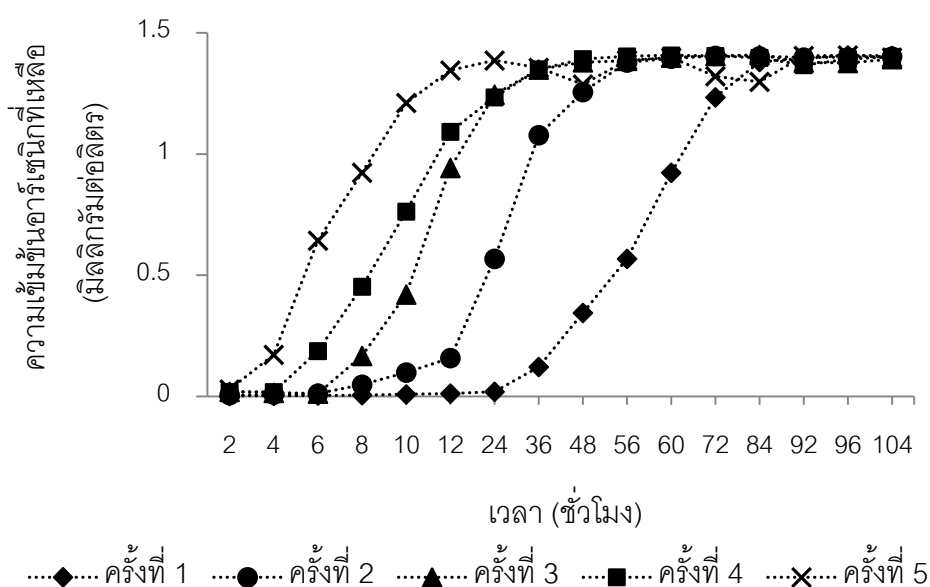
จากภาพที่ 4.33 และ 4.34 แสดงผลการดูดติดอาร์เซนิกของ IOCNS หลังจากทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง IOCNS พบว่าเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง ครั้งที่ 1 2 3 4 และ 5 การดูดติดผิวจะหมดสภาพอยู่ที่ 84 56 48 36 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่ตัวกลางดูดติดผิวเดิมก่อนจะฟื้นฟูสภาพมีระยะเวลาในดูดติดผิวอยู่ที่ 124 ชั่วโมง และสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อรอบการฟื้นฟูสภาพมากขึ้น ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกลดลงไปเรื่อยๆ เช่นกัน เนื่องจากอาร์เซนิกเกิดการดูดติดผิวกับเหล็กออกไซด์ได้ดี เมื่อทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพจึงเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างอาร์ซิเนตไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนที่ผิวสัมผัสเหล็กไฮดรอกไซด์ได้น้อยลง ทำให้ผิวสัมผัสเหล็กออกไซด์ที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ไอออนเกาะอยู่น้อยกว่าการใช้งานในครั้งแรก (ธรรม รัฐประภอบกิจ, 2541) ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดติดผิวจึงลดลง ในการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวฟื้นฟูสภาพสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮดรอกซิลไอออน กับอาร์ซิเนตไอออน ซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลอย่างง่ายของการแลกเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสของโลหะออกไซด์ ได้ดังนี้



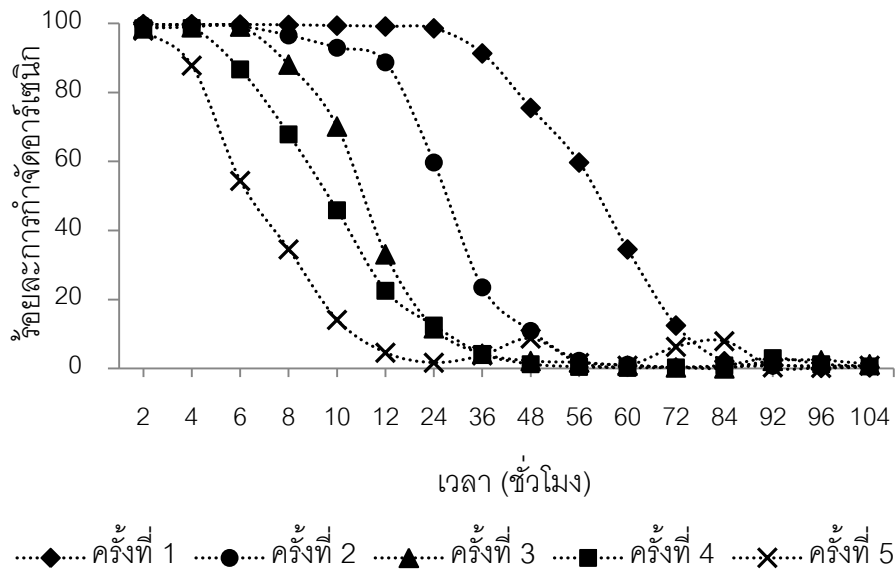
M แทนพื้นที่ผิวสัมผัสของโลหะออกไซด์

จากสมการอาร์ชีเนตไอออนในน้ำสังเคราะห์เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลบนผิวสัมผัสโลหะออกไซด์ หมู่ไฮดรอกซิลที่เกาะอยู่บนผิวโลหะออกไซด์เกิดจากการฟื้นฟูสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนที่จะนำไปใช้งาน โดยที่ไฮดรอกซิลไอออนที่ถูกแทนที่จะปะปนออกมาพร้อมกับน้ำที่ถูกการกำจัด (Anderson, 1981)

พีเอชของน้ำขาออกหลังจากทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง IOCNS พบว่า การฟื้นฟูสภาพในแต่ละรอบมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อปล่อยน้ำสังเคราะห์อาร์เชนิกจากบนสู่ล่างผ่านตัวกลาง IOCNS ที่มีการฟื้นฟูสภาพมาก่อน ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์อาร์เชนิกเท่ากับ 4.12 พีเอชของน้ำขาออกในช่วงแรกจะค่อนข้างเป็นด่าง ที่อยู่ในช่วงระหว่าง 8.5-7.1 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากจากพีเอชเริ่มต้นของน้ำสังเคราะห์ เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นตัวฟื้นฟูสภาพในชั้นตัวกลางดูดติดผิวถูกชะล้างออกมาในช่วงแรก และการทำการฟื้นฟูสภาพไปเรื่อยๆ ตัวกลางดูดติดผิวจะปล่อยไฮดรอกซิลไอออนออกมามากขึ้น จึงส่งผลให้พีเอชเพิ่มมากขึ้น และหลังจากนั้นเมื่อน้ำสังเคราะห์ผ่านชั้นตัวกลางมาสักระยะเวลาหนึ่งพีเอชมีแนวโน้มลดลงและคงที่ เนื่องจากไฮดรอกซิลไอออนบนผิวของเหล็กออกไซด์ ถูกแทนที่ด้วยอาร์เชเนตไอออนที่เป็นประจุลบ แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชของน้ำขาออกก็ยังสูงกว่าพีเอชของน้ำขาเข้า เพราะไฮดรอกซิลไอออนที่อยู่ในน้ำหลุดออกมา โดยมีพีเอชอยู่ในช่วง 6-6.1 ซึ่งพีเอชดังกล่าวยังอยู่ในช่วงพีเอชของเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่ม คือ 6-8.5 ดังภาคผนวก ฅ



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการบำบัดกับความเข้มข้นของอาร์เชนิกขาออกในการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์



ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกที่เวลาในการบำบัดต่างๆ ในการฟื้นฟูสภาพทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่เหมาะสมของตัวดูดติดอาร์เซนิก ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางดูดติดผิว 4 ชนิด คือ ทราयरธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरธรรมชาติเคลือบไคโตซาน ทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน โดยทำการทดลองทั้งแบบที่ละเทและแบบคอลัมน์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดลองเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด พบว่า ทราयरธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ และทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ดูดติดอาร์เซนิกได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำ 8 ชั่วโมง โดยมีค่าร้อยละการกำจัดเท่ากับ 70.20 และ 45.65 ตามลำดับ ส่วนทราयरธรรมชาติเคลือบไคโตซาน และทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซานระยะเวลาในการดูดติดผิวดีที่สุดอยู่ที่ 6 ชั่วโมง มีค่าร้อยละการกำจัดอาร์เซนิกเท่ากับ 35.35 และ 32.33 ตามลำดับ

2. จากการทดลองเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางดูดติดผิวทั้ง 4 ชนิด พบว่า ทราयरธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरธรรมชาติเคลือบไคโตซาน และทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกสูงสุดที่พีเอช 4 โดยมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกโดยรวมเท่ากับ 79.10 55.69 46.07 และ 42.59 ตามลำดับ โดยมีค่าร้อยละการตกตะกอนอยู่ในช่วง 1.54 ถึง 3.85 เท่านั้น ดังนั้นการกำจัดอาร์เซนิกส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการดูดติดผิวมากกว่ากระบวนการตกตะกอน และที่พีเอชดังกล่าวนี้ พบว่าอาร์ซิเนตไอออนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป $H_2AsO_4^-$ มากที่สุด

3. จากผลการวิเคราะห์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทราयरเคลือบทั้ง 4 ชนิด สอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ซึ่งแสดงว่าการดูดติดผิวของตัวกลางดูดติดผิวเป็นแบบชั้นเดียว โดยค่าความสามารถการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทราयरธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราयरธรรมชาติเคลือบไคโตซาน และทราयरจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน สูงสุดเท่ากับ 0.0602 0.0467 0.0379 และ 0.0324 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อกรัมตัวกลางดูดติดผิว ตามลำดับ

4. จากการทดลองพบว่า ตัวกลางดูดติดผิวที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกดีที่สุดคือ ทราเยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ รองลงมาทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ทราเยธรรมชาติเคลือบโคโคซาน และทราเยจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบโคโคซาน ตามลำดับ

5. จากการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดติดผิวอาร์เซนิก ซึ่งทำการทดลองในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ โดยเลือกทราเยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์บรรจุลงในคอลัมน์เพื่อให้ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกดีที่สุด จุดหมดสภาพที่ความลึก 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 229.71 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 260.15 BV จุดหมดสภาพที่ความลึก 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 292.88 BV

6. จากการทดลองการฟื้นฟูสภาพทราเยธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 5 รอบการทำงาน พบว่าเมื่อทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลาง ครั้งที่ 1 2 3 4 และ 5 การดูดติดผิวจะหมดสภาพอยู่ที่ 84 56 48 36 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากเดิมก่อนที่ฟื้นฟูสภาพ คือ 124 ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

1. ศึกษาประสิทธิภาพของตัวกลางดูดติดผิวในการดูดติดโลหะหนักชนิดอื่นๆ หรือในกรณีที่มีโลหะหนักหลายๆ ชนิดอยู่ด้วยกัน เช่น สังกะสี (Zn^{2+}), ทองแดง (Cu^{2+}), แคดเมียม (Cd^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) เป็นต้น

2. ศึกษาอิทธิพลของแอนไอออนอื่นๆ ที่มีต่อความสามารถในการดูดติดอาร์เซนิก เช่น ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) คลอไรด์ไอออน (Cl^-) เป็นต้น

3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้สารเคมี หรือวัสดุอื่นๆ ร่วมกับตัวกลางทราเยเคลือบในการกำจัดอาร์เซนิก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์เซนิกให้สูงขึ้น

4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิก โดยใช้เมมเบรนในระดับนาโนเมตร เพื่อสามารถกำจัดอาร์เซนิก ออกจากน้ำที่มีการปนเปื้อนได้มากที่สุด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กิตตินันท์ คงสืบชาติ. 2546. ดินเผาดูดซับจากดินเหนียวและซีลี้อยู่เพื่อการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขาน้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เกษม สีดอกบัว. 2543. การกำจัดอิออนโลหะหนักในน้ำเสียโดยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โครงการสื่อชุมชนลุ่มน้ำโขง เครือข่ายอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติและวัฒนธรรมลุ่มน้ำโขง-ล้านนา. เหมืองทองวังสะพุง เมื่อผู้อนุรักษ์เป็นผู้บุกรุก [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา http://www.mekonglover.com/news_pop.asp?NewsId=223 [17มกราคม 2554]
- จารุรัตน์ เชาว์เลิศ. 2546. การกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียจากสถานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุชด้วยเกล็ดไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์. 2543. ผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดติดผิวของตะกั่วบนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยยันต์ ไชยยะ. 2542. การพัฒนาออกแบบเม็ดดูดซับเซรามิกส์ผลิตจากกากกาแฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ฉามเกษม เจริญผล. 2545. การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับและการลดปริมาณอาร์เซนิกในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- ดุษฎีภรณ์ วุฒิจิว. 2543. ประสิทธิภาพของแฝกหอม *Vertiveria zizznioides* (Linn.) Nash และแฝกคอง *Vertiveria nemoralis* (Balansa) A. Camus ในการกำจัดสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทิพย์วิมล เกิดอิม. 2547. การจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนัชพร อยู่ยั้งยืน. 2547. พฤติกรรมการดูดติดผิวและการเคลื่อนที่ของอาร์เซนเนตในชั้นน้ำใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธिया ชนะศักดิ์. 2542. การดูดซับของฟอสเฟตบนถ่านกัมมันต์เคลือบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ธรรม รุ่งประกอบกิจ. 2541. การกำจัดสารหนูในน้ำสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และตัวกลางทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นฤมล วงศาสุข. 2547. การหาภาวะที่เหมาะสมในการสร้างรูปเดกซ์แทรนเนสบนผิวทรายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญา.มหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นันทนา ชูฉัตร. 2543. ประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุศราภรณ์ มหาโยธี. 2537. การจัดหมู่อะซิติลในไคตินและสมบัติของไคตินและไคโตแซนในการคีเลตเฟอริกไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เบญจวรรณ วงศ์ศิริ. 2547. การกำจัดตะกั่วและทองแดงจากน้ำเสียโดยซิลิกาเจลที่ใช้แล้วเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- บรรเจิด แสงจันทร์, กอบสิน ทวีสิน และ นุชธนา พูลทอง. 2544. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทรายหล่อแต่ละแหล่งในประเทศไทย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 24 (มกราคม-เมษายน): 57-68.
- พงศ์ภัทร ศรีขจร. 2549. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เยาวภา ไหวพริบ. 2534. การผลิตไคติน และไคโตแซนจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รามนรี เนตรวิเชียร. 2543. การกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซีเนตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไคโตแซนแบบเม็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.diw.go.th/edit/webdesign/html/versionthai/laws/27.pdf> [17 ธันวาคม 2553]
- วรารุณ วัดขนาด. 2552. ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไอออน (II) โดยใช้ทรายที่ใช้แล้วจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สหสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรารุณ ศรีมูล. 2548. การพัฒนาการวิเคราะห์รูปแบบทางเคมีของอาร์เซนิกในปลาด้วยวิธี HPLC/ICP-OES. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิสิฐ จะวะสิต และ ลูกจันทร์ ภัคร์ชพันธ์. ไคโตแซน (CHITOSAN) โพลีเมอร์ตัวใหม่จากของเหลือทิ้งอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ. วารสารอุตสาหกรรมเกษตร 1 (มกราคม-เมษายน 2533).
- ศิริรัตน์ ศรีเกษเพชร. 2543. การดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยดินเหนียวและดินเหนียวปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข. พิษของอาร์เซนิก [ออนไลน์]. 2542. แหล่งที่มา: http://webdb.dmsc.mooh.go.th/ifc/a_tx_1_001c.asp?info_id=119 [17 ธันวาคม 2553]
- สุชาดา สุทธิพิบูลย์. 2547. ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและอาร์เซนิกในน้ำเสียด้วยถ่านกระดุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาพร ห้วยหงษ์ทอง. 2548. การเตรียมเรซินไคโตซานสำหรับการขจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2525. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- ส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, กรม. 2541. สารหนู. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ.
- อรุณี เทอดเทพพิทักษ์. 2534. การกำจัดโลหะหนักบางตัวในน้ำทิ้งโดยใช้เกล็ดไคโตซานจากเปลือกปูที่เหลือทิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

ภาษาอังกฤษ

- Anderson, M. A. and Rubin, A. J. 1981. A review of anion adsorption: adsorption of inorganic at solid-liquid interface. Ann Abor Science.
- Aoki, T. and Munemori, M. 1982. Recovery of Chromium(VI) from Wastewaters with Iron(III) Hydroxide-I. Water Resource 16: 793-796.
- Bailly, S. E., Olin, T. J., Brica, R. M. and Adrian, D. D. 1999. A review of the potentially low cost sorbents for heavy metals. Water Research 33: 2469-2479.
- Bassi, R., Prasher, S. O. and Simoson, B. K. 1999. Remediation of Metal-contaminated Leachate using Chitosan Flakes. Environmental Technology 20: 1177-1182.
- Benjamin, M. M., Sletten, R. S., Bailey, R. P. and Bennett, T. 1996. Sorption and filtration of metals using iron-oxide-coated sand. Water Research 30: 2609-2620.

- Bhumbla, D. K. and Keefer, R. F. 1994. Arsenic Mobilization and bioavailability in Soils. In Jerome, O. N. (ed.), Arsenic in The Environment, pp. 51-82. NewYork: John Willey & Sons.
- Boddu, V. M. Abburi K. G., Talbott, J. L. and Smith, E. D. 2003. Removal of hexavalent chromium from wastewater using a new composite chitosan biosorbent. Environmental Science and Technology 37: 4449-4456.
- Boddu, V. M., Abburi K. G., Talbott, J. L. Smith, E. D. and Haasch, R. 2008. Removal of arsenic (III) and arsenic (V) from aqueous medium using chitosan-coated biosorbent. Water Research 42: 633- 642.
- Boujelben, N., Bouzid, J., Elouear, Z., Feki, M., Jamoussi, F. and Montiel, A. 2008. Phosphorus removal from aqueous solution using iron coated natural and engineered sorbents. Journal of Hazardous Materials 151: 103 -110.
- Cabib, E., Shaw, J. A., Mol, P. C., Bowers, B. and Choi, W. J. 1996. Chitin Biosynthesis and Morphogenetic Processes. Biochemistry and Molecular Biology: 243-267.
- Chang, Y. Y., Song, K. H. and Yang J. K. 2008. Removal of AS (III) in a column reactor packed with iron-coated sand and manganese-coated sand. Journal of Hazardous Materials 150: 565-572.
- Charlet, L., Ansari, A. A., Lespagnol, G. and Musso, M. 2001. Risk of arsenic transfer to a semi-confined aquifer and the effect of aater level fluctuation in North Mortagne, France at A Former Industrial Site. The Science of the Total Environment 277: 133-147.
- Dalwoo. 2002. Structure of Chitin / Chitosan and Cellulose [Online]. Available from: <http://dalwoo.com/chitosan/structure.htm> and <http://www.wellable.com/product/chitin.gif> [2010, Dec 8]
- Davis, J. A. and Kent, D. B. 1990. Surface Complexation Modeling in Aqueous Geochemistry. Mineral-Water Interface Geochemistry 23: 213-221.
- Diamadopoulos, E., Ioannidis, S. and Sakellaropoulos, G. P. 1993. Arsenic (V) removal from aqueous solution by fly ash. Water Research 12: 1773-1777.
- Dzombak, D. A. and Moral, F. M. 1990. Surface Complexation Modeling. Singapore. A wiley-Interscienc.

- Eckenfelder, W. W. 1981. Application of adsorption to wastewater treatment. Nashville Tennessee: Enviropress.
- Ellenhorn, M. J. 1997. Ellenhorn's medical toxicology : diagnosis and treatment of human poisoning. 2nd ed. Baltimore: Williams and Wilkins.
- ENSIC. 1994. Drinking Water without Arsenic. A Review of Treatment Technology.
- Faust, S. D. and Aly, O. M. 1987. Adsorption Processes for Water Treatment. United States of America: Butterworths.
- Feng, C. W., Ru, L. T., and Ruy, S.J. 2000. Comparative adsorption of metal and dye on flake and bead types of Chitosan prepared from fishery wastes. Journal of Hazardous Materials 73: 63-75.
- Forstner, U. and Wittman, G. T. W. 1981. Metal Transfer between Solid and Aqueous Phase. Metal Pollution in the Aquatic Environment. (a)
- Forstner, U. and Wittman, G. T. W. 1981. Metal Concentration in River, Lake and Ocean Water. Metal Pollution in the Aquatic Environment. (b)
- Gerente, C., Lee, V. K. C., Le, C. P. and McKay, G. 2007. Application of chitosan for the removal of metals from wastewaters by adsorption—mechanisms and models review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 37:41–127.
- Gupta, V. K., Saini, V. K. and Jain, N. 2005. Adsorption of As(III) from aqueous solutions by iron oxide-coated sand. Journal of Colloid and Interface Science 288: 55-60.
- Gupta, S. K. and Chen. 1978. Arsenic removal by adsorption. Journal of the Water Pollution Control Federation: 493-506.
- Goosen, M. F. A. 1997. Application of Chitin and Chitosan. Landcaster: Technomic.
- Hampel, C. A. 1968. The encyclopedia of the chemical element. New York: Nostrand Reinhold.
- Hsu, J. C., Lin, C. J., Liao, C. H. and Chen, S. T. 2008. Removal of As(V) and As(III) by reclaimed iron-oxide coated sands. Journal of Hazardous Materials 153: 817-826.
- Huang, Y. 1994. Arsenic Distribution in Soils. In Jerome, O. N. (ed.), Arsenic in The Environment, pp. 17-49. New York: John Willey & Sons.

- Jain, A., Raven, K.P. and Loeppert, R. H. 1991. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: surface charge reduction and net OH⁻-release stoichiometry. Environ. Science and Technology 33: 1179-1184.
- Kaminski, W. and Modrzejewska, Z. 1997. Application of chitosan membranes in separation of heavy metal ions. Separation Science and Technology 32(16): 2659-2668.
- Knorr, D. 1984. Use of chitinous polymers in food. Food Technology 38: 85-97.
- Knorr, D. 1991. Recovery and Utilization of Chitin and Chitosan in Food Processing Waste Management. Food Technology 1: 114-122.
- Kupongsak, S. 1995. Deacetylated Chitin Used as Absorbent in Clarification of Pineapple Syrup Production. Master's Thesis. Agriculture Aquatic Systems and Engineering Program Asian Institute of Technology.
- Kwok, K. C. M. and McKay, G. 2010. Novel batch reactor design for the adsorption of arsenate on chitosan. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 85: 1561-1568.
- Lackovic, J. A. 2000. Inorganic arsenic removal by zero-valent iron. Environmental Engineering Science 17(1): 29-39.
- Le, X. C., Lu, X. and Li, X. F. 2004. Arsenic speciation. Analytical Chemistry American Chemical Society 1: 27-33.
- Lee, V. 1974. Solution and Shear properties of chitin and chitosan. Ann Arbor 29: 446.
- McCabe, W. L. 2005. Unit operations of chemical engineering, Boston: McGraw Hill.
- Marc, E. 1994. Chemistry of Arsenic Removal During Coagulation and Fe-Mn Oxidation. Journal of the American Water Works Association 86: 64-78.
- Muzzarelli, R. A. A. 1977. Chitin [Online]. Toronto: Pergamon of Canada: Pacific Northwest Pollution Prevention Resource Available from: http://www.pprc.org/pubs/metalfin/rt_appc.html [2010, December 8]
- Namasivayam, C. 1998. Removal of arsenic (V) from aqueous solution using industrial solid waste: Adsorption rate and equilibrium studies. Industrial and Engineering Chemistry Research 37: 4816-4822.

- Namasivayam, C. and Ranganathan, K. 1998. Effect of Organic Ligands on the Removal of Pb(II) Ni(II) and Cd(II) by "Waste" Fe(III)/Cr(III) Hydroxide. Water Resource 32: 969-971.
- Peternele, W. S., Winkler, H. A. A. and Pineda, E. A. G. 1999. Adsorption of Cd (II) and Pb (II) onto functionalized formic lignin from sugar can bagasse. Bioresource Technology 68(1): 95-100.
- Qu, R., Sun, C., Ma, F., Zhang, Y., Ji, C., Xu, Q., Wang, C. and Chen, H. 2009. Removal and recovery of Hg(II) from aqueous solution using chitosan-coated cotton fibers. Journal of Hazardous Materials 167: 717-727.
- Raven, K. P. 1998. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium and adsorption envelopes. Environmental Science and Technology 32(3): 344-349.
- Reynolds, T. D. 1996. Unit operationa and process in environmental engineering, London: IWA Pub. ; Boca Raton Fla.: CRC Press.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., and Perkin, G. F. 1994. Chemistry for Environmental Engineering. Singapore: McGraw-hill.
- Schmuhl, R., Krieg, H. M., and Keizer, K. 2001. Adsorption of Cu(II) and Cr(VI) ions by chitosan: Kinetics and equilibrium studies. WaterSA 27.
- Stumm, W., and Morgan, J. J. 1995. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Water. 3rd ed. Wiley-Interscience.
- U.S. EPA. 2003. Bioaccumulation of arsenic (As) in fish & toxicity of as species [online] EPA's technical summary of information available on the bioaccumulation of arsenic in aquatic organisms. Available from http://www.epa.gov/waterscience/criteria/techsum_bioacc.pdf [2010, Dec 8]
- Valoon, G. W. and Duffy, S. J. 2000 . Environmental chemistry: a globe perspective. New York: Oxford University Press.
- Veerasiri, T. 2010. Arsenic contamination in soil, water and plant. surrounding gold mine in Thailand. In Engineering and Technology for a Better Quality of Life in Response to Climate Change Challenges, pp. 40. 30 Nov-4 Dec 2010 Vietnam Hanoi.

- Wan, M. W., Petrisor, I. G., Lai, H. T., Kim, D. and Yen, T. F. 2004. Copper adsorption through chitosan immobilized on sand to demonstrate the feasibility for in situ soil decontamination. Carbohydrate Polymers 55: 249–254.
- Wan, M. W., Kan, C. C., Rogel, B. D. and Dalida, M. L. 2010. Adsorption of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solution on chitosan-coated sand. Carbohydrate Polymers 80: 891–899.
- Wang, S. and Mulligan, C. N. 2006. Occurrence of arsenic contamination in Canada: 3127 sources, behavior and distribution. Science of the Total Environment 366: 701–721.
- Wang, Q. Z., Chen, X. G., Liu, N., Wang, S. X., Liu, C. S. and Meng, X. H. 2006. Protonation constants of chitosan with different molecular weight and degree of deacetylation. Carbohydrate Polymer 65:194-201.
- Whistler, R. S., and Bemiller, J. N. 1962. Alkaline degradation of amino sugar. Journal of organic chemistry 27: 1161-1164.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีทดสอบและผลการทดสอบ การชะละลาย และการย่อย

ก-1 วิธีทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้ จะต้องนำไปร่อน หรือไปบด เพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ก่อนนำไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) หากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (มก./ล.) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แสดงถึงของเสียที่ไม่เป็นอันตราย วิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

1. น้ำสกัดให้ใช้สารละลาย 0.2 โมลาร์ โซเดียมซัลเฟต ที่มีพีเอช 5.0 ± 0.1 โดยเตรียมจากการนำสารละลายกรดซัลฟริก ในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 โมลาร์

2. สารละลายกรดซัลฟริก สามารถเตรียมได้โดยนำเอากรดซัลฟริกไปละลายใน น้ำกลั่น (Deionized water)

3. นำตัวอย่าง 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลี เอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์สารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัด ควรผ่านการล้าง (Rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไนตริก ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร)

4. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ เทเบิลเชคเกอร์ (Table shaker) หรือ โอเวอร์เฮด สเตอร์เรอร์ (overhead stirrer) หรือ โรตารี เอ็กซ์แทรกเตอร์ (Rotary extractor) ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (Vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

5. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (Membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน Vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดละเอียดอาจต้องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ

ถึง 10,000 x G ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (Membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

6. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
7. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (Metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลิเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
8. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP

ก-2 วิธีทดสอบการย่อย Acid Digestion US EPA SW-846 Method 3050B

1. ผสมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. ชั่งตัวอย่างมา 1-2 กรัม จดน้ำหนักที่ชั่งไว้ด้วยทศนิยมสี่ตำแหน่ง
3. เติม กรดไนตริก HNO_3 1:1 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ต้มประมาณ 10 นาที
4. หลังจากนั้นจึงเติมกรดไนตริกเข้มข้น conc. HNO_3 5 มิลลิลิตร ต้มต่อประมาณ 30 นาที จนกระทั่งเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H_2O_2 30% 3 มิลลิลิตร ต้มต่อไปและเติม H_2O_2 1 มิลลิลิตร จนกระทั่งฟองปริมาณลดลง
6. จนกระทั่งปริมาตรลดลงเหลือประมาณ 5 มิลลิลิตร
7. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (Membrane filter) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอนโดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
8. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (Metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 7. ลงในขวดโพลิเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริกจนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 7. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
9. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP-MS หรือ GFAA

ภาคผนวก ข
การกำจัดอาร์เซนิก

ตารางที่ ข-1 ประสิทธิภาพการกำจัดอาร์เซนิกโดยวิธีการตกตะกอน (นันทนา ชูฉัตร, 2543)

Arsenic species	Treatment methode	Coagulant dosage (mg/L)	Initial Conc. (mg/L)	Removal (%)	pH
As (V)	FeCl ₃	5	0.050	100	7.0
As (III)	FeCl ₃	6	0.005	72	8.0
As(III)	FeCl ₃	18	0.005	84	8.0
*	Aeration, alum coagulation, settling and 6 days filtration	7	0.8	70	7.4
*	Aeration, FeCl ₃ coagulation, settling and 10 days filtration	18.5	0.69	60	7.4
*	Aeration, alum coagulation, settling and 12 days filtration	21	0.70	46	7.4
*	Chlorine (20 mg/l) oxidation, aeration FeCl ₃ coagulation, setting and 20 days filtration	21	0.83	100	7
*	FeCl ₃	30	1	92	6.8
As(V)	Ferric chloride	20	0.045	96	7.5
As(V)	Ferric chloride	40	0.045	95	7.5
As(V)	Ferric chloride	40	0.043	97	8
As(V)	Alum	60	0.043	97	8
As(V)	Alum coagulation	30	<1-2	≥90	6.4
As(V)	Ferric sulfate coagulation	30	<1/2	>90	7.5
As(III)	Ferric chloride	*	30-40	90-95	5.5
As(V)	Alum	>5	0.2	97.5	7
As (V)	Ferric sulfate	5	0.2	97.5	7.0
As (V)	Hydrous manganese oxide	20	0.2	76	7.0
As(III)	Ferric chloride	200	31	86	10
As(III)	Ferric chloride	500	31	92	10
As(III)	Ferric chloride	1000	31	93	10
As(V)	Electrochemical iron addition, hydrogen peroxide oxidation settling and filtration	*	56	99.8	6.5
As(III)	Ferric sulfate coagulation	10	0.2	52	7.5
As(III)	Ferric sulfate coagulation	10	0.2	75	7.5
As(III)	FeCl ₃	10	0.2	76	7.5

As(III)	Cupric sulfate coagulation	10	0.2	88	7.5
As(III)	Cuprous chloride coagulation	10	0.2	85	7.5
As(III)	Zinc Chloride coagulation	10	0.2	84	7.5
As(III)	FeCl ₃ ·6H ₂ O	300	100	73	8
As(III)	As ₂ SO ₄	625	100	82	8
As(III)	CuSO ₄ ·5H ₂ O	300	100	85	8
As(III)	Al ₂ SO ₄ ·15H ₂ O	300	100	73	8
As(III)	KMnO ₄ (13.8 mg/L) Oxidation, ferric sulfate coagulation and filtration	28	0.7	86	7.4

ตารางที่ ข-2 การกำจัดอาร์เซนิกโดยการออกซิเดชันและการกรอง (นันทนา ชูรัตน์, 2543)

Arsenic species	Treatment methode	Initial Conc. (mg/L)	Removal (%)	pH
*	KMnO ₄ Oxidation and 7 hours filtration	0.29	78	7.3
*	KMnO ₄ Oxidation and 15 hours filtration	0.21	78	7.3
*	Chlorine (4.5 mg/L) oxidation and filtration	0.26	>98	7
*	KMnO ₄ Oxidation and manganese greensand filtration (170,000 L)	52	96	7.3
As(III)	KMnO ₄ (1 mg/L) Oxidation, 2 hours manganese greensand filtration	0.11	91	7.2
As(III)	KMnO ₄ (1.5 mg/L) Oxidation, 2 hours manganese greensand filtration)	0.135	92	7.2
As(III)	KMnO ₄ Oxidation and manganese greensand filtration (400 bed volumes), Fe : As > 20 : 1	0.2	>97.5	*
As(III)	KMnO ₄ Oxidation and manganese greensand filtration (400 bed volumes), Fe : As > 20 : 1	0.025	>80	*
As(III)	KMnO ₄ Oxidation and manganese greensand filtration (400 bed volumes), Fe : As > 20 : 1	0.025	45.2	*

ภาคผนวก ค
ภาพถ่ายอุปกรณ์บางชนิดที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ ค-1 เครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วรอบได้



ภาพที่ ค-2 ตู้อบ



ภาพที่ ค-3 เครื่องอินดักทีฟคอบเบิลพลาสมา (ICP)



ภาพที่ ค-4 ส่วนควบคุมเครื่องอินดักทีฟคอบเบิลพลาสมา



ภาพที่ ค-5 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ ค-6 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก-7 อุปกรณ์ชุดคอลัมน์ในชุดติดผิว

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบ
เหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	5.99	6.98	1.0445	1.48	0.731	50.61
	2	6.01	6.94	1.0379	1.5	0.711	52.60
	4	6.01	6.86	1.0451	1.5	0.671	55.27
	6	6.01	7.11	1.0443	1.5	0.514	65.73
	8	6.01	7.24	1.0448	1.5	0.449	70.07
	10	6.01	7.20	1.036	1.5	0.449	70.07
	12	6.02	7.33	1.0473	1.51	0.461	69.47
	24	6.02	7.25	1.0373	1.51	0.453	70.00
2	1	6.00	7.01	1.0318	1.49	0.734	50.74
	2	6.00	6.96	1.0225	1.49	0.741	50.27
	4	6.00	7.14	1.0323	1.49	0.661	55.64
	6	6.00	7.15	1.0272	1.49	0.508	65.91
	8	6.00	7.25	1.0362	1.49	0.441	70.40
	10	6.00	7.27	1.033	1.49	0.446	70.07
	12	6.00	7.23	1.0295	1.49	0.446	70.07
	24	6.00	7.21	1.0374	1.49	0.438	70.60

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับคาร์บอนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็ก
ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลา(ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	6.02	6.93	1.0334	1.51	0.817	45.89
	2	6.02	7.02	1.0321	1.51	0.782	48.21
	4	6.02	7.14	1.022	1.51	0.676	55.23
	6	6.02	6.96	1.0348	1.51	0.518	65.70
	8	6.02	7.27	1.0363	1.51	0.451	70.13
	10	6.02	7.23	1.0362	1.51	0.453	70.00
	12	6.02	7.29	1.0335	1.51	0.458	69.67
	24	6.02	7.24	1.037	1.51	0.449	70.26
เฉลี่ย	1	6.00	6.97	1.0366	1.49	0.761	48.93
	2	6.01	6.97	1.0308	1.50	0.745	50.33
	4	6.01	7.05	1.0331	1.50	0.669	55.40
	6	6.01	7.07	1.0354	1.50	0.513	65.80
	8	6.01	7.25	1.0391	1.50	0.447	70.20
	10	6.01	7.23	1.0351	1.50	0.449	70.07
	12	6.01	7.28	1.0368	1.50	0.455	69.73
	24	6.01	7.23	1.0372	1.50	0.447	70.27

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไคซ์เบด
เกลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	6.01	7.11	1.0441	1.5	1.087	27.53
	2	6.01	7.14	1.0447	1.41	1.034	26.67
	4	6.01	7.24	1.0424	1.41	0.985	30.14
	6	6.01	7.26	1.0406	1.41	0.895	36.52
	8	6.00	7.34	1.0477	1.45	0.787	45.72
	10	6.00	7.38	1.0405	1.45	0.792	45.38
	12	6.00	7.32	1.0427	1.45	0.784	45.93
	24	6.00	7.36	1.0425	1.45	0.782	46.07
2	1	6.02	7.13	1.0345	1.51	1.089	27.88
	2	6.02	7.15	1.0324	1.51	1.053	30.26
	4	6.02	7.28	1.0303	1.51	0.999	33.84
	6	6.02	7.32	1.0368	1.51	0.911	39.67
	8	6.02	7.39	1.0355	1.51	0.818	45.83
	10	6.02	7.35	1.0333	1.51	0.801	46.95
	12	6.02	7.38	1.0325	1.51	0.797	47.22
	24	6.02	7.37	1.0332	1.51	0.799	47.09

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไคซ์เบด
เคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0
(ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	5.99	7.11	1.0379	1.45	1.071	26.14
	2	5.99	7.14	1.0239	1.45	1.039	28.34
	4	5.99	7.24	1.0375	1.45	0.989	31.79
	6	5.99	7.26	1.0345	1.45	0.897	38.14
	8	5.99	7.34	1.0385	1.45	0.791	45.45
	10	5.99	7.37	1.032	1.45	0.791	45.45
	12	5.99	7.34	1.0246	1.45	0.782	46.07
	24	5.99	7.34	1.0387	1.45	0.786	45.79
เฉลี่ย	1	6.01	7.12	1.0388	1.49	1.082	27.22
	2	6.01	7.14	1.0337	1.46	1.042	28.47
	4	6.01	7.25	1.0367	1.46	0.991	31.97
	6	6.01	7.28	1.0373	1.46	0.901	38.15
	8	6.00	7.36	1.0406	1.47	0.799	45.65
	10	6.00	7.37	1.0353	1.47	0.795	45.92
	12	6.00	7.35	1.0333	1.47	0.788	46.39
	24	6.00	7.36	1.0381	1.47	0.789	46.33

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	6.00	6.22	1.0364	1.47	1.164	20.82
	2	6.02	6.25	1.0375	1.5	1.165	22.33
	4	6.02	6.37	1.0449	1.5	1.086	27.60
	6	6.02	6.82	1.0361	1.5	0.971	35.27
	8	6.02	7.03	1.0362	1.5	0.966	35.60
	10	6.01	7.10	1.0358	1.45	0.922	36.41
	12	6.01	7.09	1.0362	1.5	0.965	35.67
	24	6.01	6.97	1.0446	1.5	0.964	35.73
2	1	6.04	6.27	1.0361	1.5	1.195	20.33
	2	6.04	6.31	1.0451	1.5	1.163	22.47
	4	6.04	6.38	1.0433	1.5	1.092	27.20
	6	6.04	6.39	1.0352	1.5	0.964	35.73
	8	6.04	6.35	1.0451	1.5	0.975	35.00
	10	6.04	6.28	1.0358	1.5	0.961	35.93
	12	6.04	6.30	1.0358	1.5	0.957	36.20
	24	6.04	6.27	1.0431	1.5	0.952	36.53

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	5.99	6.20	1.0362	0.81	0.644	20.49
	2	5.99	6.24	1.0321	0.81	0.633	21.85
	4	5.99	6.29	1.0415	0.81	0.597	26.30
	6	5.99	6.31	1.0417	0.81	0.528	34.81
	8	5.99	6.32	1.0361	0.81	0.531	34.44
	10	5.99	6.28	1.036	0.81	0.52	35.80
	12	5.99	6.31	1.0334	0.81	0.511	36.91
	24	5.99	6.29	1.0453	0.81	0.547	32.47
เฉลี่ย	1	6.01	6.23	1.0362	1.26	1.001	20.56
	2	6.02	6.27	1.0382	1.27	0.987	22.28
	4	6.02	6.35	1.0432	1.27	0.925	27.17
	6	6.02	6.51	1.0436	1.27	0.821	35.35
	8	6.02	6.57	1.0391	1.27	0.824	35.12
	10	6.01	6.55	1.0359	1.25	0.801	36.09
	12	6.01	6.57	1.0351	1.27	0.811	36.14
	24	6.01	6.51	1.0443	1.27	0.821	35.35

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด
เกลือปโคโตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	6.02	6.44	1.0376	1.5	1.242	17.20
	2	6.02	6.47	1.0436	1.5	1.223	18.47
	4	6.02	6.57	1.0329	1.5	1.143	23.80
	6	6.02	6.62	1.0451	1.5	1.007	32.87
	8	6.02	6.59	1.0395	1.5	1.023	31.80
	10	6.02	6.68	1.0372	1.5	1.004	33.07
	12	6.02	6.86	1.0442	1.5	1.012	32.53
	24	6.02	6.67	1.0445	1.5	1.009	32.73
2	1	5.98	6.41	1.0448	0.94	0.781	16.91
	2	5.98	6.43	1.0442	0.94	0.769	18.19
	4	5.98	6.51	1.0383	0.94	0.711	24.36
	6	5.98	6.55	1.0435	0.94	0.721	23.30
	8	5.98	6.52	1.0364	0.94	0.717	23.72
	10	5.98	6.53	1.0398	0.94	0.719	23.51
	12	5.98	6.51	1.0423	0.94	0.714	24.04
	24	5.98	6.48	1.0402	0.94	0.723	23.09

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบด
เคลือบไคโตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0
(ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	6.04	6.48	1.0438	1.51	1.25	17.22
	2	6.04	6.49	1.0456	1.51	1.209	19.93
	4	6.04	6.57	1.0343	1.51	1.149	23.91
	6	6.04	6.59	1.0448	1.51	0.945	37.42
	8	6.04	6.48	1.0464	1.51	0.957	36.62
	10	6.04	6.46	1.0413	1.51	0.941	37.68
	12	6.04	6.48	1.0423	1.51	0.936	38.01
	24	6.04	6.44	1.0411	1.51	0.926	38.68
เฉลี่ย	1	6.01	6.44	1.0421	1.32	1.091	17.14
	2	6.01	6.46	1.0445	1.32	1.067	18.96
	4	6.01	6.55	1.0352	1.32	1.001	23.97
	6	6.01	6.59	1.0445	1.32	0.891	32.33
	8	6.01	6.53	1.0408	1.32	0.899	31.72
	10	6.01	6.56	1.0394	1.32	0.888	32.56
	12	6.01	6.62	1.0429	1.32	0.887	32.61
	24	6.01	6.53	1.0419	1.32	0.886	32.71

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติก่อนเคลือบ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	6.02	6.20	1.0376	1.5	1.424	5.07
	2	6.02	6.25	1.0436	1.5	1.403	6.47
	4	6.02	6.50	1.0329	1.5	1.362	9.20
	6	6.02	6.48	1.0451	1.5	1.297	13.53
	8	6.02	6.67	1.0395	1.5	1.265	15.67
	10	6.02	7.12	1.0372	1.5	1.262	15.87
	12	6.02	7.15	1.0442	1.5	1.265	15.67
	24	6.02	7.09	1.0445	1.5	1.262	15.87
2	1	5.98	6.12	1.0448	0.94	0.891	5.21
	2	5.98	6.13	1.0442	0.94	0.879	6.49
	4	5.98	6.25	1.0383	0.94	0.855	9.04
	6	5.98	6.23	1.0435	0.94	0.813	13.51
	8	5.98	6.39	1.0364	0.94	0.791	15.85
	10	5.98	6.21	1.0398	0.94	0.784	16.60
	12	5.98	6.23	1.0423	0.94	0.791	15.85
	24	5.98	6.31	1.0402	0.94	0.793	15.64

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติก่อน
เคลือบ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	6.04	6.18	1.0438	1.51	1.434	5.03
	2	6.04	6.20	1.0456	1.51	1.413	6.42
	4	6.04	6.32	1.0343	1.51	1.369	9.34
	6	6.04	6.48	1.0448	1.51	1.313	13.05
	8	6.04	6.56	1.0464	1.51	1.269	15.96
	10	6.04	6.97	1.0413	1.51	1.276	15.50
	12	6.04	7.11	1.0423	1.51	1.271	15.83
	24	6.04	7.09	1.0411	1.51	1.268	16.03
เคลือบ	1	6.01	6.17	1.0421	1.32	1.288	2.18
	2	6.01	6.19	1.0445	1.32	1.261	4.23
	4	6.01	6.36	1.0352	1.32	1.248	5.22
	6	6.01	6.40	1.0445	1.32	1.232	6.43
	8	6.01	6.54	1.0408	1.32	1.201	8.78
	10	6.01	6.77	1.0394	1.32	1.196	9.16
	12	6.01	6.83	1.0429	1.32	1.202	8.71
	24	6.01	6.83	1.0419	1.32	1.210	8.10

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์
เบดก่อนเคลือบ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
1	1	6.00	6.32	1.0364	1.47	1.461	0.61
	2	6.02	6.42	1.0375	1.5	1.467	2.20
	4	6.02	6.50	1.0449	1.5	1.451	3.27
	6	6.02	6.63	1.0361	1.5	1.41	6.00
	8	6.02	6.91	1.0362	1.5	1.376	8.27
	10	6.01	7.09	1.0358	1.45	1.337	7.79
	12	6.01	7.14	1.0362	1.5	1.376	8.27
	24	6.01	7.18	1.0446	1.5	1.368	8.80
2	1	6.04	6.40	1.0361	1.5	1.491	0.60
	2	6.04	6.45	1.0451	1.5	1.467	2.20
	4	6.04	6.67	1.0433	1.5	1.451	3.27
	6	6.04	6.86	1.0352	1.5	1.409	6.07
	8	6.04	7.02	1.0451	1.5	1.372	8.53
	10	6.04	7.09	1.0358	1.5	1.379	8.07
	12	6.04	7.12	1.0358	1.5	1.373	8.47
	24	6.04	7.21	1.0431	1.5	1.368	8.80

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองหาค่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์
เบดก่อนเคลือบ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 6.0 (ต่อ)

ครั้งที่	เวลา (ชม.)	pH ก่อน	pH หลัง	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
3	1	5.99	6.28	1.0362	0.81	0.806	0.49
	2	5.99	6.34	1.0321	0.81	0.796	1.73
	4	5.99	6.37	1.0415	0.81	0.789	2.59
	6	5.99	6.48	1.0417	0.81	0.759	6.30
	8	5.99	6.56	1.0361	0.81	0.735	9.26
	10	5.99	6.97	1.036	0.81	0.743	8.27
	12	5.99	7.16	1.0334	0.81	0.741	8.52
	24	5.99	7.21	1.0453	0.81	0.742	8.40
เคลือบ	1	6.01	6.33	1.0362	1.26	1.253	0.56
	2	6.02	6.40	1.0382	1.27	1.261	0.71
	4	6.02	6.51	1.0432	1.27	1.243	2.13
	6	6.02	6.66	1.0436	1.27	1.229	3.23
	8	6.02	6.83	1.0391	1.27	1.205	5.12
	10	6.01	7.05	1.0359	1.25	1.189	5.13
	12	6.01	7.14	1.0351	1.27	1.202	5.35
	24	6.01	7.20	1.0443	1.27	1.212	4.57

ตารางที่ ง-7 จลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (ชม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลิตร)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	q_t	q_e	pseudo first order		pseudo second order
							$q_e - q_t$	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t
1	1.0366	0.05	1.49	0.761	0.0353	0.0507	0.01534	-1.81406	28.3086
2	1.0308	0.05	1.50	0.745	0.0366	0.0507	0.01405	-1.85239	54.6137
4	1.0331	0.05	1.50	0.669	0.0402	0.0507	0.01045	-1.98083	99.4593
6	1.0354	0.05	1.50	0.513	0.0477	0.0507	0.00301	-2.52177	125.8886
8	1.0391	0.05	1.50	0.447	0.0507	0.0507	0.00000	#NUM!	157.8879
10	1.0351	0.05	1.50	0.449	0.0508	0.0507	-0.00010	#NUM!	196.9680
12	1.0368	0.05	1.50	0.455	0.0506	0.0507	0.00011	-3.95458	237.3520
24	1.0372	0.05	1.50	0.447	0.0509	0.0507	-0.00025	#NUM!	471.3209

ตารางที่ ง-8 จลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์

เวลา (ชม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลิตร)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	q_t	q_e	pseudo first order		pseudo second order
							$q_e - q_t$	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t
1	1.0388	0.05	1.49	1.082	0.0195	0.0322	0.01277	-1.89398	51.3427
2	1.0337	0.05	1.46	1.042	0.0201	0.0322	0.01218	-1.91421	99.7106
4	1.0367	0.05	1.46	0.991	0.0225	0.0322	0.00978	-2.00950	178.1074
6	1.0373	0.05	1.46	0.901	0.0268	0.0322	0.00546	-2.26298	224.0120
8	1.0406	0.05	1.47	0.799	0.0322	0.0322	0.00000	#NUM!	248.1232
10	1.0353	0.05	1.47	0.795	0.0326	0.0322	-0.00036	#NUM!	306.7457
12	1.0333	0.05	1.47	0.788	0.0330	0.0322	-0.00076	#NUM!	363.6129
24	1.0381	0.05	1.47	0.789	0.0328	0.0322	-0.00056	#NUM!	731.7239

ตารางที่ ง-9 จลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน

เวลา (ชม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลิตร)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	q_t	q_e	pseudo first order		pseudo second order
							$q_e - q_t$	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t
1	1.0362	0.05	1.26	1.001	0.0125	0.0215	0.0090	-2.0451	80.0180
2	1.0382	0.05	1.27	0.987	0.0136	0.0215	0.0079	-2.1033	146.7468
4	1.0432	0.05	1.27	0.925	0.0165	0.0215	0.0050	-2.3031	241.9092
6	1.0436	0.05	1.27	0.821	0.0215	0.0215	0.0000	#NUM!	278.9220
8	1.0391	0.05	1.27	0.824	0.0215	0.0215	0.0001	-4.2908	372.7833
10	1.0359	0.05	1.25	0.801	0.0218	0.0215	-0.0003	#NUM!	458.0103
12	1.0351	0.05	1.27	0.811	0.0222	0.0215	-0.0007	#NUM!	541.2462
24	1.0443	0.05	1.27	0.821	0.0215	0.0215	0.0000	-4.8411	1116.4365

ตารางที่ ง-10 จลนพลศาสตร์การดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบไคโตซาน

เวลา (ชม.)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตร (ลิตร)	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	q_t	q_e	pseudo first order		pseudo second order
							$q_e - q_t$	$\log(q_e - q_t)$	t/q_t
1	1.0421	0.05	1.32	1.091	0.0108	0.0204	0.0095	-2.0200	92.3545
2	1.0445	0.05	1.32	1.067	0.0120	0.0204	0.0084	-2.0744	167.3378
4	1.0352	0.05	1.32	1.001	0.0152	0.0204	0.0051	-2.2899	262.3442
6	1.0445	0.05	1.32	0.891	0.0204	0.0204	0.0000	#NUM!	294.4464
8	1.0408	0.05	1.32	0.899	0.0201	0.0204	0.0003	-3.5060	398.6975
10	1.0394	0.05	1.32	0.888	0.0206	0.0204	-0.0002	#NUM!	484.9611
12	1.0429	0.05	1.32	0.887	0.0206	0.0204	-0.0002	#NUM!	583.0062
24	1.0419	0.05	1.32	0.886	0.0207	0.0204	-0.0003	#NUM!	1161.2879

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองพีเอชที่เหมาะสม

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดฟิวอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทราย
ธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 8 ชั่วโมง

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	pH ก่อน	pH หลัง	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	%removal _p	%removal _a	%removal _t
1	1.0370	4.03	6.43	1.46	0.301	1.54	77.84	79.38
	1.0341	6.00	7.25	1.46	0.412	1.96	69.82	71.78
	1.0418	7.06	7.38	1.46	0.402	2.38	70.09	72.47
	1.0351	8.03	7.58	1.46	0.536	3.33	59.96	63.29
	1.0413	10.00	8.33	1.46	0.838	3.84	38.76	42.60
2	1.0425	4.03	6.39	1.48	0.324	1.54	76.56	78.10
	1.0426	6.00	7.27	1.48	0.409	1.96	70.40	72.36
	1.0413	7.06	7.44	1.48	0.415	2.38	69.57	71.95
	1.0391	8.03	7.59	1.48	0.551	3.33	59.45	62.78
	1.0477	10.00	8.42	1.48	0.765	3.84	44.46	48.30
3	1.0360	4.02	6.41	1.67	0.338	1.54	78.20	79.74
	1.0455	6.01	7.26	1.67	0.474	1.96	69.65	71.61
	1.0461	7.02	7.42	1.67	0.521	2.38	66.44	68.82
	1.0412	8.01	7.52	1.67	0.633	3.33	58.76	62.09
	1.0399	10.01	8.46	1.67	0.878	3.84	43.58	47.42
เฉลี่ย	1.0385	4.03	6.41	1.54	0.321	1.54	77.56	79.10
	1.0407	6.00	7.26	1.54	0.432	1.96	69.95	71.91
	1.0431	7.05	7.41	1.54	0.446	2.38	68.60	70.98
	1.0385	8.02	7.56	1.54	0.483	3.33	65.22	68.55
	1.0430	10.00	8.40	1.54	0.793	3.84	44.55	48.39

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับฟิวอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายจากเตา
ฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 8 ชั่วโมง

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	pH ก่อน	pH หลัง	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	%removal _p	%removal _a	%removal _t
1	1.0431	4.03	6.56	1.61	0.73	1.54	53.12	54.66
	1.0401	6.00	7.35	1.61	0.84	1.96	45.87	47.83
	1.0449	7.06	7.58	1.61	0.91	2.38	41.10	43.48
	1.0425	8.03	7.77	1.61	0.94	3.33	38.28	41.61
	1.0431	10.00	8.53	1.61	1.12	3.84	26.59	30.43
2	1.0405	4.03	6.53	1.46	0.65	1.54	53.94	55.48
	1.0409	6.00	7.34	1.46	0.76	1.96	45.99	47.95
	1.0397	7.06	7.61	1.46	0.82	2.38	41.46	43.84
	1.0386	8.03	7.82	1.46	0.85	3.33	38.45	41.78
	1.0417	10.00	8.54	1.46	1.01	3.84	26.98	30.82
3	1.041	4.03	6.53	1.67	0.72	1.54	55.33	56.89
	1.0403	6.00	7.37	1.67	0.86	1.96	46.53	48.50
	1.0375	7.06	7.58	1.67	0.92	2.38	42.55	44.91
	1.0440	8.03	7.81	1.67	0.96	3.33	39.17	42.51
	1.0444	10.00	8.51	1.67	1.13	3.84	28.49	32.34
เฉลี่ย	1.0415	4.03	6.54	1.58	0.700	1.54	54.15	55.70
	1.0404	6.00	7.35	1.58	0.790	1.96	48.04	50.00
	1.0407	7.06	7.59	1.58	0.810	2.38	46.36	48.73
	1.0417	8.03	7.80	1.58	0.890	3.33	40.34	43.67
	1.0431	10.00	8.53	1.58	1.140	3.84	24.00	27.85

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดติดฟิวอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทราย
ธรรมชาติเคลือบไคโตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	pH ก่อน	pH หลัง	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	%removal _p	%removal _a	%removal _t
1	1.0406	4.03	5.32	1.70	0.950	1.54	42.58	44.12
	1.0470	6.02	6.30	1.70	1.090	1.96	33.92	35.88
	1.0469	7.02	7.41	1.70	1.210	2.38	26.44	28.82
	1.0450	8.03	7.82	1.70	1.320	3.33	19.02	22.35
	1.0450	10.01	8.21	1.70	1.430	3.84	12.04	15.88
2	1.0366	4.03	5.32	1.70	0.910	1.54	44.91	46.47
	1.0391	6.02	6.31	1.70	1.050	1.96	36.27	38.24
	1.0413	7.02	7.45	1.70	1.280	2.38	22.35	24.71
	1.0418	8.03	7.91	1.70	1.350	3.33	17.25	20.59
	1.0397	10.01	8.50	1.70	1.470	3.84	9.68	13.53
3	1.0366	4.03	5.38	1.70	0.890	1.54	46.09	47.65
	1.0391	6.02	6.33	1.70	1.100	1.96	33.32	35.29
	1.0397	7.02	7.41	1.70	1.290	2.38	21.76	24.12
	1.0418	8.03	7.85	1.70	1.370	3.33	16.07	19.41
	1.0413	10.01	8.60	1.70	1.480	3.84	9.09	12.94
เฉลี่ย	1.0379	4.03	5.34	1.70	0.917	1.54	44.53	46.08
	1.0417	6.02	6.31	1.70	1.080	1.96	34.50	36.47
	1.0426	7.02	7.42	1.70	1.260	2.38	23.52	25.88
	1.0429	8.03	7.86	1.70	1.347	3.33	17.45	20.78
	1.0420	10.01	8.44	1.70	1.460	3.84	10.27	14.12

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับฟิวอาร์เซนิกด้วยตัวกลางทรายจาก
เตาฟลูอิดไคซ์เบดเคลื่อนไค้โตซาน ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
ที่ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง

ครั้งที่	น้ำหนัก (กรัม)	pH ก่อน	pH หลัง	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	%removal _p	%removal _a	%removal _t
1	1.0413	4.03	5.42	1.46	0.840	1.54	40.93	42.47
	1.0383	6.00	6.41	1.46	0.980	1.96	30.92	32.88
	1.0418	7.06	7.46	1.46	1.070	2.38	24.33	26.71
	1.0384	8.03	7.98	1.46	1.150	3.33	17.90	21.23
	1.0440	10.00	8.78	1.46	1.250	3.84	10.54	14.38
2	1.0410	4.03	5.46	1.70	0.960	1.54	41.98	43.53
	1.0403	6.02	6.40	1.70	1.160	1.96	29.80	31.76
	1.0375	7.02	7.41	1.70	1.250	2.38	24.08	26.47
	1.0440	8.03	7.94	1.70	1.340	3.33	17.86	21.18
	1.0444	10.01	8.76	1.70	1.470	3.84	9.68	13.53
3	1.0373	4.03	5.47	1.70	0.990	1.54	40.20	41.76
	1.0409	6.02	6.38	1.70	1.110	1.96	32.74	34.71
	1.0405	7.02	7.41	1.70	1.280	2.38	22.35	24.71
	1.0415	8.03	7.91	1.70	1.350	3.33	17.25	20.59
	1.0433	10.01	8.92	1.70	1.480	3.84	9.09	12.94
เฉลี่ย	1.0399	4.03	5.45	1.62	0.930	1.54	41.04	42.59
	1.0398	6.01	6.40	1.62	1.083	1.96	31.16	33.13
	1.0399	7.03	7.43	1.62	1.280	2.38	18.61	20.99
	1.0413	8.03	7.94	1.62	1.350	3.33	13.34	16.67
	1.0439	10.01	8.82	1.62	1.440	3.84	7.26	11.11

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองแบลงก์ที่พีเอชต่างๆ เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลที่เกิดจากกระบวนการตกตะกอน โดยไม่มีการเติมตัวกลางดูดติดผิว ในน้ำสังเคราะห์อาร์เซนิก

pH ก่อน	pH หลัง	อาร์เซนิกเริ่มต้น (มก./ล.)	อาร์เซนิกที่เหลือ โดยไม่เติมตัวกลาง (มก./ล.)	%removal _p
4.03	4.23	1.46	1.44	1.54
6.00	6.10	1.46	1.43	1.96
7.06	7.21	1.46	1.43	2.38
8.03	8.17	1.46	1.41	3.33
10.00	9.98	1.46	1.40	3.84

หมายเหตุ

% removal_p = ร้อยละการกำจัด โดยการตกตะกอน

% removal_a = ร้อยละการกำจัด โดยการดูดติดผิว

% removal_t = ร้อยละการกำจัด โดยการตกตะกอนรวมกับการดูดติดผิว

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดติดผิว

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองหาค่าปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4 ระยะเวลา
เข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง

ชนิด	ครั้งที่ 1						ครั้งที่ 2						ครั้งที่ 3						เฉลี่ย					
	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal
IOCNS	1.4	0.1447	1.232	4.02	6.06	12.00	1.4	0.1434	1.223	4.02	6.05	12.64	1.41	0.1423	1.238	4.02	6.05	12.20	1.4	0.1435	1.231	4.02	6.05	12.07
	1.4	0.5054	0.789	4.02	6.32	43.64	1.4	0.5043	0.778	4.02	6.33	44.43	1.41	0.5034	0.799	4.02	6.33	43.33	1.4	0.5044	0.789	4.02	6.33	43.64
	1.4	0.7014	0.558	4.02	6.35	60.14	1.4	0.7011	0.578	4.02	6.34	58.71	1.41	0.7012	0.518	4.02	6.35	63.26	1.4	0.7012	0.551	4.02	6.35	60.64
	1.4	1.0146	0.348	4.02	6.45	75.14	1.4	1.0146	0.311	4.02	6.47	77.79	1.41	1.0143	0.276	4.02	6.46	80.43	1.4	1.0145	0.312	4.02	6.46	77.71
	1.4	1.5045	0.026	4.02	6.72	98.14	1.4	1.5075	0.032	4.02	6.73	97.71	1.41	1.5042	0.017	4.02	6.72	98.79	1.4	1.5054	0.025	4.02	6.72	98.21
	1.4	2.0312	0.011	4.02	7.32	99.21	1.4	2.0273	0.0114	4.02	7.32	99.19	1.41	2.0322	0.014	4.02	7.24	99.01	1.4	2.0302	0.012	4.02	7.29	99.14
IOCFBS	1.42	0.1616	1.319	4.02	6.19	7.11	1.4	0.1624	1.311	4.02	6.21	6.36	1.41	0.1627	1.337	4.02	6.18	5.18	1.41	0.1622	1.322	4.02	6.19	6.24
	1.42	0.5134	1.044	4.02	6.41	26.48	1.4	0.5156	1.038	4.02	6.42	25.86	1.41	0.5138	1.059	4.02	6.43	24.89	1.41	0.5143	1.047	4.02	6.42	25.74
	1.42	0.7083	0.862	4.02	6.47	39.30	1.4	0.7165	0.871	4.02	6.48	37.79	1.41	0.7128	0.872	4.02	6.48	38.16	1.41	0.7125	0.868	4.02	6.48	38.44
	1.42	1.0407	0.659	4.02	6.54	53.59	1.4	1.0401	0.632	4.02	6.53	54.86	1.41	1.0419	0.667	4.02	6.55	52.70	1.41	1.0409	0.653	4.02	6.54	53.69
	1.42	1.5182	0.389	4.02	6.82	72.61	1.4	1.5184	0.412	4.02	6.83	70.57	1.41	1.5184	0.392	4.02	6.84	72.20	1.41	1.5183	0.398	4.02	6.83	71.77
	1.42	2.0557	0.285	4.02	7.44	79.93	1.4	2.0499	0.281	4.02	7.43	79.93	1.41	2.0498	0.281	4.02	7.45	80.07	1.41	2.0518	0.282	4.02	7.44	80.00

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองหาค่าปริมาณตัวกลางดูดติดผิวที่เหมาะสมในการดูดติดผิวอาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 4 ระยะเวลา
เข้าสู่สมดุล 6 ชั่วโมง (ต่อ)

ชนิด	ครั้งที่ 1						ครั้งที่ 2						ครั้งที่ 3						เฉลี่ย					
	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal	อาร์เซนิก เริ่มต้น (มก./ล.)	น้ำหนัก (กรัม)	อาร์เซนิก ที่เหลือ (มก./ล.)	pH ก่อน	pH หลัง	%removal
CCNS	1.45	0.1478	1.352	4.03	4.11	6.76	1.49	0.1465	1.391	4.02	4.09	6.64	1.41	0.1476	1.318	4.04	4.12	6.52	1.45	0.1473	1.354	4.03	4.11	6.62
	1.45	0.5149	1.123	4.03	4.23	22.55	1.49	0.5182	1.131	4.02	4.23	24.09	1.41	0.5141	1.116	4.04	4.24	20.85	1.45	0.5157	1.123	4.03	4.23	22.55
	1.45	0.7104	0.988	4.03	4.28	31.86	1.49	0.7132	1.018	4.02	4.26	31.68	1.41	0.7073	0.958	4.04	4.28	32.06	1.45	0.7103	0.988	4.03	4.27	31.86
	1.45	1.0452	0.783	4.03	5.34	46.00	1.49	1.0459	0.812	4.02	5.36	45.50	1.41	1.0465	0.755	4.04	5.35	46.45	1.45	1.0459	0.783	4.03	5.35	46.00
	1.45	1.5175	0.532	4.03	5.64	63.31	1.49	1.5182	0.561	4.02	5.65	62.35	1.41	1.5215	0.531	4.04	5.61	62.34	1.45	1.5191	0.541	4.03	5.63	62.69
	1.45	2.0511	0.398	4.03	6.12	72.55	1.49	2.0523	0.421	4.02	6.13	71.74	1.41	2.0504	0.401	4.04	6.12	71.56	1.45	2.0513	0.407	4.03	6.12	71.93
CCFBS	1.41	0.134	1.325	4.01	4.17	6.03	1.41	0.1311	1.322	4.02	4.18	6.24	1.41	0.1339	1.352	4.02	4.18	4.11	1.41	0.132	1.333	4.02	4.18	5.46
	1.41	0.5121	1.124	4.01	4.31	20.28	1.41	0.5125	1.124	4.02	4.32	20.28	1.41	0.5182	1.115	4.02	4.3	20.92	1.41	0.512	1.121	4.02	4.31	20.50
	1.41	0.7198	1.011	4.01	4.39	28.30	1.41	0.7198	1.001	4.02	4.41	29.01	1.41	0.7198	0.973	4.02	4.42	30.99	1.41	0.720	0.995	4.02	4.41	29.43
	1.41	1.0462	0.792	4.01	5.45	43.83	1.41	1.0457	0.794	4.02	5.46	43.69	1.41	1.0459	0.824	4.02	5.47	41.56	1.41	1.046	0.803	4.02	5.46	43.05
	1.41	1.5203	0.578	4.01	5.82	59.01	1.41	1.5181	0.581	4.02	5.83	58.79	1.41	1.5191	0.569	4.02	5.82	59.65	1.41	1.519	0.576	4.02	5.82	59.15
	1.41	2.0518	0.433	4.01	6.21	69.29	1.41	2.0524	0.421	4.02	6.23	70.14	1.41	2.0529	0.402	4.02	6.21	71.49	1.41	2.053	0.419	4.02	6.22	70.28

ตารางที่ จ-2 แสดงผลการทดลองการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์

m	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C(mg/l)	x (mg)	x/m (mg/g)	Log(Ce)	Log(q)	1/(Ce)	1/(q)
0.1389	1.4	1.2310	0.1690	0.00845	0.060835	0.090258	-1.21585	0.812348	16.43787
0.5044	1.4	0.7890	0.6110	0.03055	0.060567	-0.10292	-1.21776	1.267427	16.51064
0.7012	1.4	0.5510	0.8490	0.04245	0.060539	-0.25885	-1.21796	1.814882	16.51826
1.0145	1.4	0.3130	1.0870	0.05435	0.053573	-0.50446	-1.27105	3.194888	18.66605
1.5054	1.4	0.0220	1.3780	0.0689	0.045769	-1.65758	-1.33943	45.45455	21.84906
2.0302	1.4	0.0120	1.3880	0.0694	0.034184	-1.92082	-1.46618	83.33333	29.2536

ตารางที่ จ-3 แสดงผลการทดลองการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไดซ์เบดเคลือบเหล็กออกไซด์

m	C ₀ (mg/l)	C _e (mg/l)	C(mg/l)	x (mg)	q (mg/g)	Log(Ce)	Log(q)	1/(Ce)	1/(q)
0.1622	1.45	1.322	0.1280	0.0064	0.039457	0.121231	-1.40387	0.75643	25.34375
0.5143	1.45	1.047	0.4030	0.02015	0.039179	0.019947	-1.40694	0.95511	25.52357
0.7125	1.45	0.868	0.5820	0.0291	0.040842	-0.06148	-1.38889	1.152074	24.48454
1.0409	1.45	0.653	0.7970	0.03985	0.038284	-0.18509	-1.41698	1.531394	26.12045
1.5183	1.45	0.398	1.0520	0.0526	0.034644	-0.40012	-1.46037	2.512563	28.86502
2.0518	1.45	0.282	1.1680	0.0584	0.028463	-0.54975	-1.54572	3.546099	35.13356

ตารางที่ ฉ-4 แสดงผลการทดสอบการดูดซับไอออนด้วยทรายธรรมชาติเคลือบไคโตซาน

m	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	C(mg/l)	x (mg)	q (mg/g)	Log(Ce)	Log(q)	1/(Ce)	1/(q)
0.1473	1.45	1.354	0.0960	0.0048	0.03259	0.131619	-1.48696	0.738552	30.6875
0.5157	1.45	1.123	0.3270	0.01635	0.03170	0.05038	-1.49888	0.890472	31.54128
0.7103	1.45	0.988	0.4620	0.0231	0.03252	-0.00524	-1.48783	1.012146	30.74892
1.0459	1.45	0.783	0.6670	0.03335	0.03189	-0.10624	-1.49639	1.277139	31.36132
1.5191	1.45	0.541	0.9090	0.04545	0.02992	-0.2668	-1.52405	1.848429	33.42354
2.0513	1.45	0.407	1.0430	0.05215	0.02542	-0.39041	-1.59477	2.457002	39.33461

ตารางที่ ช-5 แสดงผลการทดสอบการดูดซับไอออนด้วยทรายจากเตาฟลูอิดไคซ์เบดเคลือบไคโตซาน

m	C_0 (mg/l)	C_e (mg/l)	C(mg/l)	x (mg)	q (mg/g)	Log(Ce)	Log(q)	1/(Ce)	1/(q)
0.1324	1.41	1.333	0.0770	0.00385	0.02908	0.12483	-1.53643	0.750188	34.38961
0.5123	1.41	1.121	0.2890	0.01445	0.02821	0.049606	-1.54966	0.892061	35.45329
0.7198	1.41	0.995	0.4150	0.02075	0.02883	-0.00218	-1.54019	1.005025	34.68916
1.0459	1.41	0.803	0.6070	0.03035	0.02902	-0.09528	-1.53733	1.24533	34.46129
1.5192	1.41	0.576	0.8340	0.0417	0.02745	-0.23958	-1.56148	1.736111	36.43165
2.0524	1.41	0.419	0.9910	0.04955	0.02414	-0.37779	-1.61722	2.386635	41.42079

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองคอลัมน์ดูดติดผิว

ตารางที่ ช-1 ผลการทดลองในคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่
ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ
90 เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
2	2900	2.9	1.41	0.00147	0.0010	8.02	25
4	5850	5.85	1.41	0.00212	0.0015	7.85	25
6	8850	8.85	1.41	0.00185	0.0013	7.67	25
8	11650	11.65	1.41	0.00331	0.0023	7.57	25
10	14850	14.85	1.41	0.00311	0.0022	7.42	25
12	17690	17.69	1.41	0.00367	0.0026	7.34	25
14	20890	20.89	1.41	0.00482	0.0034	7.22	25
16	24010	24.01	1.41	0.0091	0.0065	7.15	25
24	26510	26.51	1.41	0.0167	0.0118	6.88	25
26	29410	29.41	1.41	0.0796	0.0565	6.63	25
30	32410	32.41	1.41	0.0916	0.0650	6.48	25
44	36950	36.95	1.41	0.129	0.0915	6.56	25
50	42450	42.45	1.41	0.178	0.1262	6.52	25
54	55450	55.45	1.41	0.245	0.1738	6.34	25
58	75950	75.95	1.41	0.298	0.2113	6.21	25
72	92450	92.45	1.41	0.377	0.2674	6.13	25
76	93250	93.25	1.41	0.478	0.3390	6.11	25

ตารางที่ ช-1 ผลการทดลองในคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่
ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดซับ
90 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้น เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้น ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
78	95250	95.25	1.41	0.536	0.3801	6.09	25
80	96150	96.15	1.41	0.612	0.4340	5.87	25
94	127250	127.25	1.41	0.834	0.5915	5.94	25
98	133170	133.17	1.41	1.023	0.7255	5.83	25
100	136170	136.17	1.41	1.122	0.7957	5.98	25
104	142370	142.37	1.41	1.267	0.8986	6.11	25
118	162370	162.37	1.41	1.296	0.9191	6.05	25
120	165240	165.24	1.41	1.318	0.9348	6.09	25
122	168040	168.04	1.41	1.345	0.9539	5.96	25
124	170540	170.54	1.41	1.389	0.9851	6.01	25
126	173020	173.02	1.41	1.398	0.9915	5.95	25
130	178440	178.44	1.41	1.405	0.9965	6.04	25

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว 60 เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
2	2900	2.9	1.41	0.00332	0.0024	8.11	25
4	5850	5.85	1.41	0.00389	0.0028	8.02	25
6	8850	8.85	1.41	0.00435	0.0031	7.95	25
8	11650	11.65	1.41	0.00612	0.0043	7.61	25
10	14850	14.85	1.41	0.00661	0.0047	7.72	25
12	17690	17.69	1.41	0.056	0.0397	7.47	25
14	20890	20.89	1.41	0.129	0.0915	7.23	25
16	24010	24.01	1.41	0.158	0.1121	7.26	25
24	26510	26.51	1.41	0.19	0.1348	7.17	25
26	29410	29.41	1.41	0.231	0.1638	6.91	25
30	32410	32.41	1.41	0.259	0.1837	6.52	25
44	36950	36.95	1.41	0.328	0.2326	6.41	25
50	42450	42.45	1.41	0.351	0.2489	6.59	25
54	55450	55.45	1.41	0.464	0.3291	6.44	25
58	75950	75.95	1.41	0.639	0.4532	6.22	25
72	92450	92.45	1.41	1.065	0.7553	6.08	25
76	93250	93.25	1.41	1.195	0.8475	6.19	25
78	95250	95.25	1.41	1.253	0.8887	6.08	25

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว
60 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
80	96150	96.15	1.41	1.275	0.9043	5.89	25
94	127250	127.25	1.41	1.289	0.9142	6.01	25
98	133170	133.17	1.41	1.344	0.9532	5.92	25
100	136170	136.17	1.41	1.366	0.9688	5.83	25
104	142370	142.37	1.41	1.378	0.9773	6.06	25
118	162370	162.37	1.41	1.375	0.9752	6.16	25
120	165240	165.24	1.41	1.398	0.9915	6.17	25
122	168040	168.04	1.41	1.406	0.9972	6.03	25
124	170540	170.54	1.41	1.407	0.9979	5.98	25
126	173020	173.02	1.41	1.397	0.9908	6.09	25
130	178440	178.44	1.41	1.409	0.9993	6.12	25

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว 30 เซนติเมตร

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
2	2900	2.9	1.41	0.00446	0.0032	8.17	25
4	5850	5.85	1.41	0.00797	0.0057	7.89	25
6	8850	8.85	1.41	0.0587	0.0416	8.07	25
8	11650	11.65	1.41	0.087	0.0617	7.77	25
10	14850	14.85	1.41	0.2	0.1418	7.56	25
12	17690	17.69	1.41	0.333	0.2362	7.32	25
14	20890	20.89	1.41	0.365	0.2589	7.28	25
16	24010	24.01	1.41	0.448	0.3177	7.22	25
24	26510	26.51	1.41	0.623	0.4418	7.04	25
26	29410	29.41	1.41	0.943	0.6688	6.98	25
30	32410	32.41	1.41	1.123	0.7965	6.75	25
44	36950	36.95	1.41	1.206	0.8553	6.56	25
50	42450	42.45	1.41	1.326	0.9404	6.62	25
54	55450	55.45	1.41	1.338	0.9489	6.51	25
58	75950	75.95	1.41	1.345	0.9539	6.33	25
72	92450	92.45	1.41	1.378	0.9773	6.21	25
76	93250	93.25	1.41	1.398	0.9915	6.17	25
78	95250	95.25	1.41	1.406	0.9972	6.05	25

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองคอลัมน์ดูดซับของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว
30 เซนติเมตร (ต่อ)

เวลาที่ เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C/C_0	pH หลัง	อัตราการ ไหล (มล./นาที)
80	96150	96.15	1.41	1.387	0.9837	6.12	25
94	127250	127.25	1.41	1.398	0.9915	5.88	25
98	133170	133.17	1.41	1.39	0.9858	6.04	25
100	136170	136.17	1.41	1.395	0.9894	6.11	25
104	142370	142.37	1.41	1.402	0.9943	6.01	25
118	162370	162.37	1.41	1.397	0.9908	5.92	25
120	165240	165.24	1.41	1.379	0.9780	5.96	25
122	168040	168.04	1.41	1.406	0.9972	5.98	25
124	170540	170.54	1.41	1.398	0.9915	6.02	25
126	173020	173.02	1.41	1.392	0.9872	5.86	25
130	178440	178.44	1.41	1.402	0.9943	5.92	25

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการคำนวณตามสมการ Thomas

ตารางที่ ซ-1 ผลการคำนวณคอลัมน์คู่ซ้ายของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความ
เข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว 90
เซนติเมตร

เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C_0/C	$(C_0/C)-1$	$\ln(C_0/C)-1$
2	2900	2.9	1.41	0.00147	959.1837	958.1837	6.8650
4	5850	5.85	1.41	0.00212	665.0943	664.0943	6.4984
6	8850	8.85	1.41	0.00185	762.1622	761.1622	6.6348
8	11650	11.65	1.41	0.00331	425.9819	424.9819	6.0520
10	14850	14.85	1.41	0.00311	453.3762	452.3762	6.1145
12	17690	17.69	1.41	0.00367	384.1962	383.1962	5.9485
14	20890	20.89	1.41	0.00482	292.5311	291.5311	5.6751
16	24010	24.01	1.41	0.0091	154.9451	153.9451	5.0366
24	26510	26.51	1.41	0.0167	84.4311	83.4311	4.4240
26	29410	29.41	1.41	0.0796	17.7136	16.7136	2.8162
30	32410	32.41	1.41	0.0916	15.3930	14.3930	2.6667
44	36950	36.95	1.41	0.129	10.9302	9.9302	2.2956
50	42450	42.45	1.41	0.178	7.9213	6.9213	1.9346
54	55450	55.45	1.41	0.245	5.7551	4.7551	1.5592
58	75950	75.95	1.41	0.298	4.7315	3.7315	1.3168
72	92450	92.45	1.41	0.377	3.7401	2.7401	1.0080
76	93250	93.25	1.41	0.478	2.9498	1.9498	0.6677
78	95250	95.25	1.41	0.536	2.6306	1.6306	0.4889

ตารางที่ ซ-1 ผลการคำนวณคอลัมน์คู่ซ้ายของตัวกลางทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความ
เข้มข้นอาร์เซนิกเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความสูงตัวกลางดูดติดผิว 90
เซนติเมตร (ต่อ)

เวลาที่เก็บ ตัวอย่าง (ชม.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (มล.)	ปริมาตร น้ำที่ผ่าน คอลัมน์ (ลิตร)	ความ เข้มข้นขา เข้า C_0 (มก./ล.)	ความ เข้มข้นขา ออก C (มก./ล.)	C_0/C	$(C_0/C)-1$	$\ln(C_0/C)-1$
80	96150	96.15	1.41	0.612	2.3039	1.3039	0.2654
94	127250	127.25	1.41	0.834	1.6906	0.6906	-0.3701
98	133170	133.17	1.41	1.023	1.3783	0.3783	-0.9721
100	136170	136.17	1.41	1.122	1.2567	0.2567	-1.3599
104	142370	142.37	1.41	1.267	1.1129	0.1129	-2.1816
118	162370	162.37	1.41	1.296	1.0880	0.0880	-2.4308
120	165240	165.24	1.41	1.318	1.0698	0.0698	-2.6621
122	168040	168.04	1.41	1.345	1.0483	0.0483	-3.0298
124	170540	170.54	1.41	1.389	1.0151	0.0151	-4.1918
126	173020	173.02	1.41	1.398	1.0086	0.0086	-4.7579
130	178440	178.44	1.41	1.405	1.0036	0.0036	-5.6384

ภาคผนวก ฅ
ผลการทดลองการฟื้นฟูสภาพ

ตารางที่ ฅ-1 ผลความเข้มข้นอาร์เซนิกที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการดูดซับอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 4.12

เก็บตัวอย่าง (ชม.)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก./ล.)	การฟื้นฟู									
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
		ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง
2	1.41	0.00267	8.46	0.00613	8.57	0.01976	8.43	0.01945	8.56	0.0291	8.54
4	1.41	0.00312	8.36	0.00876	8.42	0.01543	8.47	0.01873	8.46	0.1721	8.52
6	1.41	0.00435	8.21	0.01212	8.28	0.01242	8.31	0.1876	8.31	0.643	8.28
8	1.41	0.00612	8.02	0.0489	8.07	0.1678	8.12	0.453	8.15	0.923	8.12
10	1.41	0.00891	7.85	0.0992	7.91	0.421	7.89	0.763	7.98	1.211	8.01
12	1.41	0.01234	7.67	0.1589	7.82	0.943	8.01	1.092	7.61	1.345	7.69
24	1.41	0.01987	7.11	0.568	7.27	1.245	7.28	1.234	7.34	1.386	7.45
36	1.41	0.1223	6.83	1.078	6.93	1.349	7.02	1.35	7.23	1.356	7.23
48	1.41	0.345	6.62	1.256	6.87	1.379	6.92	1.392	7.06	1.287	6.97
56	1.41	0.568	6.59	1.378	6.61	1.385	6.69	1.403	6.72	1.387	6.32

ตารางที่ ฅ-1 ผลความเข้มข้นอาร์เซนิกที่เหลือในการทดลองการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการดูดซับอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 4.12 (ต่อ)

เก็บตัวอย่าง (ชม.)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก./ล.)	การฟื้นฟู									
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
		ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	pH หลัง
60	1.41	0.923	6.54	1.394	6.51	1.398	6.44	1.407	6.52	1.398	6.38
72	1.41	1.234	6.52	1.405	6.31	1.405	6.55	1.405	6.23	1.321	6.23
84	1.41	1.38	6.43	1.403	6.21	1.409	6.12	1.397	6.12	1.298	6.22
92	1.41	1.394	6.21	1.398	6.12	1.378	6.08	1.367	6.11	1.405	6.12
96	1.41	1.407	6.13	1.399	6.19	1.376	6.11	1.392	6.09	1.407	6.09
104	1.41	1.405	6.17	1.402	6.03	1.392	6.14	1.401	6.04	1.398	6.11

ตารางที่ ฅ-2 ผลของค่าร้อยละการดูดติดคาร์บอนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ในการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการดูดติดคาร์บอนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้น 4.12

เก็บตัวอย่าง (ชม.)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก./ล.)	การฟื้นฟู									
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
		ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
2	1.41	0.00267	99.81	0.00613	99.57	0.01976	98.60	0.01945	98.62	0.0291	97.94
4	1.41	0.00312	99.78	0.00876	99.38	0.01543	98.91	0.01873	98.67	0.1721	87.79
6	1.41	0.00435	99.69	0.01212	99.14	0.01242	99.12	0.1876	86.70	0.643	54.40
8	1.41	0.00612	99.57	0.0489	96.53	0.1678	88.10	0.453	67.87	0.923	34.54
10	1.41	0.00891	99.37	0.0992	92.96	0.421	70.14	0.763	45.89	1.211	14.11
12	1.41	0.01234	99.12	0.1589	88.73	0.943	33.12	1.092	22.55	1.345	4.61
24	1.41	0.01987	98.59	0.568	59.72	1.245	11.70	1.234	12.48	1.386	1.70
36	1.41	0.1223	91.33	1.078	23.55	1.349	4.33	1.35	4.26	1.356	3.83
48	1.41	0.345	75.53	1.256	10.92	1.379	2.20	1.392	1.28	1.287	8.72

ตารางที่ ฅ-2 ผลของค่าร้อยละการดูดติดอาร์เซนิกด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ในการฟื้นฟูสภาพคอลัมน์หลังจากที่ทำการดูดติดอาร์เซนิก ด้วยทรายธรรมชาติเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1.41 มิลลิกรัมต่อลิตร พิเอชเริ่มต้น 4.12 (ต่อ)

เก็บตัวอย่าง (ชม.)	ความเข้มข้น เริ่มต้น (มก./ล.)	การฟื้นฟู									
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 4		ครั้งที่ 5	
		ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)	ความเข้มข้น ขาออก (มก./ล.)	ประสิทธิภาพ (%)
56	1.41	0.568	59.72	1.378	2.27	1.385	1.77	1.403	0.50	1.387	1.63
60	1.41	0.923	34.54	1.394	1.13	1.398	0.85	1.407	0.21	1.398	0.85
72	1.41	1.234	12.48	1.405	0.35	1.405	0.35	1.405	0.35	1.321	6.31
84	1.41	1.38	2.13	1.403	0.50	1.409	0.07	1.397	0.92	1.298	7.94
92	1.41	1.394	1.13	1.398	0.85	1.378	2.27	1.367	3.05	1.405	0.35
96	1.41	1.407	0.21	1.399	0.78	1.376	2.41	1.392	1.28	1.407	0.21
104	1.41	1.405	0.35	1.402	0.57	1.392	1.28	1.401	0.64	1.398	0.85

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนลพรรณ ชันติกุลานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนมหาวิทยาลัยราชภัฏ จังหวัดสงขลา และสำเร็จการศึกษาระดับ
ปริญญาตรี หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาวิชา
เคมี-ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ในปีการศึกษา
2551 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย