

โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ
และวิเคราะห์หาปริมาณด้วยวิธี ICP-OES
Separation of As(III) and As(V) in water samples using strong base anion
exchange resin and determination by ICP-OES

ชื่อนิสิต นางสาวอรรชยา ศิลป์เจริญ และ นางสาวชญญาสร อมรศักดิ์โสภณ

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2557



การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ
และวิเคราะห์หาปริมาณด้วยวิธี ICP-OES

Separation of As(III) and As(V) in water samples using strong base anion exchange resin
and determination by ICP-OES



โดย

นางสาวอุรุษยา ศิลป์เจริญ

นางสาวชญญาสร อมรศักดิ์โสภณ

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

เรื่อง การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ และวิเคราะห์หาปริมาณด้วยวิธี ICP-OES

โดย นางสาวอุรุษยา ศิลป์เจริญ และ นางสาวธัญญาธร อมรศักดิ์โสภณ

ได้รับอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ



รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)
หัวหน้าภาควิชาเคมี
วันที่ 22 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

คุณภาพของงานเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ ดีมาก ดี พอใช้

ชื่อโครงการ การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบและวิเคราะห์
หาปริมาณด้วยวิธี ICP-OES

ชื่อนิสิตในโครงการ นางสาวอุรสา ศิลป์เจริญ

เลขประจำตัว 543 31616 23

นางสาวชญญาสร อมรศักดิ์โสภณ

เลขประจำตัว 543 31010 23

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ อิ่มยิ้ม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำ และศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซไนต์และอาร์เซเนตไอออน ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ ค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย และอัตราการไหลของสารละลาย ในงานวิจัยนี้ทดสอบการดูดซับแบบแบทช์ (batch) และแบบคอลัมน์ขนาดเล็ก (minicolumn) จากการทดสอบการดูดซับแบบแบทช์โดยใช้สารละลายอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้น 8 mg/L พบว่าค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายและเวลาที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุดคือ พีเอช 8 เป็นเวลา 120 นาที โดยจากทดลองพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบสามารถดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้ดีกว่าอาร์เซนิก(III) และจากการทดสอบแบบคอลัมน์ขนาดเล็ก พบว่ากรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M สามารถชะปริมาณอาร์เซนิก(V) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอัตราการไหลคือ 0.47 mL/min โดยน้ำตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ น้ำสระจุฬาฯ, น้ำบาดาล และน้ำเสียตัวอย่างจากแหล่งอุตสาหกรรม ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบให้ประสิทธิภาพที่ดีในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยวิธี ICP-OES

คำสำคัญ : อาร์เซไนต์, อาร์เซเนต, เรซินแลกเปลี่ยนไอออน, การแยก

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Title Separation of As(III) and As(V) in water samples using strong base anion exchange resin and determination by ICP-OES

Student names Miss Aurussaya Silpcharoen ID 543 31616 23

Miss Thunyasorn Amornsaksophon ID 543 31010 23

Advisor Assistant Professor Apichat Imyim, Ph.D.

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic year 2014

Abstract

A separation of arsenic(III) and arsenic(V) in water using strong base anion exchange resin (DOWEX MARATHON® A) for determination by Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) was studied. The effects of adsorption time, pH value and flow rate on the adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) were studied using batch and mini-column methods. Optimal conditions in batch adsorption experiments by using 8 mg/L of arsenic solution were at pH 8 and 120 minutes of adsorption time. The result attained revealed that the strong base anion exchange resin could adsorb arsenic(V) while arsenic(III) was passed through the column. Moreover, the effects of type and concentrations of eluent were studied by the mini-column method. The results showed that 0.1 M HCl could quantitatively elute arsenic(V) from the column and the optimal flow rate was 0.47 mL/min. Three types of water samples i.e. Chulalongkorn University Pond water, Ground water and Industrial wastewater were tested for arsenic speciation. The experimental results showed that the strong base anion exchange resin offered an efficient separation of arsenic(III) and arsenic(V) for determination by ICP-OES.

Keyword : Arsenite, arsenate, strong base anion exchange, separation

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เรื่อง การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบและวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-OES สำเร็จลุล่วงโดยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดีจาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวคิดวิธีการ และเสียสละเวลาอันมีค่า แก่ไขข้อบกพร่องของเนื้อหา ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ นายพรคนัย สารธนาบุตร และนายอิทธิยะ วิทยารักษ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาช่วยเหลือและสนับสนุนการดำเนินการศึกษาโครงการนี้จนสำเร็จด้วยดี



นางสาวอุรัสยา ศิลป์เจริญ

นางสาวชญญาสร อมรศักดิ์โสภณ

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย	2
1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 อาร์เซนิก	5
2.1.1 อาร์เซนิกในน้ำ	7
2.1.2 ผลกระทบต่อมนุษย์	7
2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน	8
2.2.1 ชนิดของเรซินและการสังเคราะห์	8
2.2.2 ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน	12
2.2.3 กฎของการเลือก	12
2.3 เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน	13
2.3.1 การทดลองในระบบแบบทซ์	13
2.3.2 การทดลองในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว	13
บทที่ 3 เครื่องมือ สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 สารเคมี	15
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.4 การเตรียมสารเคมี	16
3.5 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิกในระบบแบบทซ์	17
3.5.1 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับอาร์เซนิก(V)	17
3.5.2 ศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V)	18

3.5.3	ศึกษาการดูดซับของอาร์เซนิก(III)	19
3.5.4	ศึกษาพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V)	19
3.6	การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิก แบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว	20
3.6.1	การบรรจุคอลัมน์ขนาดจิ๋ว	20
3.6.2	การสอบเทียบอัตราการไหลของสารละลายโดยควบคุมด้วย peristaltic pump	20
3.6.3	ศึกษาหาตัวชะที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V)	21
3.6.4	ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นต่างๆ	22
3.6.5	ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำประจําพลา	23
3.6.6	ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล	23
3.6.7	ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง	23
3.7	การตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกด้วยเทคนิค ICP-OES	24
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	25
4.1	ศึกษาเวลาที่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V) ในระบบแบทช์	25
4.2	ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับ ด้วยระบบแบทช์	27
4.3	ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับ ด้วยระบบแบทช์	28
4.4	การศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริกในการชะอาร์เซนิก(V) ออกจากเรซินในระบบคอลัมน์	29
4.5	การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวมแตกต่างกัน ในระบบคอลัมน์	31
4.6	การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำประจําพลา ด้วยวิธีแบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว	35
4.7	การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล ด้วยวิธีแบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว	36
4.8	การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง ในระบบคอลัมน์	38
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	40
5.1	สรุปผลการทดลอง	40
5.2	ข้อเสนอแนะ	41
	เอกสารอ้างอิง	42
	ภาคผนวก	44
	ประวัติผู้วิจัย	55

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สารประกอบและสูตร โมเลกุลของอาร์เซนิกชนิดต่างๆ	5
3.1 ข้อมูลเรซิน DOWEX MARATHON® A	16
4.1 เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M	29
4.2 เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M	30
4.3 เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M, เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 และ 8 mg/L	33
4.4 เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำสระจุฬาฯ	35
4.5 ค่าสัญญาณของน้ำสระจุฬาฯ	35
4.6 เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล	36
4.7 ค่าสัญญาณของน้ำบาดาล	37
4.8 ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง	38
4.9 รายงานผลการวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกในน้ำด้วยวิธีทางเคมีวิเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา	39

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กรดอาร์เซนัส	5
2.2 กรดอาร์เซนิก	5
2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบอาร์เซนิก(V) ที่ค่าพีเอชต่างๆ	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบอาร์เซนิก(III) ที่ค่าพีเอชต่างๆ	7
2.5 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ระหว่างสารสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน	9
2.6 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิด DOWEX MARATHON® A	10
2.7 กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างสารละลายกับเรซิน	14
3.1 คอลัมน์ขนาดจิ๋วที่สำเร็จพร้อมใช้งาน	20
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับเวลาที่แตกต่างกัน	25
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาต่อปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ กับเวลา	27
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับค่าพีเอชที่แตกต่างกัน	27
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสม กับพีเอชที่แตกต่างกัน	28

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโลกของเราประสบปัญหามลภาวะทางน้ำที่มีสาเหตุมาจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้เกิดการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนัก ซึ่งมีความเป็นพิษสูง จึงส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และชีวิตความเป็นอยู่ของประชากรที่อาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำ อีกทั้งยังเพิ่มความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชากร ธาตุโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงและมักปนเปื้อนมากับแหล่งน้ำเสีย คือ “ธาตุอาร์เซนิก” หรือที่รู้จักกันดีว่า “สารหนู”

ธาตุอาร์เซนิกหรือสารหนูที่พบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำเสียนั้นไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นอาร์เซนิกชนิดใด เนื่องจากรูปแบบทางเคมีของอาร์เซนิกขึ้นอยู่กับค่าพีเอช [1] และแหล่งกำเนิดของน้ำเสีย จากงานวิจัยมีการวิเคราะห์พบว่าสารประกอบอินทรีย์ของอาร์เซนิกนั้นมีความเป็นพิษน้อยกว่าสารประกอบอนินทรีย์ของอาร์เซนิก โดยสารประกอบอนินทรีย์ของอาร์เซนิก แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ อาร์เซไนต์หรือAs(III) และ อาร์เซเนตหรือAs(V) ความเป็นพิษของอาร์เซนิกทั้ง 2 ชนิดนี้มีความแตกต่างกัน ส่งผลให้มีวิธีในการกำจัดที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งวิธีที่ใช้ในการกำจัด As(III) ใช้การออกซิไดซ์ As(III) ให้เป็น As(V) ก่อน จากนั้นจึงสามารถกำจัดอาร์เซนิกได้ ในขั้นต้นจึงควรเริ่มจากการแยก As(III) และ As(V) ออกจากกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณของอาร์เซนิกแต่ละชนิด

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอวิธีที่ใช้ในการแยก As(III) และ As(V) ออกจากกันหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่นิยมมากที่สุดคือ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เนื่องจากมีข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์สารได้ในปริมาณมาก รวมถึงสามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ของอาร์เซนิกได้ แต่มีข้อเสียคือ เครื่องมือมีความซับซ้อนต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญ เครื่องมือมีราคาแพง ไม่เหมาะสำหรับการทดลองที่ต้องมีการทำซ้ำหลายๆ ครั้ง และข้อสำคัญคือตัวตรวจวัดของเครื่อง HPLC ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุโลหะหนักได้ จึงจำเป็นต้องใช้ร่วมกันกับเครื่องมือในการวิเคราะห์ประเภทสเปกโทรเมตรี อาทิเช่น HPLC-ICP-OES, HPLC-AAS, HPLC-AES เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการแยกเพื่อนำไปสู่การพัฒนาวิธีวิเคราะห์อาร์เซนิกในน้ำที่ไม่มีความยุ่งยากและซับซ้อนของเครื่องมือในการวิเคราะห์ประเภทสเปกโทรเมตรี และเนื่องจากเครื่องมือในการวิเคราะห์

ประเภทสเปกโทรเมตรี ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีรูปแบบแตกต่างกัน จึงเริ่มจากการแยก As(III) และ As(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่และจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของอาร์เซนิกแต่ละรูปแบบด้วยวิธี ICP-OES

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาและพัฒนาการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ เพื่อสามารถตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำได้อย่างแม่นยำ และถูกต้องมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังใช้อุปกรณ์ที่หาง่าย มีราคาถูกและสามารถออกแบบขึ้นมาเองได้ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตามความต้องการ

ขอบเขตของงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการดูดซับค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายและอัตราการไหลของสารละลาย จากนั้นแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว รวมทั้งศึกษาภาวะที่เหมาะสมของชนิดและความเข้มข้นของตัวชะ จึงชะอาร์เซนิก(V) จากเรซิน ขั้นตอนสุดท้ายวิเคราะห์หาปริมาณของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธี ICP-OES

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกในน้ำ สามารถทำได้หลายวิธีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของอาร์เซนิกไอออนในสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ข้อจำกัดของวิธีวิเคราะห์ รีเอเจนต์และอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีผู้เสนอวิธีวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนิกในน้ำด้วยวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างออกไปดังนี้

ในปี 2000 Bissen และคณะ [2] ได้ทดลองแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในดินด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ Amberlite IRA-93 ในขั้นตอนผู้วิจัยสกัดดินให้อยู่ในรูปของเหลว จากนั้นทำให้อยู่ในภาวะความเป็นกรด (pH 1.4) ด้วยกรดอะซิติก ผ่านสารละลายกับเรซิน Amberlite IRA-93 ในคอลัมน์ ผลที่ได้พบว่าอาร์เซนิก(III) มีความสามารถในการดูดซับต่ำ ขณะที่อาร์เซนิก(V) มีความสามารถในการดูดซับอยู่บนเรซินได้ดี หลังจากนั้นทำการชะอาร์เซนิก(V) ด้วย 1 M NaOH แต่เนื่องจากสารละลายที่ถูกชะออกมานั้นมีไฮเดียมไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อ การวัดปริมาณอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) สำหรับเครื่อง AAS จึงต้องนำสารละลายที่ชะออกมาได้แลกเปลี่ยนไอออนบวกโดยผ่านเรซิน Amberlite 200 หลังจากนั้นวัดปริมาณของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธี GF-AAS และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธี HPLC-ICP-MS

ในปี 2003 Dominguez และคณะ [3] ได้รายงานการสังเคราะห์ไฟเบอร์แลกเปลี่ยนไอออนลบสำหรับอาร์เซนิก(V) โดยสังเคราะห์มาจาก vinylbenzyl chloride กับ divinylbenzene โดยใช้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 20 นาที จะได้เป็นโครงสร้าง oligomerization ที่อยู่ในรูปไฟเบอร์ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก จากนั้นนำไปเคลือบลงบน fiber glass ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เติม trimethylamine ที่มากเกินไป

ไปเพื่อให้กลายเป็นไฟเบอร์ที่อยู่ในรูปที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่ โดยพิจารณาผลจากการดูดซับของอาร์เซนิก(V) เปรียบเทียบระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออนลบของเรซินชนิดไฟเบอร์กับเรซินชนิดเม็ด ซึ่งผลที่ได้พบว่า เรซินชนิดไฟเบอร์มีพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนไอออนลบมากกว่าเรซินชนิดเม็ด และมีความว่องไวในการแลกเปลี่ยนไอออนลบในสภาวะไดนามิก อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ใหม่ได้

ในปี 2005 Deschamps และคณะ [4] ได้ทดลองกำจัดอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ในน้ำโดยใช้ตัวดูดซับ cFeMn ในขั้นตอนผู้วิจัยสังเคราะห์ตัวดูดซับจาก Fe-oxides กับ Mn-minerals ได้เป็นตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ cFeMn-f, cFeMn-g และ cFeMn-c โดยวิธีแบบเบทซ์และคอลลัมน์ ซึ่งวิธีแบบเบทซ์ใช้ตัวดูดซับเป็น cFeMn-f (particle size < 38 μm) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอช และเวลาที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ อาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ โดยตัวดูดซับ cFeMn-g ทำให้เกิดการออกซิเดชัน As(III) เป็น As(V) เนื่องจากอาร์เซไนต์มีความเป็นพิษที่สูงและยากต่อการกำจัด พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 3 มีความสามารถในการดูดซับอาร์เซไนต์และอาร์เซนิตเหมาะสมที่สุด ส่วนวิธีแบบคอลลัมน์ใช้ตัวดูดซับเป็น cFeMn-g (particle size 0.85 ± 0.42 mm) สำหรับน้ำประปาชนิดที่ 1 และ cFeMn-c (particle size 1.0 ± 0.5 mm) สำหรับน้ำประปาชนิดที่ 2 ซึ่งใช้ตัวชะ เป็น TCLP test โดยสามารถตรวจวัดปริมาณของอาร์เซนิกด้วย GF-AAS ส่วนธาตุอื่นๆที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ สามารถตรวจวัดปริมาณด้วย ICP-OES

ในปี 2005 An และคณะ [5] ได้ทดลองกำจัดอาร์เซนิตในน้ำดื่ม โดยใช้ Polymeric ligand exchanger(DOW 3N-Cu) เดิม DOW 3N นั้นมีความจำเพาะในการแลกเปลี่ยนฟอสเฟตไอออน ทางผู้วิจัยต้องการใช้พัฒนาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนนี้ ให้มีความจำเพาะต่อการแลกเปลี่ยนอาร์เซนิตไอออน จึงเติม Cu(II) ลงบน DOW 3N ได้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน DOW 3N-Cu ที่มีความจำเพาะต่อการแลกเปลี่ยนอาร์เซนิตไอออนได้ดีในสารละลายที่มีซัลเฟตไอออนเป็นตัวรบกวนต่อการแลกเปลี่ยนไอออน โดยผู้วิจัยทดลองเปรียบเทียบความสามารถของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง polymeric ligand exchanger (DOW 3N-Cu) กับ strong base anion exchanger (IRA 900 & IRA 958) โดยใช้วิธีแบบเบทซ์และคอลลัมน์ โดยจากวิธีแบบเบทซ์ศึกษาพีเอชที่ส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนอาร์เซนิตไอออนพบว่า มีเพียง DOW 3N-Cu ที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเข้าสู่สมดุลที่พีเอช 6.0-8.0 ส่วนวิธีแบบคอลลัมน์ศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนอาร์เซนิตไอออน โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างอาร์เซนิตไอออนและซัลเฟตไอออนที่ตรวจวัดปริมาณด้วย AAS จากการทดลองข้างต้น พบว่า DOW 3N-Cu มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนอาร์เซนิตไอออนได้ดีกว่า IRA 900 & IRA 958

ในปี 2007 Ronkart และ คณะ [6] ได้ทดลองแยกชนิดของอาร์เซนิกในน้ำด้วยวิธี HPLC-ICP-MS ในขั้นตอนแยกอาร์เซนิก 5 ชนิด ได้แก่ arsenobetain(AsBet), arsenite(As(III)), arsenate(As(V)), monomethylarsonic acid(MMAA^v) และ dimethylarsonic acid(DMAA^v) ด้วยวิธี Ion Chromatography พบว่ามีลำดับการแยกดังนี้ AsBet, DMAA, As(III), MMAA และ As(V) ตามลำดับ จากนั้นตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกทั้ง 5 ชนิด ด้วยวิธี ICP-MS ซึ่งทดลองในน้ำตัวอย่างหลากหลายชนิด และให้ค่า Limit of Detections (LODs) ใกล้เคียง 20 ng/L

ในปี 2007 Guo และคณะ [7] ได้ทดลองการดูดซับอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ในน้ำบาดาลด้วย siderite(SO) ทำวิธีแบบแบทช์และคอลัมน์ ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้ SO-C1, SO-C2 และ SCS(siderite-coated sand) ในวิธีแบบแบทช์ ผู้วิจัยศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับอาร์เซนิกพบว่าเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิกคือ 72 ชั่วโมง ส่วนวิธีแบบคอลัมน์ ผู้วิจัยศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ดังนี้ 1) ศึกษาการดูดซับของสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ที่ความเข้มข้นอย่างละ 250 $\mu\text{g/L}$ บนตัวดูดซับชนิด SO-C1 2) ศึกษาการดูดซับของอาร์เซนิกในน้ำประปา โดยเติมอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ที่ความเข้มข้นอย่างละ 100 $\mu\text{g/L}$ บนตัวดูดซับ SO-C2 3) ศึกษาการดูดซับอาร์เซไนต์โดยการกรองอาร์เซนิตที่มีความเข้มข้น 500 $\mu\text{g/L}$ บนตัวดูดซับ SCS

ในปี 2010 Barakat และคณะ [8] ได้ทดลองแยกอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่(Spectra/Gel IE 1 \times 8) ตรวจวัดหาปริมาณอาร์เซนิกด้วย ICP-OES โดยทดลองด้วยวิธีแบบแบทช์ ผู้วิจัยศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิตของเรซิน ได้แก่ พีเอช เวลา ความเข้มข้นของอาร์เซนิก และน้ำหนักรวมที่เหมาะสมของเรซิน พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการทดลองคือ ที่พีเอช 9 เป็นเวลา 30 นาที ความเข้มข้นของอาร์เซนิต 16 ppm ใช้เรซินหนัก 1 g จากการทดลองยังพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่นี้มีความสามารถในการดูดซับอาร์เซไนต์ต่ำ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแยกอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ด้วยภาวะที่เหมาะสมข้างต้น จากนั้นตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกด้วย ICP-OES

งานวิจัยที่ผ่านมามีการพัฒนาการแยกอาร์เซไนต์และอาร์เซนิตในน้ำด้วยวิธีและเทคนิคต่างๆกัน ซึ่งพบว่าในบางเทคนิคมีข้อเสีย เช่น เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์มีราคาสูง วิธีที่ใช้ในการทดลองมีความซับซ้อน บางวิธีไม่เหมาะสมสำหรับการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง และบางเทคนิคผู้วิจัยต้องมีความชำนาญสูง เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์เชื่อมเข้าด้วยกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงพัฒนาวิธีการแยกอาร์เซนิตและอาร์เซไนต์ในน้ำ ซึ่งมีวิธีและขั้นตอนในการทดลองที่ไม่ซับซ้อน อุปกรณ์และเครื่องมือราคาถูก อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงเหมาะสมสำหรับการทดลองที่ต้องทำซ้ำหลายๆ ครั้ง โดยเลือกใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดเบสแก่ DOWEX MARATHON® A ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว และตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกในน้ำด้วย ICP-OES

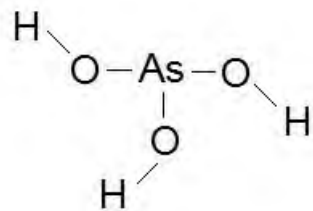
บทที่ 2

ทฤษฎี

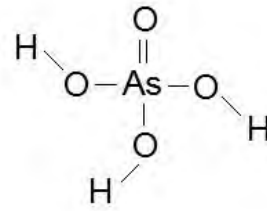
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อาร์เซนิก

อาร์เซนิกที่มีอยู่ทั่วไปบนโลก ประกอบด้วยเลขออกซิเดชันต่างๆ คือ -3, 0, 3 และ 5 ซึ่งอาร์เซนิกที่พบเจอเป็นส่วนมาก มักจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ หรือสารประกอบในรูปอาร์เซเนตและอาร์เซไนต์ โดยในน้ำที่มีออกซิเจนมักพบอาร์เซนิกปรากฏอยู่ในรูปสารประกอบอาร์เซเนต ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 5 แต่หากอยู่ภายใต้สภาวะที่มีการลดลงของออกซิเจน (ศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน < 200 mV) อาร์เซนิกจะปรากฏอยู่ในรูปสารประกอบอาร์เซไนต์ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 3 ซึ่งสารประกอบและสูตรโมเลกุลของอาร์เซนิกชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กรดอาร์เซไนต์



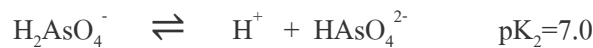
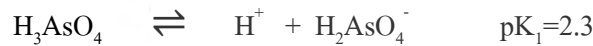
รูปที่ 2.2 กรดอาร์เซนิค

ตารางที่ 2.1 สารประกอบและสูตรโมเลกุลของอาร์เซนิกชนิดต่างๆ [9]

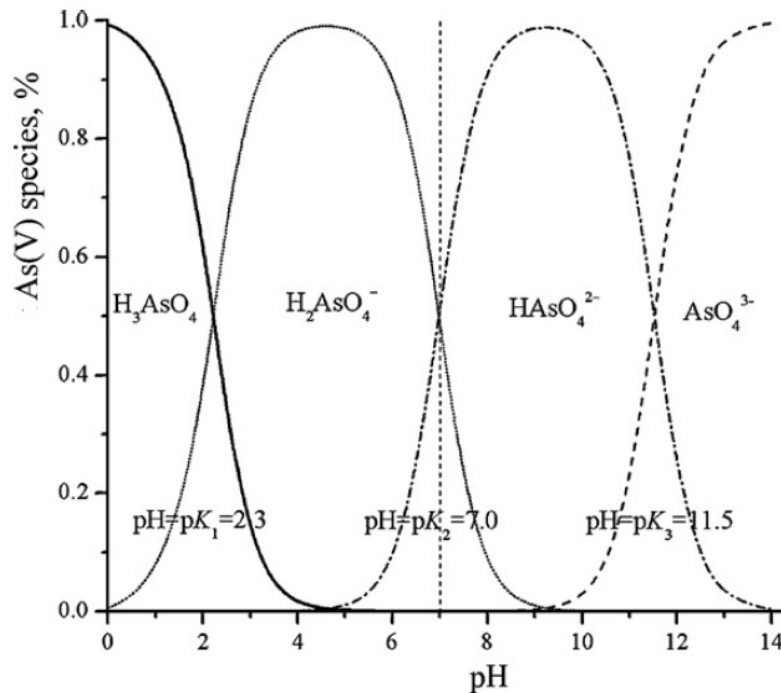
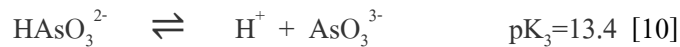
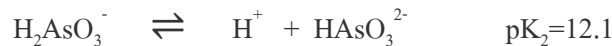
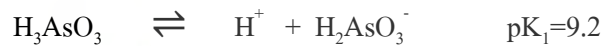
Compound	molecular formula
arsenic trioxide	As_2O_3
arsenic pentoxide	As_2O_5
arsenic sulfide	As_2S_3
dimethylarsenic acid (DMA)	$(CH_3)_2AsO(OH)_2$
monomethylarsonic acid (MMA)	$CH_3AsO(OH)_2$
lead arsenate	$PbHAsO_4$
potassium arsenate	KH_2AsO_4
potassium arsenite	$KAsO_2HAsO_2$

อาร์เซนิกต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ของน้ำ จากรูปที่ 2.3 ที่พีเอชต่ำกว่า 2.3 อาร์เซนิก(V) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป H_3AsO_4 เป็นหลัก ส่วนที่บริเวณช่วงพีเอช 2.3-7.0 นั้นอาร์เซนิก(V) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป H_2AsO_4^- เป็นหลัก ส่วนที่บริเวณช่วงพีเอช 7.0-11.5 นั้นอาร์เซนิก(V) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป HAsO_4^{2-} เป็นหลัก และที่พีเอช 11.5 ขึ้นไปอาร์เซนิก(V) อยู่ในรูป AsO_4^{3-} เป็นหลัก เช่นเดียวกับรูปที่ 2.4 ที่พีเอชต่ำกว่า 9.2 อาร์เซนิก(III) นั้นอยู่ในรูป H_3AsO_3 เป็นหลัก ส่วนที่ช่วงบริเวณพีเอช 9.2-12.1 อาร์เซนิก(III) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป H_2AsO_3^- เป็นหลัก ส่วนที่ช่วงพีเอช 12.1-13.4 นั้นอาร์เซนิก(III) อยู่ในรูป HAsO_3^{2-} เป็นหลัก และที่พีเอช 13.4 ขึ้นไปอาร์เซนิก(III) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป AsO_3^{3-} เป็นหลัก เนื่องจากเกิดสมดุลดังสมการ

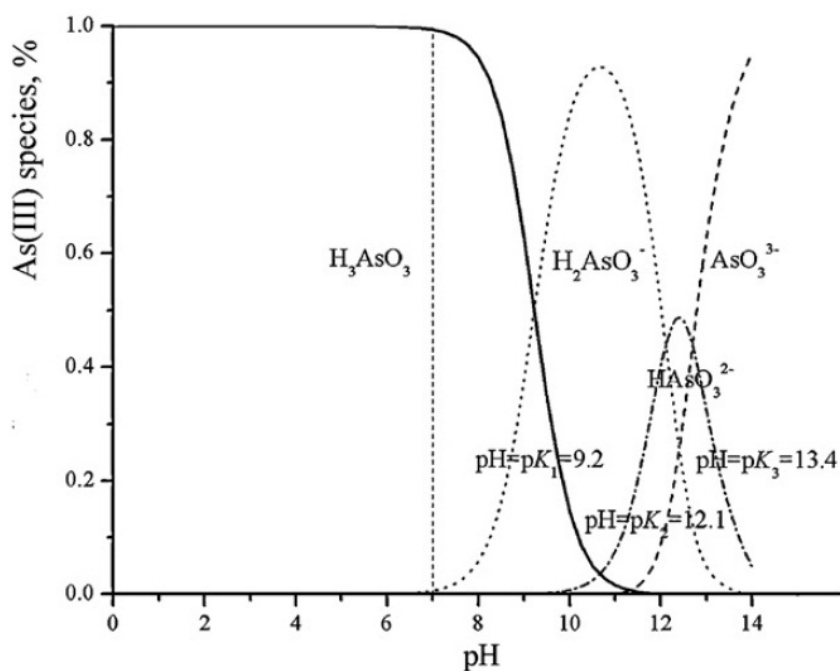
อาร์เซเนต (H_3AsO_4)



อาร์เซไนต์ (H_3AsO_3)



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบอาร์เซนิก(V) ที่ค่าพีเอชต่างๆ [11]



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารประกอบอาร์เซนิก(III) ที่ค่าพีเอชต่างๆ [11]

2.1.1 อาร์เซนิกในน้ำ

อาร์เซนิกในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (น้ำทะเล หรือมหาสมุทร) มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1 - 2 $\mu\text{g/L}$ ซึ่งความเข้มข้นอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม เช่น บริเวณพื้นที่ตามแหล่งธรรมชาติที่มีหินภูเขาไฟ แร่ธาตุในกลุ่มซิลไฟด์ จะมีอาร์เซนิกความเข้มข้นสูงถึง 12 mg/L ส่วนบริเวณที่มนุษย์อาศัยอยู่ เช่น เหมืองแร่ โรงงานเกษตรเคมี และน้ำในแหล่งพืคินจะมีความเข้มข้นเฉลี่ย 500 $\mu\text{g/L}$ และมีค่าสูงสุดถึง 25 mg/L โดยค่าเฉลี่ยความเข้มข้นอาร์เซนิกในตะกอนข้างต้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5 - 3000 mg/kg แต่ความเข้มข้นอาจสูงขึ้นในกรณีที่มีการเจือปน ซึ่งในกรณีนี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำ

2.1.2 ผลกระทบต่อมนุษย์

อาร์เซนิกเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและความจำเป็นทางกายภาพ แต่ในทางชีวภาพพบว่าอาร์เซนิกไม่มีความสำคัญและจำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์ เพราะอาร์เซนิกมีความเป็นพิษร้ายแรง และยากที่จะกำจัดออกจากร่างกาย พบว่าสารประกอบอาร์เซนิกที่มีความเป็นพิษสูงที่สุดคือ อาร์ซีน ตามมาด้วย อาร์เซไนต์ อาร์เซเนต และสารประกอบอินทรีย์ของอาร์เซนิก โดยกรดโมโนเมทิลอาร์โซนิค และกรดไดเมทิลอาร์เซนิกมีความเป็นพิษที่สูงกว่าอาร์เซเนต ปริมาณของอาร์เซนิกในร่างกายที่ส่งผลอันตรายถึงชีวิตมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 mg/kg ถึง 500 mg/kg ของน้ำหนักตัว [12]

อาร์เซนิกสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ทางการหายใจ การดูดซึมของลำไส้ และผ่านผิวหนัง เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะมีอาการขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอาร์เซนิกที่ร่างกายได้รับเข้าไป อาการขั้นต้นของผู้ที่ได้รับอาร์เซนิกเข้าสู่ร่างกาย คือ ปวดท้อง อาเจียน ท้องเสีย ปวดกล้ามเนื้อ หดแรง มีปื้นแดงเกิดขึ้นตามผิวหนัง จากนั้นในขั้นต่อไปจะมีอาการกล้ามเนื้อชา ปวดกล้ามเนื้อช่องท้อง และมีผื่นคันขึ้น หากร่างกายได้รับอาร์เซนิกเป็นปริมาณมาก และสะสมเป็นระยะเวลานาน อาจเกิดเป็นมะเร็งในร่างกายได้ [12]

2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

ไอออนเอ็กซ์เชนจ์ คือ การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในสารละลายกับไอออนในของแข็ง ที่สัมผัสกับสารละลายนั้น ซึ่งของแข็งนั้นไม่ละลายในสารละลาย โดยของแข็งที่นำมาใช้ ในการแลกเปลี่ยนไอออนมีหลายชนิดทั้งที่มีอยู่ตามธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้น มีการศึกษาค้นคว้าหาสารที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนตลอดจนสังเคราะห์สารอินทรีย์ที่เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรียกว่า เรซิน(resin) ซึ่งเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นนี้มีโครงสร้างมากมาย สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ ขึ้นอยู่กับขั้วและหมู่ฟังก์ชันในสารประกอบของเรซิน

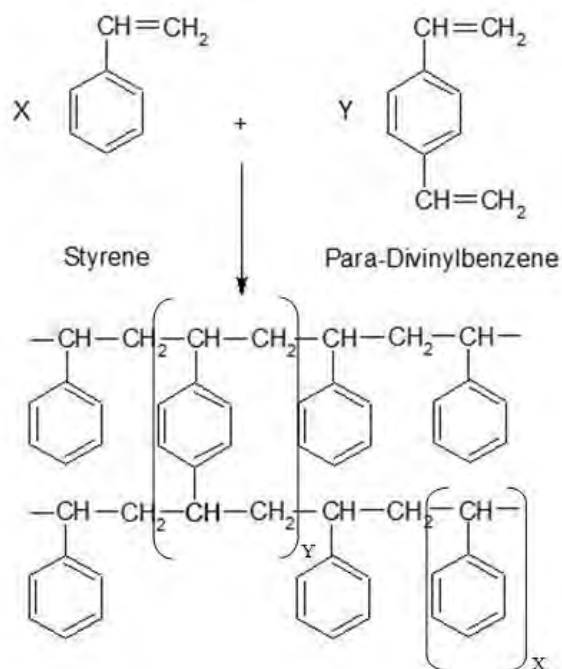
การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในการวิเคราะห์ไอออนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วนั้นยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หากผ่านตัวทำละลายที่เหมาะสม เรียกวิธีการนี้ว่า การสร้างใหม่ (regeneration)

2.2.1 ชนิดของเรซินและการสังเคราะห์

ไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน คือ สารพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (พอลิเมอร์) จากสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก (มอนอเมอร์) ต่อไปนี้

- styrene + divinylbenzene
- polymethacrylate
- methacrylic acid + divinylbenzene
- acrylic acid + divinylbenzene

ซึ่งกระบวนการเกิดสารพอลิเมอร์นี้ ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์สามารถเชื่อมโยงกันได้หลายแบบ (cross-linking) ทำให้ได้เรซินที่มีคุณสมบัติต่างๆ กัน เรซินที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ สารพอลิเมอร์ที่เตรียมจากมอนอเมอร์ระหว่างสารสไตรีนกับพาราไดไวนิลเบนซีน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการเกิดพอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ระหว่างสารสไตรีนกับพาราไดไวนิลเบนซีน

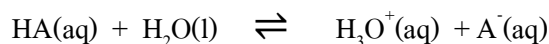
คุณสมบัติของเรซินที่เตรียมได้ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ในหมู่อะโรมาติก จึงสามารถแบ่งเรซินออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchangers)

เรซินชนิดนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอยู่ในหมู่อะโรมาติก เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟอนิกกับพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ของสไตรีน และไดไวนิลเบนซีน โดยหมู่ $-SO_3H$ จะเข้าไปอยู่ในหมู่อะโรมาติกของพอลิเมอร์ ทำให้เรซินที่ได้สามารถแลกเปลี่ยน H^+ กับไอออนบวกได้ดี จัดเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกชนิดแก่ (strong cation exchanger) และยังมีตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกชนิดอื่นๆ อีกมากมาย ที่แตกต่างกันตามหมู่ฟังก์ชันที่มีฤทธิ์เป็นกรด โดยหมู่ของกรดที่ใช้เป็นหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่

carboxylic acid	- COOH
phosphonic acid	- PO_3H^- หรือ - PO_3H_2
phosphinic acid	- HPO_2H^- หรือ - HPO_2H_2
phenolic acid	- OH
arsonic acid	- AsO_3H^- หรือ - AsO_3H_2
selenonic acid	- SeO_3H

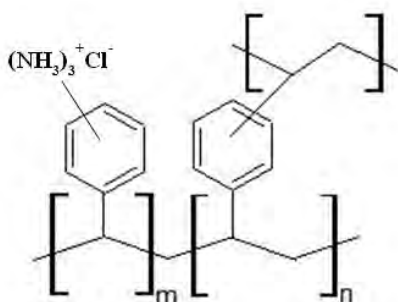
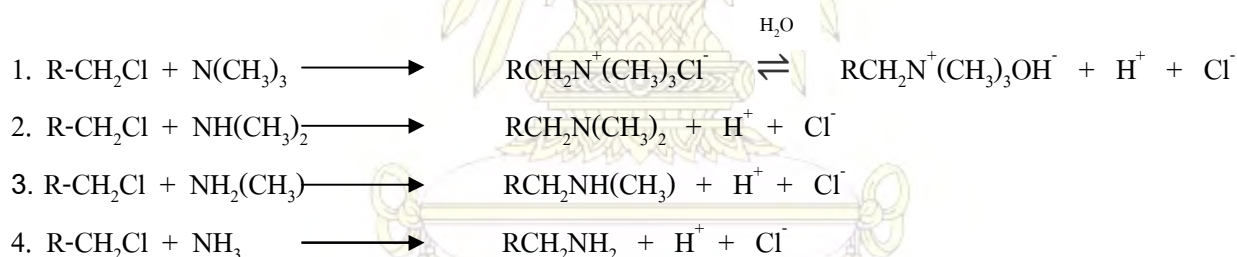
ตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่ได้จากหมู่ของกรดเหล่านี้จะมีความแรงน้อยกว่าหมู่ - SO₃H จึงจัดเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวกชนิดอ่อน (weak cation exchanger) ซึ่งความแรงของหมู่กรดแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับค่าคงที่การแตกตัวของกรดและค่าพีเอช ดังสมการ



ณ ภาวะสมดุลคำนวณค่าคงที่สมดุลของกรด ได้จาก $K_a = [\text{H}_3\text{O}^+][\text{A}^-] / [\text{HA}]$ ซึ่งความสามารถในการแตกตัวนี้ บ่งบอกความแรงของหมู่กรด ถ้าแตกตัวได้มากความเป็นกรดก็ยิ่งแรง เช่นเดียวกับค่าพีเอชซึ่งคำนวณได้จาก $\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$ ถ้ากรดแตกตัวให้ H_3O^+ ได้ดีจะส่งผลให้มีความเข้มข้นของ H_3O^+ สูงซึ่งแปรผกผันกับค่าพีเอช

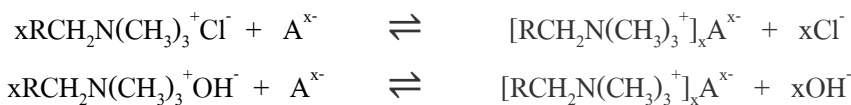
2. ชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion exchangers)

เรซินชนิดนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นเบสอยู่ในหมู่อะโรมาติก เตรียมได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ของเบสกับพอลิเมอร์ของสไตรีน กับไดไวนิลเบนซีนที่ทำคลอโรเมทิลเลต (chloro methylate) ถ้ากลุ่มของเบสคือ quaternary amine group (- CH₂N⁺(CH₃)₃) เรซินจะมีฤทธิ์เป็นเบสแก่ เรียกว่า ตัวแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดแก่ (strong anion exchanger) (รูปที่ 2.6) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดี ถ้ากลุ่มของเบสเป็น tertiary และ secondary amine (- CH₂N⁺H(CH₃)₂, - CH₂N⁺H₂(CH₃)) ความแรงของเบสจะน้อยลงตามลำดับ จัดเป็นเรซินความแรงขนาดกลาง (moderately basic anion exchanger) แต่ถ้ากลุ่มของเบสคือ เอมีน (- NH₂) จัดเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิดอ่อน (weak anion exchanger) มีปฏิกิริยาในการเตรียมดังนี้



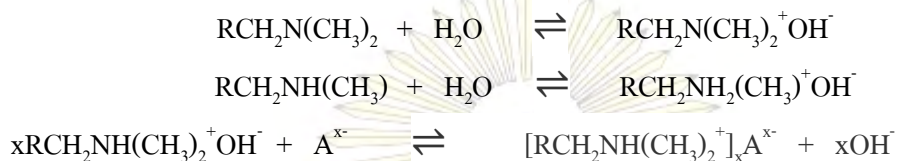
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิด DOWEX MARATHON® A

เรซินที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาที่ 1 มีความเป็นเบสมาก จึงสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนลบต่างๆ ได้ดีโดยไม่ขึ้นกับพีเอชของสารละลาย ดังสมการ



A^{x-} คือ ไอออนลบต่างๆ เช่น OH^- , SO_4^{2-} , NO_3^- ฯลฯ

เรซินที่เตรียมได้ตามปฏิกิริยาที่ 2 และ 3 มีความเป็นเบสปานกลางเมื่ออยู่ในสารละลายของน้ำ จะเกิดการแตกตัวได้ OH^- ที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนลบตัวอื่นได้ ดังสมการ



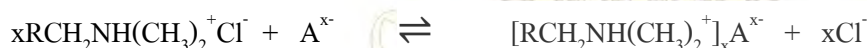
การแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย ในสารละลายที่มีพีเอชสูง (เป็นเบส) จะทำให้เรซินแตกตัวให้ OH^- ได้ไม่ดี ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนน้อย ส่วนในสารละลายที่มีพีเอชต่ำ (เป็นกรด) จะทำให้เรซินแตกตัวให้ OH^- ได้ดี ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง และได้เรซินที่อยู่ในรูปของเกลือ



รวม 2 ปฏิกิริยานี้สามารถเขียนได้ ดังนี้



เรซินที่อยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดีเช่นเดียวกับเรซินชนิดแก่ ดังสมการ



นั่นคือ ถ้าต้องการให้เรซินชนิดอ่อนปานกลางสามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดี สารละลายควรเป็นกรดหรือมีพีเอชต่ำ เพื่อเปลี่ยนเรซินให้อยู่ในรูปของคลอไรด์ที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ จะเห็นได้ว่าลักษณะของเรซินที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนลบมี 2 รูปแบบ คือ รูปของ OH^- (hydroxide form) และอยู่ในรูปของ Cl^- (chloride form)

เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดหรือเบสเพียงหมู่เดียวในอะโรมาติก เรียกว่า โมโนฟังก์ชันนอลเรซิน แต่ถ้ามีมากกว่า 1 ฟังก์ชัน เรียกว่า พอลิฟังก์ชันนอลเรซิน จากชนิดของเรซินที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อแบ่งตามความสามารถในการแลกเปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดของเรซิน (size of particles) มีผลต่ออัตราเร็วและการแลกเปลี่ยนไอออน การซึมผ่านของสารละลายออกจากคอลัมน์
2. ศักยภาพเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์จะมีผลทำให้เรซินมีความแข็ง การพองตัว และขนาดรูที่แตกต่างกัน
3. ความแข็งแรงของหมู่ฟังก์ชันมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของไอออนระหว่างเรซินกับสารละลาย

4. จำนวนหมู่ฟังก์ชันมีผลทำให้เรซินมีขนาดความจุที่ต่างกัน

2.2.2 ความจุของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange capacity)

เนื่องจากเรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแตกต่างกันได้มากมาย จึงจำเป็นต้องมีสิ่งแสดงคุณสมบัติของเรซินได้ คือ ขนาดของความจุ และความแรงของหมู่กรดและเบส การหาความจุจำเพาะของเรซินตามทฤษฎี คือ หาจำนวนหมู่ฟังก์ชันของกรดและเบสที่มีอยู่ในเรซินแห้ง 1 กรัม ส่วนการหาความจุจำเพาะในทางปฏิบัติคือหาจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้จริงในสภาวะของการทดลองนั้นๆ หรือหาจำนวนมิลลิกรัมสมมูลของไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนของเรซินแห้ง 1 กรัม ตามปกติค่าความจุในทางปฏิบัติจะน้อยกว่าทางทฤษฎี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ส่วนประกอบของเรซิน และสารละลายที่ต้องการแลกเปลี่ยนไอออน ในการทดลองจำเป็นต้องทราบความจุของเรซิน เพื่อบรรจุเรซินลงในคอลัมน์ให้เพียงพอแก่การแลกเปลี่ยนไอออนหรือไม่ให้มากเกินไปโดยไม่จำเป็น

2.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

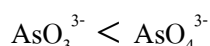
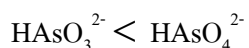
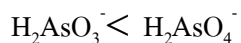
1. ชนิดของเรซิน
2. ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน
3. เฟสเคลื่อนที่หรือตัวชะ

เนื่องจากการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ออกจากกัน จึงจำเป็นต้องทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน โดยในการทดลองนี้นำสารละลายผสมของอาร์เซนิกระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ไอออนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่เป็นกลาง หรือมีประจุเหมือนกับหมู่ฟังก์ชันของเรซิน (quaternary amine) จะไม่ถูกดูดซับบนเรซิน และสามารถหลุดออกมาจากคอลัมน์ด้วยการพาของเฟสเคลื่อนที่ (ตัวชะ) ส่วนไอออนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีประจุตรงข้ามกับหมู่ฟังก์ชันของเรซินจะถูกดูดซับบนเรซิน โดยการแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออนของเรซิน ถ้าต้องการให้ไอออนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) หลุดออกมาจากคอลัมน์ต้องใช้สารละลายที่มีความแรง (ionic strength) และพีเอชที่เหมาะสมเป็นตัวชะ

เมื่อพิจารณาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำ ไอออนที่มีประจุสูงกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ตัวอย่างความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ดังนี้



เมื่อพิจารณาไอออนที่มีประจุเท่ากันในสารละลายของน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำ ไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่า ตัวอย่างความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ดังนี้



2.3 เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange technique)

วิธีในการแลกเปลี่ยนไอออนมีด้วยกัน 2 แบบ คือ เทคนิคในระบบเบตช์ (batch technique) และเทคนิคในระบบคอลัมน์ (column technique)

2.3.1 การทดลองในระบบเบตช์

เริ่มจากใส่เรซินลงในสารละลายที่ต้องการแยก คนหรือเขย่าจนแน่ใจว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงจุดสมดุล จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เฟสทั้ง 2 แยกออกจากกัน จะได้ไอออนที่ต้องการแยกอยู่ในเฟสของเรซิน วิธีกรรมวิธีจำเป็นต้องคำนวณหาปริมาณของเรซินที่ใช้ให้เพียงพอสำหรับการแยก และสัดส่วนของปริมาณไอออนในเรซินต่อปริมาณไอออนในสารละลาย (อัตราส่วนของการกระจาย) ต้องมีค่าสูง

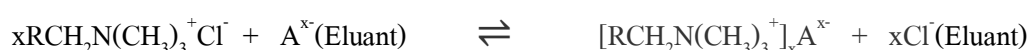
โดยวิธีแบบเบตช์นั้นไม่ค่อยได้รับความนิยมในการทดลอง เนื่องจากเรซินไม่สามารถดูดซับไอออนในสารละลายได้ทั้งหมด เพราะวิธีแบบเบตช์ใช้การเขย่าเพื่อให้เรซินกระจายตัวอยู่ในสารละลายและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลาย แต่การเขย่านี้มีผลเสีย คือ เรซินจะแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายได้ไม่ทั่วถึง ทำให้อัตราส่วนของการกระจายมีค่าต่ำ ดังนั้นเทคนิคที่ให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีกว่า คือ วิธีแบบคอลัมน์

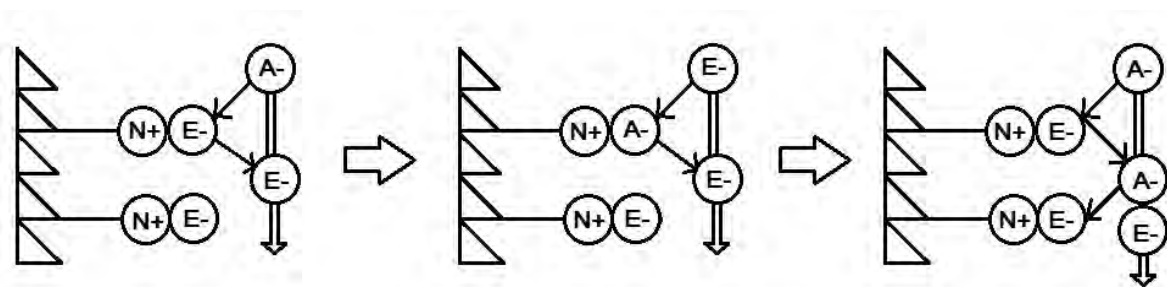
2.3.2 การทดลองในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

เทคนิคการทดลองในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋วนี้ ใช้คอลัมน์ที่มีขนาดสั้น และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์เล็ก ใช้ปั๊มเป็นตัวทำให้สารละลายเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์

เทคนิคนี้ให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดีขึ้น โดยการเพิ่มอัตราการไหลของปั๊ม และใช้เวลาในการแยกสั้น เนื่องจากปั๊มให้ความดันพาสารละลายเคลื่อนผ่านเรซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ เปรียบเทียบกับระบบคอลัมน์แบบดั้งเดิมที่คอลัมน์มีขนาดยาว เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ สารละลายเคลื่อนผ่านด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้ใช้เวลาในการแยกนาน แต่การเพิ่มอัตราการไหลสูงเกินไปก็อาจส่งผลเสีย เพราะคอลัมน์ขนาดจิ๋วรับแรงดันได้จำกัด จึงควรเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมกับการทดลอง

สมการแสดงการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างสารละลายกับเรซิน คือ





รูปที่ 2.7 แสดงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างสารละลายกับเรซิน

โดย A^- คือ ไอออนลบที่ต้องการวิเคราะห์

E^- คือ ไอออนลบของตัวชะ

จากรูปที่ 2.7 แสดงกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างสารละลายกับเรซิน โดยไอออนลบในสารละลายจะแลกเปลี่ยนไอออนลบกับแคตไอออนของเรซิน ซึ่งไอออนที่มีประจุน้อยกว่าจะหลุดออกจากคอลัมน์เป็นอันดับแรก จากนั้นไอออนที่มีประจุมากกว่าจึงหลุดออกมาเป็นลำดับถัดไป ซึ่งเป็นไปตามปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (ข้อ 2.2.3)

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือ สารเคมี อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องเขย่า VELP SCINTIFICA ROTAS68 30 rpm
2. เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง DENVERIN STRVMENT (SI-234 max 230 g d = 0.1 mg)
3. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง METTLER TOLEDO
4. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ AEVANTEC MFS, Inc.(Filter holder 47 mm. area 9.6 cm²)
5. peristaltic pump MODEL ISM 827, ISMATEC
6. เครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) iCAP 6500 DUO,Thermo Scientific

3.2 สารเคมี

1. Sodium (meta)Arsenite (NaAsO₂, Sigma-Aldrich)
2. Arsenic Standard Solution 1000 mg/L (H₃AsO₄, Merck)
3. Milli Q Water
4. DI Water
5. Sodium Hydroxide (NaOH, Merck)
6. Hydrochloric Acid (HCl 37%, Merck)
7. Nitric Acid (HNO₃ 65%, Merck)
8. Water Samples (Chulalongkorn Pond Water, Ground Water, Industrial wastewater)
9. Strong Base Anion Resin (Cl⁻ form, DOWEX MARATHON® A CAS 069011-19-4)

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเรซิน DOWEX MARATHON® A (Styrene-divinylbenzene Copolymer) [13]

Properties	
Total exchange capacity, min.	1.3 eq/l
Shipping weight	670 g/l
Recommended Operating Conditions	
Maximum operating temperature:	100°C (212°F)
pH range	0-14
Flow rate:	
Service/fast rinse	5-60 m/h
Co-current regeneration/displacement rinse	1-10 m/h
Counter current regeneration/displacement rinse	5-20 m/h
Regenerant: Type	2-5% NaOH
Temperature	50°C (122°F)
Mean particle size	575±50 µm

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน (VERTICLEAM)
2. บีกเกอร์ขนาด 5, 10, 25, 100 และ 250 mL
3. กระดาษกรอง
4. กรวยแก้ว
5. หลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด
6. หลอดทดลองแก้ว
7. กระจกนาฬิกา
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ขวดรูปชมพู่
10. ขวดปรับปริมาตร
11. ขวดน้ำกลั่น
12. สายยางพีวีซีแบบใส
13. ช้อนตักสาร
14. จุกพลาสติก
15. หลอดหยดสาร
16. ไมโครปิเปต
17. หลอดฉีดยา (NIPRO 5 mL)

3.4 การเตรียมสารละลาย

1. เตรียมสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 100 mL

จากสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 1000 mg/L ปิเปตสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 1000 mg/L จำนวน 10 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วเก็บในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด แช่ไว้ในตู้เย็น

2. เตรียมสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 8 mg/L ปริมาตร 500 mL

จากสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L มา 40 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 500 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3. เตรียมสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 1000 mg/L ปริมาตร 1000 mL

ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ NaAsO_2 (M.W. = 129.91 g) 1.7321 g ละลายด้วยน้ำ Milli Q ในขวดกำหนด ปริมาตร 1000 mL หลังจากนั้นหยด HCl 1% w/w 1-2 หยด แล้วเก็บในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด แช่ไว้ในตู้เย็น

4. เตรียมสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 8 mg/L ปริมาตร 500 mL

จากสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 100 mg/L ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 100 mg/L มา 40 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 500 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

5. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 50 mL

เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M จากกรดไฮโดรคลอริก 37% โดยหยดกรดไฮโดรคลอริก ประมาณ 0.38 mL ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 mL บรรจุลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

6. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 M ปริมาตร 50 mL โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 g ใส่ลงบีกเกอร์ เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 50 mL คนจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายหมด ทิ้งไว้ให้เย็น บรรจุลงในขวดพลาสติกที่มีฝาปิด

7. เตรียมสารละลายกรดไนตริก 1% w/w

เตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1% จากกรดไนตริก 65% โดยหยดกรดไนตริกประมาณ 1 mL ลงใน บีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 100 mL

8. เตรียมน้ำเสียตัวอย่าง

นำน้ำเสียตัวอย่างปริมาณ 100 mL มาผ่านการกรองสุญญากาศ หลังจากนั้นทำการเจือจางน้ำเสียตัวอย่างให้ มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกรวมลดลง 10 เท่า โดยปิเปตน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านการกรองสุญญากาศมา 10 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน

3.5 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิก ในระบบแบทช์

3.5.1 ศึกษาเวลาที่ใช้ในการดูดซับอาร์เซนิก(V)

1) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด DOWEX MARATHON® Aหนัก 0.0100 g ใส่ในหลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด จำนวน 36 หลอด

2) นำสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 8 mg/L ปรับค่าพีเอชให้มีค่าใกล้เคียง 9 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

3) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 8 mg/L ที่พีเอช 9 ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุเรซินไว้ (เริ่มจับเวลาทันทีที่สารละลายสัมผัสกับเรซิน)

4) ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการดูดซับอาร์เซนิก(V) ที่เวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ 300 นาที โดยในแต่ละช่วงเวลาทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

5) นำหลอดทดลองพลาสติกที่ได้จากข้อที่ 3) เข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลาตามที่ได้กำหนดไว้ในขั้นต้น

6) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองสารละลายออกจากเรซินด้วยตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน โดยใช้หลอดฉีดยา นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

7) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับเวลาในการทดลอง เลือกเวลาที่เหมาะสมของปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ คือเวลาที่กราฟเริ่มเข้าสู่สมดุล

3.5.2 ศึกษาค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V)

1) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด DOWEX MARATHON® Aหนัก 0.0100 g ใส่ในหลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด จำนวน 30 หลอด

2) นำสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 8 mg/L ปรับค่าพีเอชให้มีค่าใกล้เคียงตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

3) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 8 mg/L ที่พีเอช 2-11 ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุเรซินไว้ (เริ่มจับเวลาทันทีที่สารละลายสัมผัสกับเรซิน)

4) ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการดูดซับอาร์เซนิก(V) ที่พีเอช 2-11 โดยในแต่ละช่วงพีเอช ทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

5) นำทดลองหลอดพลาสติกที่ได้จากข้อที่ 3) เข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 120 นาที (เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับอาร์เซนิก(V))

6) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองสารละลายออกจากเรซินด้วยตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน โดยใช้หลอดฉีดยา นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

7) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับพีเอช เลือกพีเอชที่เหมาะสมของปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ คือพีเอชที่กราฟเริ่มเข้าสู่สมดุล

3.5.3 ศึกษาการดูดซับของอาร์เซนิก(III)

- 1) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด DOWEX MARATHON® Aหนัก 0.0100 g ใส่ในหลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด จำนวน 30 หลอด
- 2) นำสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 8 mg/L ปรับค่าพีเอชให้มีค่าใกล้เคียงตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- 3) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 8 mg/L ที่พีเอช 2-11 ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุเรซินไว้ (เริ่มจับเวลาทันทีที่สารละลายสัมผัสกับเรซิน)
- 4) ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการดูดซับอาร์เซนิก(III) ที่พีเอช 2-11 โดยในแต่ละช่วงพีเอช ทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง
- 5) นำหลอดทดลองพลาสติกที่ได้จากข้อที่ 3) เข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 120 นาที (เวลาที่มีการดูดซับอาร์เซนิก(V) ดีที่สุด)
- 6.) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองสารละลายออกจากเรซินด้วยตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน โดยใช้หลอดดูดยา นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง
- 7) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณอาร์เซนิก(III) ที่ถูกดูดซับ จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับพีเอช เปรียบเทียบช่วงพีเอชที่ส่งผลต่อการดูดซับอาร์เซนิก(III)กับอาร์เซนิก(V)

3.5.4 ศึกษาพีเอชที่มีผลต่อการดูดซับของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V)

- 1) เตรียมสารละลายอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวมเป็น 8 mg/L (อาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 4 mg/L และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 4 mg/L) ปริมาตร 250 mL จากสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 100 mg/L และสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L โดยปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L มาอย่างละ 10 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 250 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน
- 2) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิกผสมความเข้มข้น 8 mg/L ปริมาตร 50 mL ใส่บีกเกอร์ นำไปปรับค่าพีเอชให้มีค่าใกล้เคียง 7, 8, 9 และ 10 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- 3) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิด DOWEX MARATHON® Aหนัก 0.0100 g ใส่ในหลอดทดลองพลาสติกที่มีฝาปิด จำนวน 12 หลอด
- 4) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิกผสมความเข้มข้น 8 mg/L ที่พีเอช 7-10 ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่บรรจุเรซินไว้ (เริ่มจับเวลาทันทีที่สารละลายสัมผัสกับเรซิน)

5) ในการทดลองนี้ทำการศึกษาการดูดซับอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่พีเอช 7-10 โดยในแต่ละช่วงพีเอช ทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

6) นำหลอดทดลองพลาสติกที่ได้จากข้อที่ 4) เข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 120 นาที (เวลาที่มีการดูดซับอาร์เซนิก(V) ดีที่สุด)

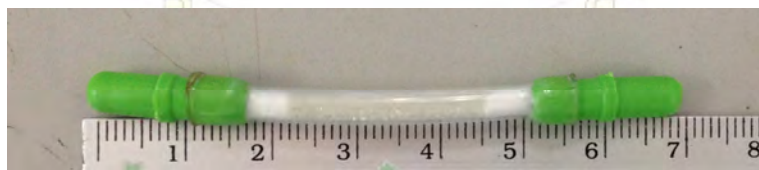
7) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองสารละลายออกจากเรซินด้วยตัวกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 ไมครอน โดยใช้หลอดฉีดยา นำสารละลายที่ได้จากการกรองไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลื่ออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

8) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาปริมาณอาร์เซนิกผสมในสารละลาย จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิกผสมในสารละลายกับพีเอช เพื่อศึกษาความสามารถในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ค่าพีเอช 7-10

3.6 การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิก ด้วยคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

3.6.1 การบรรจุคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

- 1) ตัดสายยางพีวีซีแบบใสเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3 mm ให้มีความยาว 7 cm
- 2) อุดปลายสายยางด้วยสำลีขนาดพอประมาณ
- 3) ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (4 ตำแหน่ง) ของเรซินหนัก 0.100 g
- 4) บรรจุเรซินลงในสายยางที่ปลายข้างหนึ่งอุดสำลีไว้แล้ว จากนั้นอุดสำลีที่ปลายสายยางอีกด้าน
- 5) นำจุกพลาสติกปิดปลายสายยางทั้ง 2 ข้างให้แน่น จะได้คอลัมน์ขนาดจิ๋ว ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 คอลัมน์ขนาดจิ๋วที่สำเร็จพร้อมใช้งาน

3.6.2 การสอบเทียบอัตราการไหลของสารละลายโดยควบคุมด้วย peristaltic pump

ในการทดลองหาอัตราการไหลทำได้ดังนี้

- 1) เตรียมน้ำกลั่น 10 mL ใส่หลอดทดลอง 3 หลอด
- 2) ต่อคอลัมน์ขนาดจิ๋วเข้ากับเครื่อง peristaltic pump จากนั้นนำน้ำกลั่นผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว
- 3) เลือกอัตราเร็วการหมุนของลูกรีดแต่ละระดับ (อัตราการไหลต่ำสุดที่ปั๊มทำงานได้ คือ 0.5 mL/min)
- 4) คำนวณอัตราการไหลในหน่วย mL/min โดยหาได้จากปริมาตร 10 mL ต่อเวลาที่สารละลายผ่านปั๊ม
หมด

5) เลือกอัตราการไหลที่มีค่าใกล้เคียง 0.5 mL/min

โดยจากการทดลองข้างต้น พบว่า peristaltic pump ที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราการไหล 0.47 mL/min ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการไหลที่เลือกใช้ในการแยกอาร์เซนิก(III) และ อาร์เซนิก(V)

3.6.3 ศึกษาหาตัวชะที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V)

1) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M ปริมาตร 50 mL ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่ความเข้มข้นละ 3 หลอด

2) เตรียมสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M ปริมาตร 50 mL ปิเปตสารละลายกรดไนตริกปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติกที่ความเข้มข้นละ 3 หลอด

3) เตรียมสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 4 mg/L ปริมาตร 250 mL โดยปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ปรับค่าพีเอชให้ใกล้เคียง 8 โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 4 mg/L ปริมาตร 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด

4) ต่อกอลัมน์ขนาดจิ๋วเข้ากับเครื่อง peristaltic pump จากนั้นนำสารละลายอาร์เซนิก(V) ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

5) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ชะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

6) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 3) และ 4)

7) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 M ชะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

8) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 3) และ 4)

9) นำสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M ชะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

10) ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 3) และ 4)

11) นำสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M ชะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

12) นำสารละลายที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ ไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

13) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M และของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M เพื่อศึกษาตัวชะที่มีความเหมาะสมในการชะอาร์เซนิก(V)

3.6.4 ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

1) เตรียมสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 mg/L (อาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 2 mg/L และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 2 mg/L) ปริมาตร 50 mL โดยปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาณ 1 mL และปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาณ 1 mL ลงในบีกเกอร์ ปรับค่าพีเอชให้ใกล้เคียง 8 จากนั้นเทลงขวดปรับปริมาตรขนาด 50 mL สะสารละลายผสมอาร์เซนิกและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ปิเปตสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 4 mg/L ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด

2) เตรียมสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 8 mg/L และสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) โดยวิธีการเตรียมอ้างอิงได้จากข้อที่ 1)

3) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 mL ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 9 หลอด

4) ต่อคอลัมน์ขนาดจิ๋วเข้ากับเครื่อง peristaltic pump

5) นำสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

6) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M สะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min

7) นำสารละลายที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ ไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

8) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 และ 8 mg/L เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 และ 8 mg/L โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ

3.6.5 ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำประจําพลา

ในขั้นนี้ต้องการเตรียมน้ำประจําพลา ที่มีอาร์เซนิกความเข้มข้นรวม 4 mg/L

1) เก็บน้ำจากสระจําพลา จากนั้นนำไปผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ

2) ปิเปตสารละลายอาร์เซนิก(III) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาณ 0.5 mL และสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 100 mg/L ปริมาณ 0.5 mL ลงในบีกเกอร์ ปรับค่าพีเอชให้ใกล้เคียง 8 จากนั้นเทลงขวดปรับปริมาตร สะสารละลายผสมอาร์เซนิกและปรับปริมาตรด้วยน้ำประจําพลา ปิเปตสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 mg/L ปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด

- 3) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 mL ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด
- 4) ต่อคอลัมน์ขนาดจิ๋วเข้ากับเครื่อง peristaltic pump
- 5) นำสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำสะอาด ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min
- 6) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M ะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min
- 7) นำสารละลายที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ ไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง
- 8) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณ เปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์ที่ได้กลับคืนในน้ำสะอาด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 mg/L ในน้ำสะอาด โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ

3.6.6 ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล

ทำการทดลองในทำนองเดียวกันกับน้ำสะอาด

3.6.7 ศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง

น้ำเสียตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกรวมประมาณ 80 mg/L จึงต้องเจือจางให้มีความเข้มข้นประมาณ 8 mg/L

- 1) นำน้ำเสียตัวอย่างผ่านเครื่องกรองสุญญากาศ
- 2) ปิเปตน้ำเสียตัวอย่างปริมาณ 10 mL ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นหยดกรดไฮโดรคลอริก 1% ประมาณ 1-2 หยด ปิเปตน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางแล้วปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด
- 3) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 ปริมาตร 100 mL ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกปริมาณ 10 mL ใส่หลอดทดลองพลาสติก 3 หลอด
- 4) ต่อคอลัมน์ขนาดจิ๋วเข้ากับเครื่อง peristaltic pump
- 5) นำน้ำเสียตัวอย่างที่ผ่านการเจือจางแล้ว ผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min
- 6) นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว ที่อัตราการไหล 0.47 mL/min
- 7) นำสารละลายที่ได้จากการผ่านคอลัมน์ ไปวัดปริมาณอาร์เซนิกที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) โดยวัดสัญญาณจากสารละลายเดียวกัน 3 ครั้ง

8) นำค่าสัญญาณที่วัดได้มาคำนวณหาความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีในน้ำเสีย ตัวอย่าง โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ

3.7 การตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

- 1) เปิดเครื่อง ICP-OES เปิดคอมพิวเตอร์
- 2) เปิดแก๊สไนโตรเจน เปิดโปรแกรม TEIA และเตรียมเครื่องให้พร้อมสำหรับการทำงานเป็นเวลา 30 นาที
- 3) ตั้งค่าต่างๆดังนี้

Sample Pump		Source settings	
Flush pump rate	50 rpm	RF power	1150 W
Analysis pump rate	50 rpm	Auxiliary gas flow	0.5 L/min
Pump stabilization time	5 s	Nebulizer gas flow	0.5 L/min
Pump tubing type	Tygon orange/white	Coolant gas flow	12 L/min

- 4) เตรียมสารละลายมาตรฐานของอาร์เซนิกที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, 10 mg/L เพื่อสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน
- 5) ทำการวิเคราะห์สารละลายอาร์เซนิก

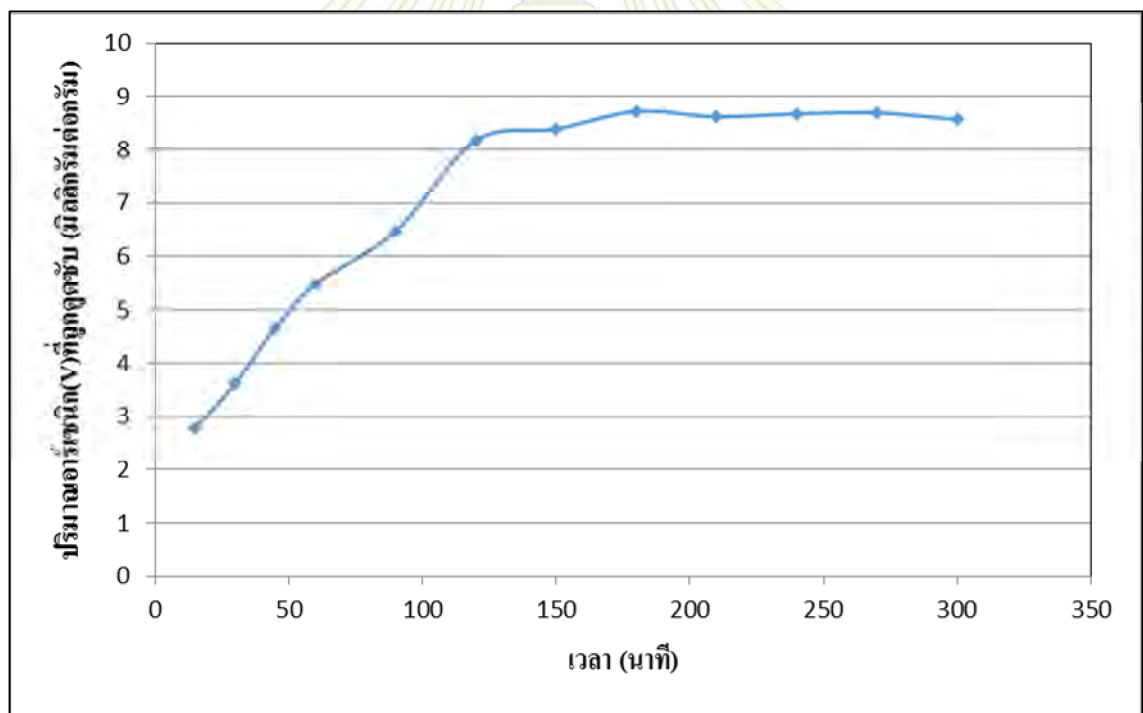
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ โดยได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการแยก ได้แก่ เวลาในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ค่าความเป็นกรดต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V) ผลของชนิดและความเข้มข้นที่แตกต่างกันของตัวชะต่อการดูดซับไอออนลบของอาร์เซนิก รวมทั้งการศึกษากการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง

4.1 การศึกษาเวลาที่มีผลต่อการดูดซับอาร์เซนิก(V) ในระบบแบบแบตช์

จากการทดลองหาเวลาในการดูดซับอาร์เซนิก(V) แบบแบบแบตช์ โดยศึกษาช่วงเวลา 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ300 นาที โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 8 mg/L ที่พีเอช 9 ได้ผลดังรูป



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับเวลาที่แตกต่างกัน

การคำนวณปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ

$$\text{ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ} = \frac{[\text{Arsenic(V)}]_i - [\text{Arsenic(V)}]_f}{\text{weight of resin}} \times \text{volume of solution}$$

เมื่อ $[\text{Arsenic(V)}]_i$ คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) เริ่มต้น (mg/L)

$[\text{Arsenic(V)}]_f$ คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) ที่เหลือ (mg/L)

weight of resin คือ น้ำหนักของเรซินที่ใช้ในการทดลอง (g)

volume of solution คือ ปริมาตรสารละลายอาร์เซนิก(V) ที่ทำการทดลอง (mL)

จากรูปที่ 4.1 แสดงปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับเวลาที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น และจะเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลา 120 นาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนลบในสารละลายได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นในการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิกของเรซินที่พีเอชแตกต่างกัน จึงเลือกใช้เวลาในการดูดซับอาร์เซนิกที่ 120 นาที

ค่าจลนศาสตร์ของการดูดซับ คือ อัตราการดูดซับอาร์เซนิก(V) ในสารละลายเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ลำดับ คือ

จลนศาสตร์ของการดูดซับเสมือน ลำดับที่ 1 มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_{s1} (q_1 - q_t) \quad (1)$$

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_{s1}}{2.303} t \quad (2)$$

จลนศาสตร์ของการดูดซับเสมือน ลำดับที่ 2 มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k (q_1 - q_t)^2 \quad (3)$$

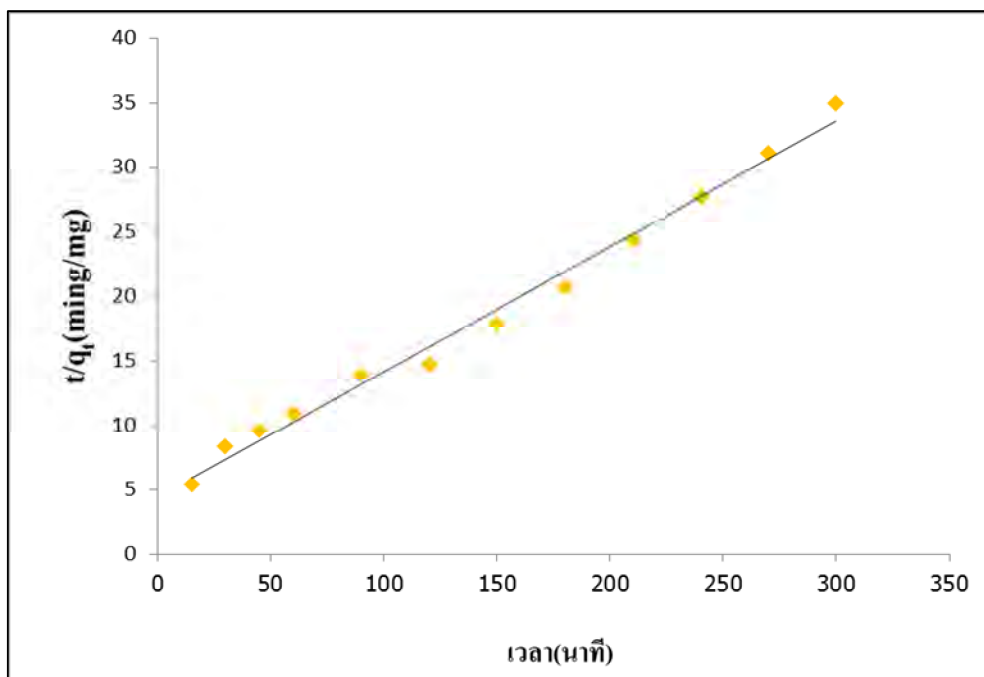
$$\frac{dq_t}{(q_1 - q_t)^2} = k dt \quad (4)$$

k_{s1} คือ ค่าคงตัวของการดูดซับลำดับที่ 1 (L/min)

q_1 คือ ปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (mg/g)

q_t คือ ปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g) [14]

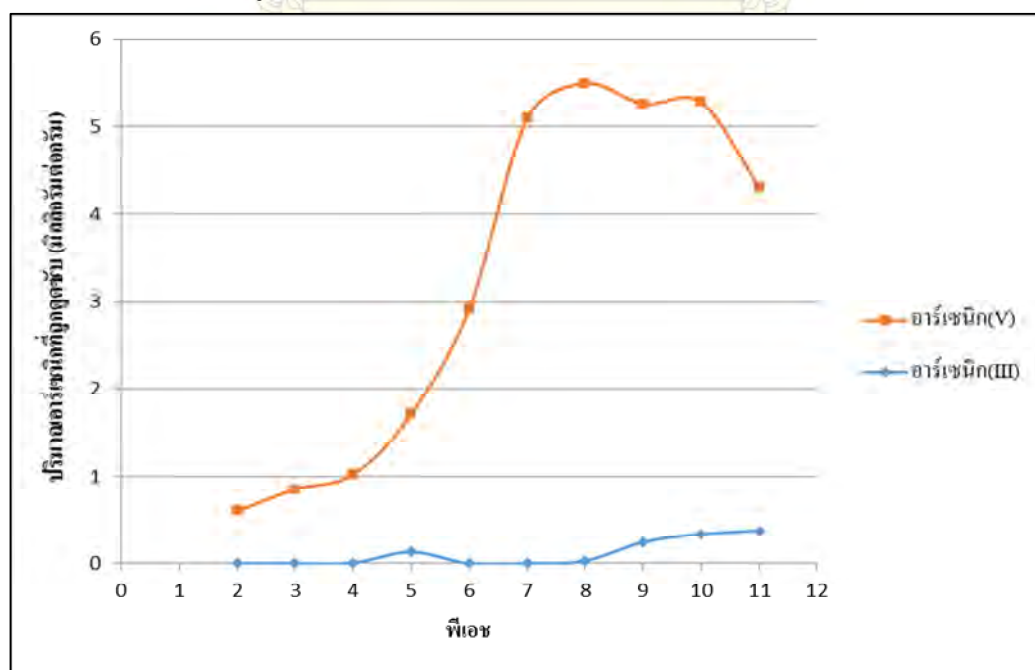
เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนของเวลาต่อปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ กับเวลา พบว่ากราฟที่ได้เป็นกราฟเส้นตรง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์ของสมการจลนศาสตร์ของการดูดซับเสมือนลำดับที่ 2 จึงสรุปได้ว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของเรซินเมื่อเทียบกับเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนลบของอาร์เซนิก(V) ที่มีอยู่ในสารละลายกับปริมาณแคตไอออนของเรซิน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเวลาต่อปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ กับเวลา

4.2 ศึกษาค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับ ด้วยระบบแบบทซ์

จากการทดลองศึกษาค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับ ในระบบแบบทซ์ โดยศึกษาช่วงพีเอชตั้งแต่ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 และ 11 โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 8 mg/L เวลา 120 นาที ได้ผลดังรูป



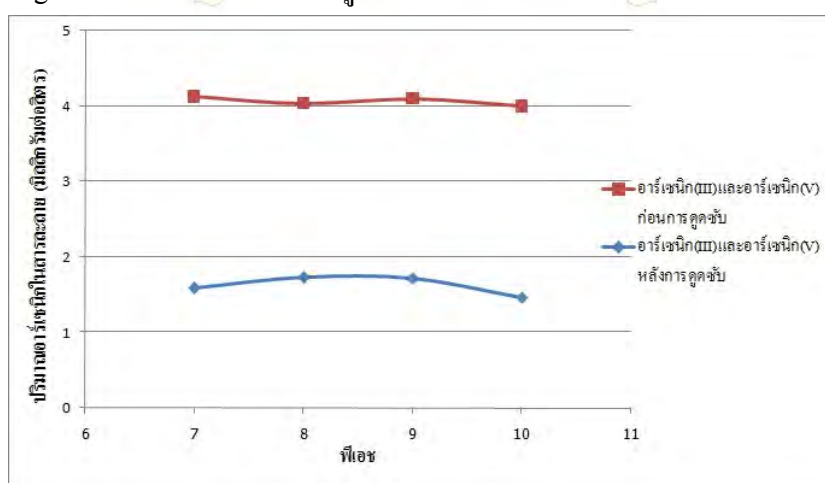
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับค่าพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับค่าพีเอชที่แตกต่างกัน พบว่าอาร์เซนิก(III) มีปริมาณที่ถูกดูดซับต่ำและมีปริมาณที่ถูกดูดซับใกล้เคียงกันทุกค่าพีเอช แสดงว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก(III) ด้วยเรซิน และเมื่อเทียบกับความสามารถในการดูดซับของอาร์เซนิก(V) ด้วยเรซินพบว่า เรซินมีประสิทธิภาพในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้ดีกว่าอาร์เซนิก(III) และความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก(V) เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับสูงสุดในช่วงพีเอช 7-10 เนื่องจากที่พีเอชต่างๆ อาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) จะกระจายตัวอยู่ในสปีชีส์ที่แตกต่างกัน จากกราฟของอาร์เซนิก(III) ที่พีเอช 0-7 นั้นอาร์เซนิก(III) อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุเป็นหลัก (รูปที่ 2.4) จึงไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออนลบกับเรซิน ส่วนกราฟของอาร์เซนิก(V) ที่พีเอช 0-2 นั้นอาร์เซนิก(V) อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุเป็นหลัก จึงไม่มีการแลกเปลี่ยนประจุลบกับเรซินเช่นเดียวกัน แต่จะเริ่มมีการแลกเปลี่ยนไอออนลบที่พีเอช 3 เป็นต้นไป เนื่องจากอาร์เซนิก(V) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป H_2AsO_4^- เป็นหลัก จนเริ่มเข้าสู่สมมูลที่ พีเอช 7-10 อาร์เซนิก(V) อยู่ในรูป HAsO_4^{2-} เป็นหลักที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดียิ่งขึ้น จากนั้น HAsO_4^{2-} ในสารละลายเริ่มเข้าสู่สมมูล ($\text{pK}=11.5$) แยกตัวให้ H^+ จับกับ OH^- ในสารละลาย และเปลี่ยนสปีชีส์เป็น AsO_4^{3-} (รูปที่ 2.3) ซึ่งในช่วงพีเอชนี้มีความเป็นเบสสูง ปริมาณของ OH^- ในสารละลายมีจำนวนมากขึ้น และแย่ง AsO_4^{3-} แลกเปลี่ยนไอออนลบกับเรซิน ทำให้ความสามารถในการดูดซับของอาร์เซนิก(V) ลดลงที่พีเอช เท่ากับ 11

ดังนั้นในการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) จึงทำการทดลองในช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือ 7, 8, 9 และ 10

4.3 การศึกษาค่าพีเอชของสารละลายมาตรฐานผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับด้วยระบบแบบแท่ง

จากการทดลองศึกษาค่าพีเอชของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่มีผลต่อการดูดซับแบบแบบแท่ง โดยเทียบระหว่างก่อนและหลังการดูดซับของเรซิน ศึกษาช่วงพีเอช 7, 8, 9 และ 10 ทำการทดลองที่ความเข้มข้นรวม 8 mg/L เวลา 120 นาที ได้ผลดังรูป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอาร์เซนิกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V)ในสารละลายผสม กับพีเอชที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.4 แสดงปริมาณอาร์เซนิกในสารละลายกับค่าพีเอช ที่ 7, 8, 9 และ 10 โดยเทียบระหว่างก่อนและหลังการดูดซับด้วยเรซิน พบว่าที่พีเอช 8 ปริมาณอาร์เซนิกผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ก่อนการดูดซับมีค่า 4.03 mg/l ส่วนปริมาณผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) หลังการดูดซับมีค่า 1.73 mg/l บ่งบอกว่าสารละลายผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) หลังการดูดซับ มีปริมาณการดูดซับลดลง เป็นครึ่งหนึ่งของปริมาณการดูดซับสารละลายผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ก่อนการดูดซับ แสดงว่าเรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลบของอาร์เซนิก(V) ได้ดีกว่าไอออนลบของอาร์เซนิก(III) (รูปที่ 4.3) ที่พีเอช 7-10 เรซินมีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้สูงที่สุด เมื่อเทียบกับอาร์เซนิก(III) ที่เรซินดูดซับได้น้อยมาก ดังนั้นปริมาณอาร์เซนิกในสารละลายผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) หลังการดูดซับที่ตรวจวัดได้ คือปริมาณของอาร์เซนิก(III) และปริมาณอาร์เซนิกที่ถูกดูดซับบนเรซินคือปริมาณอาร์เซนิก(V)

ในการทดลองศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายผสมของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในขั้นต่อไป จึงทำการทดลองในช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือ 7, 8, 9, 10

4.4 การศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริกในการชะอาร์เซนิก(V) ออกจากเรซิน ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

จากการทดลองศึกษาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริกในการชะอาร์เซนิก(V) ออกจากเรซิน ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว เทียบระหว่างก่อนการชะและหลังการชะผ่านคอลัมน์ขนาดจิ๋ว โดยศึกษากับสารละลายอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้น 4 mg/L พีเอช 8 ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปรอ์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M

ความเข้มข้น HCl	ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	% การชะเฉลี่ย	% การดูดซับเฉลี่ย
0.1 M	1	0.39	0.36	90.30 ± 0.83	100
	2	0.39	0.36		
	3	0.39	0.37		
0.5 M	1	0.39	0.36	91.94 ± 3.01	97.17 ± 4.90
	2	0.39	0.36		
	3	0.35	0.35		

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไนตริก ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M

ความเข้มข้น HNO ₃	ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	% การชะ เฉลี่ย	% การดูด ซับเฉลี่ย
0.1 M	1	0.39	0.37	81.14 ± 9.29	100
	2	0.39	0.30		
	3	0.39	0.31		
0.5 M	1	0.39	0.35	90.88 ± 4.02	100
	2	0.39	0.38		
	3	0.39	0.35		

วิธีคำนวณเปอร์เซ็นการชะอาร์เซนิก(V)

$$\text{เปอร์เซ็นการชะ} = \frac{C_f}{C_i} \times 100$$

เมื่อ C_f คือ ปริมาณของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ

C_i คือ ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับบนเรซิน

วิธีคำนวณเปอร์เซ็นการดูดซับอาร์เซนิก(V)

$$\text{เปอร์เซ็นการดูดซับ} = \frac{N_i - N_f}{N_i} \times 100$$

เมื่อ N_i คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) เริ่มต้น

N_f คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) ที่เหลือ

จากตารางที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M พบว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M ให้เปอร์เซ็นการชะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.30 ± 0.83 ส่วนกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 M ให้เปอร์เซ็นการชะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 91.94 ± 3.01 จากค่าเปอร์เซ็นการชะข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.5 M เป็นตัวชะอาร์เซนิก(V) มีประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ที่ใกล้เคียงกัน เมื่อวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพการชะ

อาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M ผลที่ได้คือ การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M พบว่ากรดไนตริกเข้มข้น 0.1 M ให้เปอร์เซ็นต์การชะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 81.14 ± 9.29 ส่วนกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 M ให้เปอร์เซ็นต์การชะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.88 ± 4.02 จากค่าเปอร์เซ็นต์การชะข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M เป็นตัวชะอาร์เซนิก(V) มีประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ที่แตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M ผลที่ได้คือ กรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 M มีประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ดีกว่ากรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 M

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และกรดไนตริก 0.5 M แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และกรดไนตริก 0.5 M มีค่าไม่แตกต่างกัน การเลือกตัวชะที่เหมาะสมจึงต้องคำนึงถึงการชะไอออนลบในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนลบของเรซิน นั่นคือ ไอออนลบของอาร์เซนิกจะแลกเปลี่ยนกับ แคน์เตอร์ไอออนลบของเรซิน เพื่อให้ไอออนลบของอาร์เซนิกเคลื่อนที่หลุดออกมาจากรีซิน พร้อมกับเฟสเคลื่อนที่ จึงจำเป็นต้องศึกษาไอออนลบของตัวชะ โดยกรดไนตริกมีไอออนลบคือ NO_3^- ส่วนกรดไฮโดรคลอริกมีไอออนลบคือ Cl^- ซึ่ง NO_3^- มีค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนที่สามารถจับกับเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดีกว่า Cl^- เล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งการทดลองนี้ทางผู้วิจัยเลือกกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ เนื่องจากใช้ความเข้มข้นน้อยกว่า และ Cl^- มีคุณสมบัติในการสร้างใหม่ (regeneration) [15]

4.5 การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวมแตกต่างกัน ในระบบคอลัมน์

จากการทดลองศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้น 4 mg/L, 8 mg/L และ 16 mg/L โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M เป็นตัวชะ ได้ผลดังตารางที่ 4.3

วิธีคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับอาร์เซนิก(V)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \frac{N_i - N_f}{N_i} \times 100$$

เมื่อ N_i คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) เริ่มต้น

N_f คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) ที่เหลือ

((ความเข้มข้นรวมของอาร์เซนิกผสม/2) – ความเข้มข้นก่อนการชะ)

วิธีคำนวณเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(V)

$$\% \text{ recovery As(V)} = \frac{C_{f(V)}}{N_i} \times 100$$

เมื่อ $C_{f(V)}$ คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะออกมา
 N_i คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) เริ่มต้นที่ได้ทางทฤษฎี

วิธีคำนวณเปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III)

$$\% \text{ recovery As(III)} = \frac{C_{f(III)}}{N_i} \times 100$$

เมื่อ $C_{f(III)}$ คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ได้จากการทดลอง
 N_i คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) เริ่มต้นที่ได้ทางทฤษฎี

ภาควิชาเคมี
 คณะวิทยาศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M, เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และ เปอร์เซ็นต์การได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 และ 8 mg/L

สารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 mg/L							
ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ได้ (mg/L)	% การชะเฉลี่ย	% การดูดซับเฉลี่ย	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
1	0.175	0.175	1.75	103.10±1.51	86.38±0.98	89.05±1.48	86.38±0.98
2	0.173	0.181	1.73				
3	0.171	0.175	1.71				
สารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 8 mg/L							
ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ได้ (mg/L)	% การชะเฉลี่ย	% การดูดซับเฉลี่ย	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
1	0.376	0.392	3.76	101.67±2.67	92.30±0.35	95.95±0.34	93.83±2.17
2	0.379	0.375	3.79				

*หมายเหตุ: การทดลองครั้งที่ 3 ของการทดลองในสารละลายรวม 8 mg/L เกิดความผิดพลาดเนื่องจากสายยางหลุดจากปั๊มขณะทำการทดลองจึงไม่มีผลการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้ทำเพื่อดูความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นไป (ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์) จึงไม่ได้ทำการทดลองซ้ำ

การคำนวณส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD)

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

เมื่อ SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ศึกษา

จากตารางที่ 4.3 แสดงการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 mg/L โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M เป็นตัวชะ พบว่า เปรอร์เซชันการชะอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 103.10 ± 1.51 เปรอร์เซชันการดูดซับอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.38 ± 0.98 ค่าร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.05 ± 1.48 และ 86.38 ± 0.98 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง 85-115% [16] %RSD ของอาร์เซนิก(III) มีค่าเท่ากับ 1.66% และ %RSD ของอาร์เซนิก(V) มีค่าเท่ากับ 1.13% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง $< 5\%$ [17]

เมื่อศึกษาที่ความเข้มข้นอาร์เซนิกรวม 8 mg/L พบว่า เปรอร์เซชันการชะอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 101.67 ± 2.67 และเปรอร์เซชันการดูดซับอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.30 ± 0.35 และค่าร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.95 ± 0.34 และ 93.83 ± 2.17 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง 85-115% [16] %RSD ของอาร์เซนิก(III) มีค่าเท่ากับ 0.354% และ %RSD ของอาร์เซนิก(V) มีค่าเท่ากับ 2.31% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง $< 5\%$ [17] แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นรวมของอาร์เซนิกผสมเพิ่มขึ้น การแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีนี้ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดี

ดังนั้นจากข้อมูลเปรอร์เซชันการชะทั้งหมดข้างต้นแสดงให้เห็นว่ากรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ให้ประสิทธิภาพในการชะอาร์เซนิก(V) ได้ดี และจากเปรอร์เซชันการดูดซับอาร์เซนิก(V) แสดงให้เห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบมีประสิทธิภาพการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้ดี และสรุปได้ว่าวิธีการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิด DOWEX MARATHON® A ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋วเป็นวิธีที่มีความถูกต้อง เทียบตรง และแม่นยำ โดยสามารถแยกไอออนลบของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6 การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำสระจุกพาฯ ด้วยวิธีแบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

จากการทดลองศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำสระจุกพาฯ โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M เป็นตัวชะ ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าสัญญาณของน้ำประจําพลา

ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ครั้งที่	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)	ความเข้มข้นอาร์เซนิก(III) (mg/L)	ความเข้มข้นอาร์เซนิก(V) (mg/L)
น้ำประจําพลาที่ไม่ปรับพีเอชและไม่ผ่านคอลัมน์	-	2.448	N.D.	N.D.
น้ำประจําพลาที่ไม่ปรับพีเอชแต่ผ่านคอลัมน์	1	0.9906	N.D.	N.D.
	2	0.5433	N.D.	N.D.
	3	0.5475	N.D.	N.D.

N.D. = not detectable

จากตารางที่ 4.3 จากค่าสัญญาณของน้ำประจําพลา ที่นำมาใช้ในการทดลองโดยไม่มีสารละลายอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) เมื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) พบว่าไม่มีอาร์เซนิกในน้ำประจําพลา การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบว่าหากในแหล่งน้ำประจําพลา มีไอออนชนิดอื่นๆ ปะปนอยู่ คอลัมน์ขนาดจิ๋วจะยังสามารถแยกอาร์เซนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในแหล่งน้ำธรรมชาติมีทั้งไอออนบวก และไอออนลบ [18] ซึ่งไอออนที่รบกวนการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) คือ ซัลเฟต ไอออน [19]

ตารางที่ 4.5 แสดงเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และเปอร์เซ็นต์ได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำประจําพลา

ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ได้ (mg/L)	% การชะเฉลี่ย	% การดูดซับเฉลี่ย	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
1	0.200	0.178	1.81	94.70±5.96	92.89±6.16	89.73±0.69	87.76±2.94
2	0.179	0.169	1.79				
3	0.178	0.180	1.78				

จากตารางที่ 4.5 แสดงการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 mg/L ในน้ำประจําพลา โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ พบว่าในแหล่งน้ำธรรมชาติเรซินยังคงมีประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ได้ดี อีกทั้งกรดไฮโดรคลอริกทำหน้าที่เป็น

ตัวชี้ที่เหมาะสม เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 94.70 ± 5.96 และเปอร์เซ็นต์การดูดซับอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.89 ± 6.16 และเมื่อคำนวณร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.73 ± 0.69 และ 87.76 ± 2.94 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษาที่มีค่าในช่วง $85 - 115\%$ [16] %RSD ของอาร์เซนิก(III) มีค่าเท่ากับ 0.769% และ %RSD ของอาร์เซนิก(V) มีค่าเท่ากับ 3.35% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง $< 5\%$ [17] แสดงว่าเมื่อทำการทดลองในน้ำประจําพลาฯ วิธีนี้ยังมีความถูกต้องเที่ยงตรงและแม่นยำ

4.7 การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล ด้วยวิธีแบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

จากการทดลองศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาลโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M เป็นตัวชะ ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าสัญญาณของน้ำบาดาล

ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ครั้งที่	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)	ความเข้มข้นก่อนการชะ (mg/L)	ความเข้มข้นหลังการชะ (mg/L)
น้ำบาดาลที่ไม่ปรับพีเอชและไม่ผ่านคอลัมน์	-	0.6421	N.D.	N.D.
น้ำบาดาลที่ไม่ปรับพีเอชแต่ผ่านคอลัมน์	1	0.07435	N.D.	N.D.
	2	0.4806	N.D.	N.D.
	3	0.3269	N.D.	N.D.

N.D. = not detectable

จากตารางที่ 4.6 จากค่าสัญญาณของน้ำบาดาล ที่นำมาใช้ในการทดลองโดยไม่มีกรดเติมสารละลายอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 mg/L เมื่อนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) พบว่าไม่มีอาร์เซนิกในน้ำบาดาล การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบว่าหากในแหล่งน้ำบาดาล มีไอออนชนิดอื่นๆปะปนอยู่ ทั้งไอออนบวก และไอออนลบ [18] ซึ่งไอออนที่รบกวนการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) คือ ซัลเฟตไอออน [20] คอลัมน์ขนาดจิ๋วจะยังสามารถแยกอาร์เซนิกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) , เปอร์เซ็นต์การดูดซับของอาร์เซนิก(V) และเปอร์เซ็นต์ได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล

ครั้งที่	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับ (mg/g)	ปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกชะ (mg/g)	ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ได้ (mg/L)	% การชะเฉลี่ย	% การดูดซับเฉลี่ย	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
1	0.200	0.176	1.78	90.46±5.79	95.79±7.30	88.04±0.80	98.72±1.66
2	0.200	0.172	1.76				
3	0.175	0.170	1.75				

จากตารางที่ 4.7 แสดงการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 mg/L ในน้ำบาดาลโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะ พบว่าเรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำบาดาลที่มีไอออนอื่นๆ ปะปนอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งไฮโดรคลอริกทำหน้าที่เป็นตัวชะที่ดี เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การชะอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 90.46±5.79 และเปอร์เซ็นต์การดูดซับอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 95.79±7.30 และเมื่อคำนวณค่าร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 88.04±0.80 และ 98.72±1.66 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษาที่มีค่าในช่วง 85 – 115% [18] %RSD ของอาร์เซนิก(III) มีค่าเท่ากับ 0.91% และ%RSD ของอาร์เซนิก(V) มีค่าเท่ากับ 1.68% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษามีค่าในช่วง < 5% [19] แสดงว่าเมื่อทำการทดลองในน้ำบาดาล วิธีนี้ยังมีความถูกต้อง เทียงตรงและแม่นยำ

เมื่อวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ของเรซินในแหล่งน้ำสระจุฬาฯ และน้ำบาดาล พบว่า วิธีนี้ให้ประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ไม่แตกต่างกัน

4.8 การศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่างในระบบคอลัมน์

จากการทดลองศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง โดยใช้กรด HCl 0.1 M เป็นตัวชะ ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดง ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่าง ที่พีเอช 8

ครั้งที่	ความเข้มข้นของ สารละลาย หลังผ่านคอลัมน์ (mg/L)	ความเข้มข้นของ สารละลาย หลังการชะ (mg/L)
1	45.67	17.42
2	46.18	17.06
3	46.00	16.85

ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำเสีย ที่พีเอช 8 ก่อนทำการแยกด้วยเรซินคำนวณจากค่าสัญญาณ พบว่ามีค่าเท่ากับ 65.69 mg/L

จากตารางที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายหลังผ่านคอลัมน์ เท่ากับ 45.95 mg/L และความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายหลังการชะด้วยกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 17.11 mg/L เนื่องจากเรซินมีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้ดีกว่าอาร์เซนิก(III) จึงสรุปจากข้างต้นได้ว่า ความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายหลังผ่านคอลัมน์ คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) และความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายหลังการชะด้วยกรดไฮโดรคลอริก คือ ความเข้มข้นของอาร์เซนิก(V) จากการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกในน้ำเสียตัวอย่างก่อนการแยกด้วยคอลัมน์ขนาดจิ๋วกับหลังการแยก พบว่าหลังการแยกมีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) รวมกันใกล้เคียงกับค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิกที่มีอยู่ในน้ำเสียตัวอย่างก่อนการแยกด้วยคอลัมน์ขนาดจิ๋ว แสดงให้เห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบชนิด DOWEX MARATHON® A มีประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่างได้จริง และจากการคำนวณ %RSD ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) มีค่า 0.56% และ 1.68% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา (<5%) แสดงให้เห็นว่าการแยกอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยวิธีวิเคราะห์นี้มีความแม่นยำสูง

เมื่อเปรียบเทียบความใช้ได้ของวิธีเทียบกับการทดลองในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 รายงานผลการวิเคราะห์หาปริมาณอาร์เซนิกในน้ำด้วยวิธีทางเคมีวิเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา

วิธีวิเคราะห์	LOD ($\mu\text{g/L}$)	%RSD	ปริมาตรสารตัวอย่าง (mL)	อ้างอิง
AAPTS-microcolumn-ICP-OES	0.05	5.7	-	Dahui Chen et al.(2009) [21]
SBAE,HYresin-ICP-MS	0.20	3.5, 5.1	12	Nureddin B. Issa et al.(2011) [9]
ESI-MS	0.22	1.19, 9.06	10	Kayoko minakata et al.(2009) [22]
Amperometric-Spectrophotometry-IC	2.90, 1.30	3.25, 6.27	37.5	Zong-li Li et al.(1995) [23]
SBAE-micolumn-ICP-OES	2.26	0.56, 1.68	10	การทดลองนี้

หมายเหตุ AAPTS : 3-(2-aminoethylamino) propyltrimethoxysilane

ICP-OES : Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry

SBAE : strong base anion exchange

HYresin : hybrid resin

ESI-MS : electrospray ionization – Mass Spectrometry

IC : ion chromatography

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณอาร์เซนิกในน้ำของงานวิจัยที่ผ่านมาเทียบกับการทดลองนี้ พบว่าวิธีการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแล้ววิเคราะห์หาปริมาณด้วยวิธี ICP-OES มีค่า LOD เท่ากับ $2.26 \mu\text{g/L}$ บ่งบอกว่าคุณภาพความเข้มข้นหรือปริมาณต่ำสุดที่วิธีวิเคราะห์นี้สามารถตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับ $2.26 \mu\text{g/L}$ โดยสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกในระดับ mg/L ซึ่งเป็นการยืนยันความใช้ได้ของวิธี และเมื่อเทียบค่า %RSD กับงานวิจัยอื่น พบว่า ค่า %RSD ของการทดลองนี้มีค่าน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่า วิธีการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋วมีความแม่นยำสูง ทั้งที่อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองหาง่าย และสามารถทำขึ้นเองได้จากอุปกรณ์ทั่วไป ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์ของงานวิจัยอื่นที่มีราคาแพง เครื่องมือและอุปกรณ์ซับซ้อน แต่ให้ความแม่นยำน้อยกว่า

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำ ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ชนิด DOWEX MARATHON® A ในรูปคลอไรด์ฟอร์ม และตรวจวัดปริมาณอาร์เซนิกด้วยวิธี Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนไอออนจากการศึกษาในระบบแบทช์ คือ เวลาในการดูดซับ 120 นาที ที่ค่าพีเอช 7-10 และพบว่าเรซินมีความสามารถในการดูดซับอาร์เซนิก(V) ได้ดีกว่าอาร์เซนิก(III) ซึ่งสามารถแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ออกจากกันได้จริง

ในขั้นตอนการศึกษาการแยกของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) จากสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยคอลัมน์ขนาดจิ๋ว พบว่าตัวชะอาร์เซนิก(V) ที่เหมาะสม คือ กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 M จากนั้นศึกษาการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในสารละลายผสมระหว่างอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ที่ความเข้มข้นรวม 4 และ 8 mg/L พีเอช 8 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเฉลี่ยในช่วง 86.38 ± 0.98 ถึง 92.30 ± 0.35 ค่าร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 89.05 ± 1.48 และ $86.38 \pm 0.98\%$ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าวิธีวิเคราะห์นี้มีความแม่นยำ และเที่ยงตรง สามารถแยกไอออนลบของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในขั้นสุดท้ายศึกษาการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ความเข้มข้นรวม 4 mg/L พีเอช 8 ในน้ำ ธรรมชาติ และน้ำบาดาล ด้วยคอลัมน์ขนาดจิ๋ว พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ค่าร้อยละการได้กลับคืนของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในแหล่งน้ำจืด และในแหล่งน้ำบาดาล อยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา และมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดีใกล้เคียงกัน ส่วนในการทดลองแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียตัวอย่างพีเอช 8 พบว่ามีความเข้มข้นของอาร์เซนิกเริ่มต้นทั้งหมด 65.69 mg/L ซึ่งหลังจากแยกด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ความเข้มข้นอาร์เซนิก(III) ที่ตรวจวัดได้มีค่าเฉลี่ยเป็น 45.95 mg/L และความเข้มข้นอาร์เซนิก(V) ที่ตรวจวัดได้มีค่าเฉลี่ยเป็น 17.11 mg/L ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) มีค่า 0.56% และ 1.68% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การยอมรับในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา และเมื่อตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ พบว่าค่าความเข้มข้นหรือปริมาณต่ำสุดที่วิธีวิเคราะห์นี้สามารถตรวจวัดได้มีค่าเท่ากับ 2.26 $\mu\text{g/L}$ โดยสารละลายตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มีความเข้มข้นของอาร์เซนิกในระดับ mg/L จึงเป็นการยืนยันความใช้ได้ของวิธี และเมื่อเทียบค่า %RSD กับงานวิจัยอื่น พบว่า ค่า %RSD ของการทดลองนี้มีค่าน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่า วิธีการแยกอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ด้วยเรซินแลกเปลี่ยน

ไอออนลบในระบบคอลลิมนั้นขนาดจิ๋วมีความแม่นยำสูง ทั้งที่อุปกรณ์ที่ใช้ทดลองหาง่าย และสามารถทำขึ้นเองได้จากอุปกรณ์ต่างๆ ไป ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อเทียบกับวิธีวิเคราะห์ของงานวิจัยอื่นที่มีราคาแพง เครื่องมือและอุปกรณ์ซับซ้อน แต่ให้ความแม่นยำน้อยกว่า ทางผู้วิจัยจึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยจะมีประสิทธิภาพและเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาผลกระทบของไอออนอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนลบของเรซิน
- ศึกษาระดับความเข้มข้นต่ำที่สุดและสูงที่สุด ที่สามารถแยกอาร์เซนิกในน้ำได้



เอกสารอ้างอิง

1. Mohan, D.; Pittman Jr., C.U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. **2007**, *142*, 1-53.
2. Bissen, M.; Gremm, T.; Koklu, U.; Frimmel, F.H. Use of the anion-exchange resin amberlite IRA-93 for the separation of arsenite and arsenate in aqueous samples. *Acta hydrochim*. **2000**, *1*, 41-46.
3. Dominguez, L.; Economy, J.; Benak, K.; Mangun, C.L. Anion exchange fibers for arsenate removal derived from a vinylbenzyl chloride precursor. *Adv. Technol*. **2003**, *14*, 632-637.
4. Deschamps, E.; Ciminelli, V.S.T.; Holl, W.H. Removal of As(III) and As(V) from water using a natural Fe and Mn enriched sample. *Water Research*. **2005**, *39*, 5212-5220.
5. An, B.; Steinwinder, T.R.; zhao, D. Selective removal of arsenate from drinking water using a polymeric ligand exchanger. *Water Research*. **2005**, *39*, 4993-5004.
6. Ronkart, S.N.; Laurent, V.; Carbonnelle, P.; Mabon, N.; Copin, A.; Barthelemy J-P. Speciation of five arsenic species (arsenite, arsenate, MMAA^V, DMAA^V and AsBet) in different kind of water by HPLC-ICP-MS. *Chemosphere*. **2007**, *66*, 738-745.
7. Guo, H.; Stuben, D.; Berner, Z. Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science*. **2007**, *315*, 47-53.
8. Barakat, M.A.; Ismat-Shah, S. Utilization of anion exchange resin spectra/Gel for separation of arsenic from water. *Arabian Journal of Chemistry*. **2013**, *6*, 307-311.
9. Issa, N.B.; Rajakovic-Ognjanovic, V.N.; Marinkovic, A.D.; Rajakovic, L.V. Separation and determination of arsenic species in water by selective exchange and hybrid resins. *Analytic Chimica Acta*. **2011**, *706*, 191-198.
10. Ford, Davis.L. Water Quality Management Library-Volume 3. Pennsylvania, U.S.A.: A Technomic Publishing Company, n.d.
11. Issa, N.B.; Rajakovic-Ognjanovic, V.N.; Marinkovic, A.D.; Rajakovic, L.V. Determination of inorganic arsenic species in natural waters-Benefits of separation and preconcentration on ion exchange and hybrid resins. *Analytic Chimica Acta*. **2010**, *673*, 185-193.
12. World Health Organization (WHO). Arsenic in Drinking-water. *Guidelines for drinking-water quality*. **2011**, *4*, 1-11.
13. Trademark of The Dow Chemical Company. (n.d.). DOWEXTM MARATHONTM A Resin. Retrieved from <http://www.dow.com/scripts/litorder.asp?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/177-02271.pdf>

14. Smedley, P.L.; Kinniburgh, D.G. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*. **2002**, *17*, 517-568.
15. Desilva, F.; Blumhof, S. (n.d.). Arsenic removal by regenerable anion resin. Retrieved from <http://www.wqpmag.com/arsenic-removal-regenerable-anion-resin>
16. สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง (ม.ป.ป.). ระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการทดสอบ. สืบค้นจาก <http://www.nicaonline.com/download/analysis7.pdf>
17. เสาวณีย์ กาญจนชุมพล, ดวงกมล วิรุพหุอดมผล, ไพศาล จิตธรรม. (ม.ป.ป.). การประเมินวิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ. สืบค้นจาก http://www.nimt.or.th/nimt/upload/contentfile/attach-lab_article-516-443.pdf
18. Chung, C. (n.d.). Natural water. Retrieved from <http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/applychem/waternatural.html>
19. World Bank & Government of The Netherlands funded. (1999, September). Major Ions in Water. Retrieved from <http://www.researchgate.net/publications/PublicPostFileLoader.html?id=54e2f607d11b8b2b7a8b4612&key=5f90763c-250a-4e28-b850-71624b3ac02b>
20. Harter, T. (n.d.). Groundwater Quality and Groundwater Pollution. *In Farm Water Quality Planning (FWQP)*. (1-15). California: UC PEER REVIEWED.
21. Chen, D.; Huang, C.; He, M.; Hu, B. Separation and preconcentration of inorganic arsenic species in natural water samples with 3-(2-aminoethylamino) propyltrimetoxysilane modified ordered mesoporous silica micro-column and their determination by inductively coupled plasma optical emission spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*. **2009**, *164*, 1146-1151.
22. Minakata, k.; Suzuku, M.; Suzuki, O. Simple and selective determination of arsenite and arsenate by electrospray ionization mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. **2009**, *631*, 87-90.
23. Li, L.Z.; Mou, S.F.; Ni, M.Z.; Riviello, J.M. Sequential determination of arsenite and arsenate by ion chromatography. *Analytica Chimica Acta*. **1995**, *307*, 79-87.

ภาคผนวก

ตารางแสดงข้อมูลรูปที่ 4.1 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของปริมาณอาร์เซนิก(V) ที่ถูกดูดซับด้วยเรซินกับเวลาที่แตกต่างกัน

Time (min)	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
15	2578.0	2190.0	2534.0	2434.0	173.5
30	2023.0	2100.0	2165.0	2096.0	58.0
45	1563.0	1778.0	1664.0	1668.3	87.8
60	1185.0	1290.0	1532.0	1335.7	145.3
90	1077.0	985.4	747.4	936.6	138.9
120	208.1	295.9	257.7	253.9	35.9
150	286.5	148.1	194.4	209.7	57.5
180	200.5	108.3	115.4	141.4	41.9
210	133.1	189.2	164.3	162.2	22.9
240	157.1	121.2	173.3	150.5	21.8
270	174.3	152.9	114.4	147.2	24.8
300	117.2	204.8	195.6	172.5	39.3

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงข้อมูลรูปที่ 4.1 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(V) ในสารละลาย จากผลการทดลอง ศึกษา pH ที่มีผลต่อการดูดซับ ในระบบแบทช์

pH	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
2	1831.0	1879.0	1856.0	1855.3	19.6
3	1697.0	1682.0	1761.0	1713.3	34.2
4	1592.0	1674.0	1676.0	1647.3	39.1
5	1287.0	1397.0	1378.0	1354.0	48.0
6	949.5	1092.0	1089.0	1043.5	66.5
7	814.6	456.2	421.3	546.0	177.7
8	289.9	349.2	234.3	291.1	46.9
9	266.9	420.2	485.5	390.9	91.6
10	260.5	431.0	472.3	387.9	91.7
11	649.4	732.2	866.9	749.5	89.6

ตารางแสดงข้อมูลรูปที่ 4.2 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(III) ในสารละลาย จากผลการทดลอง ศึกษา pH ที่มีผลต่อการดูดซับ ในระบบแบทช์

pH	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
2	2101.0	2079.0	2073.0	2084.3	12.0
3	2027.0	2024.0	1996.0	2015.7	13.9
4	1977.0	1964.0	1956.0	1965.7	8.6
5	1944.0	1931.0	1912.0	1929.0	13.1
6	1878.0	1879.0	1881.0	1879.3	1.2
7	1904.0	1892.0	1889.0	1895.0	6.5
8	1871.0	1859.0	1847.0	1859.0	9.8
9	1818.0	1797.0	1798.0	1804.3	9.7
10	1808.0	1787.0	1781.0	1792.0	11.6
11	1776.0	1783.0	1779.0	1779.3	2.9

ตารางแสดงข้อมูลรูปที่ 4.3 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) จากผลการทดลองศึกษา pH ที่มีผลต่อการดูดซับ ในระบบแบบทซ์

pH	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	SD
7	520.2	514.8	527.4	520.8	5.2
8	491.3	510.5	507.0	502.9	8.3
9	513.4	502.9	517.3	511.2	6.1
10	517.2	539.2	531.6	529.3	9.1

ข้อมูลตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(V) จากผลการทดลองศึกษาตัวชะ

Eluent	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)							
	As(III)				As(V)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
HCl 0.1 M	76.35	65.14	63.48	68.3	1422	1429	1446	1432.3
HCl 0.5 M	60.87	50.10	101.7	70.9	1422	1441	1387	1416.7
HNO ₃ 0.1 M	49.04	39.32	46.12	44.8	1453	1199	1243	1298.3
HNO ₃ 0.5 M	31.18	30.79	32.11	31.4	1404	1510	1410	1441.3

ข้อมูลตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) 4 ppm ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)		% การชะ As(V)	% การดูดซับ As(V)	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
	As(III)	As(V)				
ครั้งที่ 1	570.2	580.0	102.0973	93.0741	93.0741	95.0262
ครั้งที่ 2	564.0	586.3	104.8367	91.8391	91.8391	96.2810
ครั้งที่ 3	559.8	570.6	102.0025	91.0025	91.0025	93.1538

ข้อมูลตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) 8 ppm ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)		% การชะ As(V)	% การดูดซับ As(V)	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
	As(III)	As(V)				
ครั้งที่ 1	895.7	932.9	104.3387	91.9637	91.9637	95.9537
ครั้งที่ 2	901.9	893.4	98.9970	92.6414	92.6414	91.7123

ข้อมูลตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำประจําฟ้า ความเข้มข้น 4 ppm พีเอช 8 ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)		% การชะ As(V)	% การดูดซับ As(V)	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
	As(III)	As(V)				
ครั้งที่ 1	24.04	20.63	83.3871	100	107.5603	83.3871
ครั้งที่ 2	23.26	20.51	82.5364	100	102.0310	82.5364
ครั้งที่ 3	22.42	20.51	85.9072	96.0763	96.0763	82.5364

ข้อมูลตารางที่ 4.7 แสดงค่าสัญญาณ ICP-OES ของอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ของสารละลายผสมอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำบาดาล ความเข้มข้น 4 ppm พีเอช 8 ในระบบคอลัมน์ขนาดจิ๋ว

	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)		% การชะ As(V)	% การดูดซับ As(V)	% Recovery As(III)	% Recovery As(V)
	As(III)	As(V)				
ครั้งที่ 1	541	536.9	100.7011	100	101.6359	100.7011
ครั้งที่ 2	535.1	526.8	98.5553	100	100.3824	98.5553
ครั้งที่ 3	532.6	519.1	97.0638	99.8513	99.8513	96.9195

รูปที่ 1 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพการชะอาร์ท์เซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M

	92.31	92.31
Mean	96.065	93.385
Variance	11.85845	0.68445
Observations	2	2
Pearson Correlation	1	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	1	
t Stat	1.448648649	
P(T<=t) one-tail	0.192318115	
t Critical one-tail	6.313751514	
P(T<=t) two-tail	0.38463623	
t Critical two-tail	12.70620473	

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพการชะอาร์เซนิก(V) ของกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 M และ 0.5 M

	91	94.46
Mean	94.945	78.395
Variance	24.01245	4.65125
Observations	2	2
Pearson Correlation	-1	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	1	
t Stat	3.316633	
P(T<=t) one-tail	0.093215	
t Critical one-tail	6.313752	
P(T<=t) two-tail	0.186429	
t Critical two-tail	12.7062	

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เทียบระหว่างประสิทธิภาพในการชะอาร์ทเซนิก(V) ของกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M และกรดไนตริก 0.5 M

	91	92.31
Mean	94.945	93.385
Variance	24.01245	0.68445
Observations	2	2
Pearson Correlation	-1	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	1	
t Stat	0.385185	
P(T<=t) one-tail	0.382967	
t Critical one-tail	6.313752	
P(T<=t) two-tail	0.765934	
t Critical two-tail	12.7062	

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(III) ของเรซินในแหล่งน้ำสระจุฬาฯ และน้ำบาดาล

	<i>101.64</i>	<i>100.03</i>
Mean	100.115	98.75
Variance	0.14045	0.0578
Observations	2	2
Pearson Correlation	1	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	1	
t Stat	14.36842	
P(T<=t) one-tail	0.022118	
t Critical one-tail	6.313752	
P(T<=t) two-tail	0.044236	
t Critical two-tail	12.7062	

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ T-test ที่ความเชื่อมั่น 0.05 เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพในการแยกอาร์เซนิก(V) ของเรซินในแหล่งน้ำสระจุฬาฯ และน้ำบาดาล

	100.7	98.3
Mean	97.74	96.355
Variance	1.3448	18.66605
Observations	2	2
Pearson Correlation	-1	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	1	
t Stat	0.357419355	
P(T<=t) one-tail	0.39073404	
t Critical one-tail	6.313751514	
P(T<=t) two-tail	0.781468079	
t Critical two-tail	12.70620473	

ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาปริมาณที่เหมาะสมของเรซินที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายอาร์เซนิก(V) เข้มข้น 8 ppm (8 mg/L)

$$\begin{aligned}\text{โมลของอาร์เซนิก} &= \frac{8 \times 10^{-3} \text{ g}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ mol As}}{75 \text{ g As}} \times 10^{-2} \text{ L} \\ &= 1.06 \times 10^{-6} \text{ mol}\end{aligned}$$

เรซินชนิด Chloride form สามารถแลกเปลี่ยน Arsenic 1 ตัว ต่อ 2 Cl⁻ ดังสมการการแลกเปลี่ยนไอออน
 ลบ



เมื่อ A²⁻ คือ HAsO₄²⁻

$$\text{จะได้เป็น } (1.06 \times 10^{-6} \text{ mol}) \times 2 = 2.12 \times 10^{-6} \text{ eq}$$

จากเรซินที่ผู้ทดลองใช้มีความจุ 1.1 eq/L

$$\text{จำนวนกรัมสมมูล } 1.1 \text{ eq} \quad \text{เรซินหนัก } 1 \text{ L}$$

$$\text{จำนวนกรัมสมมูล } 2.12 \times 10^{-6} \text{ eq} \quad \text{เรซินหนัก } 1.93 \times 10^{-6} \text{ L}$$

จากสูตร ความหนาแน่น = น้ำหนัก / ปริมาตร

$$\text{จะได้ น้ำหนัก} = \text{ความหนาแน่น} \times \text{ปริมาตร}$$

$$= \frac{670 \text{ g resin}}{1 \text{ L}} \times 1.93 \times 10^{-6} \text{ L}$$

$$= 1.29 \times 10^{-3} \text{ g (น้อยเกินไป)}$$

ดังนั้น เรซินที่เหมาะสมในการทดลองแบบแบทช์เป็น 10 mg

คณะวิทยาศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่าสัญญาณของน้ำเสียน้ำตัวอย่างที่ไม่ปรับพีเอช

ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ครั้งที่	ค่าสัญญาณ ICP-OES (Cts/s)	ความเข้มข้น (mg/L)
น้ำเสียน้ำตัวอย่างที่ไม่ผ่านการแยกด้วยเรซิน	-	1896	66.97
น้ำเสียน้ำตัวอย่างหลังผ่านการแยกด้วยเรซิน	1	1482	52.27±0.32
	2	1501	
	3	1496	

จากตาราง แสดงให้เห็นว่าการแยกอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก(V) ในน้ำเสียน้ำตัวอย่างที่ไม่ได้ปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมต่อการแลกเปลี่ยนไอออนลบของเรซิน ค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิก (III) ที่ตรวจวัดได้หลังผ่านการแยกด้วยเรซินมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นของอาร์เซนิก(III) ที่ตรวจวัดได้ในน้ำเสียน้ำตัวอย่างที่ปรับพีเอชแล้ว (พีเอช 8) เนื่องจากน้ำเสียน้ำตัวอย่างอยู่ในสภาวะความเป็นกรด ($\text{pH} < 2$) ซึ่งในช่วงพีเอชนี้อาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก(V) ส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่มีประจุเป็นหลัก ทำให้ไม่มีการแลกเปลี่ยนไอออนลบกับเรซิน ค่าความเข้มข้น 52.27 ± 0.32 ที่วัดได้จึงเป็นความเข้มข้นของอาร์เซนิกผสมที่ผ่านการแยกแบบไม่สมบูรณ์

ประวัติผู้วิจัย

นางสาวอุรุษยา ศิลป์เจริญ เกิดเมื่ออังคารที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2536 ที่อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนวิสุทธิรังษี อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังจบการศึกษาปริญญาตรีคือ บ้านเลขที่ 143/1 ถนนโพธาราม-บ้านเลือก ตำบลโพธาราม อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี รหัสไปรษณีย์ 70120

นางสาวธัญญาสร อมรศักดิ์โสภณ เกิดเมื่ออังคารที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่อำเภอชนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนสตรีวัดอัมพรสวรรค์ กรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้หลังจบการศึกษาปริญญาตรีคือ บ้านเลขที่ 82 ซอยเทอดไท 5 ถนนเทอดไท แขวงบางยี่เรือ เขตธนบุรี จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10600



ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย