

การกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์



นายบงกช โจรนศิริประภา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF ARSENIC FROM CONDENSATE USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN



Mr. Bongkotch Rojanasiraprapa

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจาน
มีรู และป้อนสารแบบพัลส์

โดย

นายบงกช โรจนศิริประภา

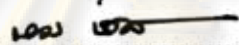
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

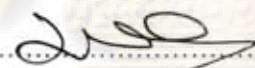
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์วี วงศ์ศรี)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สรเทพ เชี่ยวหอม)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ประกร รามกุล)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บงกช โรจนศิริประภา : การกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์. (REMOVAL OF ARSENIC FROM CONDENSATE USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ , 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีสกัดของเหลว-ของเหลวโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการการสกัดได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัด ค่า Pulse velocity อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารป้อน และอัตราการไหลของสารสกัด เวลาในการสกัด และจำนวนรอบในการสกัดจากผลการทดลองพบว่าสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลเป็นสารสกัดที่ดีที่สุด เมื่อเพิ่มค่า Pulse velocity และอัตราการไหลของสารป้อนให้สูงกว่าอัตราการไหลของสารสกัดพบว่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกมากขึ้น นอกจากนั้นยังนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณสมรรถนะในการถ่ายโอนมวลในเทอมของความสูงของหน่วยถ่ายโอน (HTU_{Oy}) ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลจะเพิ่มตามค่าความเร็วการพัลส์(Pulse velocity) และอัตราการไหลของสารป้อนที่มากขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองนี้คือเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัดผสมกรดไฮโดรคลอริก 1 M และ เมทานอล 20%(v/v) เป็นสารสกัด ค่าPulse velocity คือ 20 มม./วินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 4:1 และใช้เวลา 180 นาที จะให้ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก 93 % และ ค่า HTU_{Oy} เท่ากับ 26 ซม. โดยเมื่อทำการนำสารสกัดมาใช้ซ้ำพบว่าสามารถนำมาใช้สกัดได้ 4 รอบซึ่งสามารถสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต..... นงกช โรจนศิริประภา.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา..... 2551.....

4970399921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

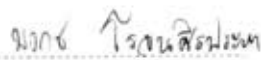
KEYWORDS : ARSENIC / CONDENSATE / LIQUID-LIQUID EXTRACTION / PULSE SIEVE PLATE COLUMN

BONGKOTCH ROJANASIRAPRAPA: REMOVAL OF ARSENIC FROM CONDENSATE USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN. ADVISOR: ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D. Eng Sc., 96 pp.

Removal of arsenic from natural gas condensate by liquid-liquid extraction using a pulse sieve plate column has been investigated. The condensate was used as the feed solution. The effects of types and concentrations of the extractants, pulse velocity, the volumetric flow rate ratio of feed solution to extractant, and the residence time and extraction number on arsenic removal were investigated. The results showed that an acidic extractant of HCl solution mixed with methanol was the best extractant in this case. It was obvious that the percentage of extraction increased with the pulse velocity. Higher flow rate of the condensate than the flow rate of the extractant increased the percentage of extraction. Mass transfer performance in terms of the overall height of transfer unit (HTU_{ov}) was also studied. The efficient mass transfer could be achieved by increasing pulse velocity and the volumetric flow rate of the condensate. By using the mixture of 1 M HCl and 20% (v/v) methanol as the extractant at the pulse velocity of 20 mm/s, the volumetric flow rate ratio of the condensate to extractant of 4:1 and the residence time of 180 minutes, 93% arsenic could be extracted corresponded to the calculated HTU_{ov} of 26 cm. The iterative extraction with the reused extractant was not more than 4 cycles. The amount of arsenic remained in the condensate was much less than the permissible value defined by the Environmental Protection Agency (EPA).

Department : Chemical Engineering

Student's Signature



Field of Study : Chemical Engineering

Advisor's Signature



Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และการอบรม สั่งสอน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์วี วงศ์ศรี ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม และดร.ประกร รามากุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ Mass Separation ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ห้องปฏิบัติการระบบเฉพาะหน่วย สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องสกัดแบบของเหลวด้วยของเหลวแบบ Pulse sieve plate column ที่ใช้สำหรับทำงานวิจัยในครั้งนี้ บริษัทวีระสุวรรณ จำกัด ที่สนับสนุนคอนเดนเสทสำหรับงานวิจัย ภาควิชาเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อการใช้เครื่อง Inductively coupled plasma spectroscopy ขอขอบคุณทุกท่านในกลุ่มวิจัยห้องปฏิบัติการ Mass Separation รวมทั้งพี่และเพื่อนทุกคนในกลุ่มวิจัย Mass Separation ที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และเป็นทีปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ และท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ อย่างสูงที่ให้กำเนิด คอยเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และสนับสนุนการศึกษา และให้กำลังใจอย่างต่อเนื่องจนทำให้เกิดความสำเร็จของข้าพเจ้าในวันนี้

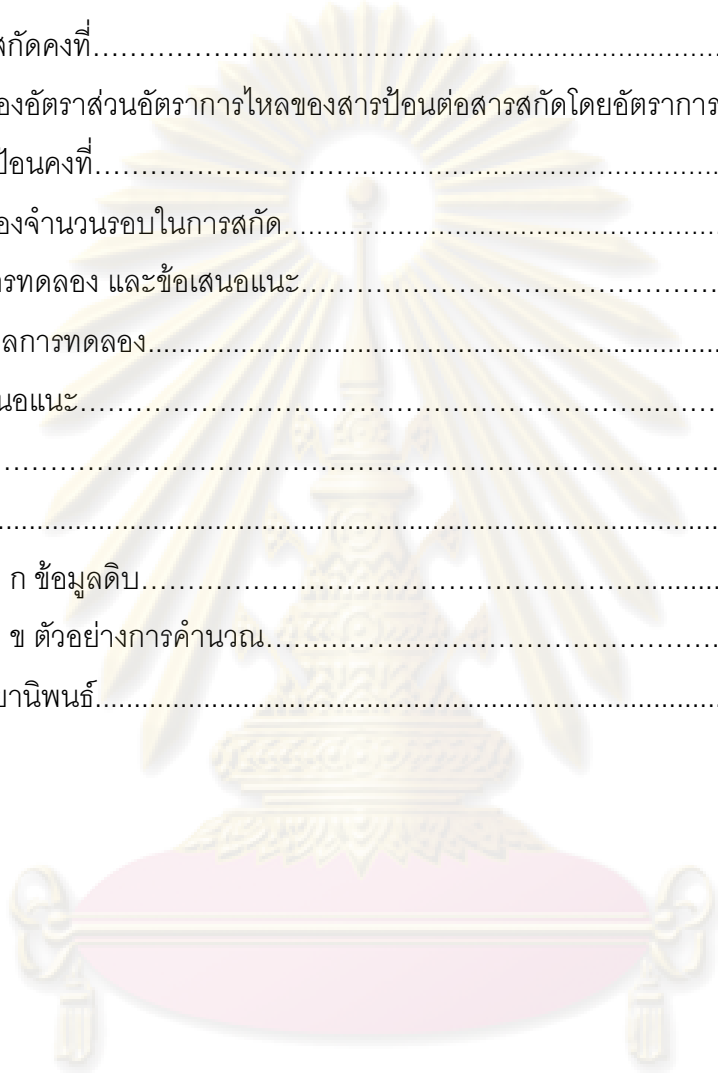
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	8
2.1.1 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction Process).....	9
2.1.2 ขั้นตอนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	11
2.2 สารสกัด.....	11
2.2.1 หลักการเลือกสารสกัด.....	11
2.2.2 การเลือกสารสกัดที่เหมาะสม.....	12
2.2.3 ชนิดของสารสกัด.....	13
2.3 เครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	16
2.3.1 หลักการเลือกใช้เครื่องมือในการสกัด.....	16
2.3.2 หลักการทำงานของเครื่องสกัด.....	16
2.3.3 ชนิดของหอสกัด.....	17
2.3.3.1 ชนิดไม่ใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด.....	17
2.3.3.2 ชนิดใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด.....	18
2.4 เครื่องสกัดสำหรับงานวิจัย.....	20
2.4.1 หอสกัดแบบพัลส์.....	20

2.4.2 การทำงานโดยระบบพัลส์.....	21
2.4.3 หอสกัดแบบจานมีรุ และบ่อนสารแบบพัลส์.....	23
2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP.....	25
2.6 ประสิทธิภาพของการสกัด.....	26
2.7 สมรรถนะของการถ่ายเทมวล.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดอาร์เซนิก.....	27
2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับหอสกัดแบบจานมีรุ และบ่อนสารแบบพัลส์.....	30
บทที่ 3 การทดลอง.....	32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 วิธีการทดลอง.....	36
3.3.1 ศึกษาผลของชนิดสารสกัด.....	36
3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก.....	36
3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเมทานอล และเอทานอล.....	37
3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมของเมทานอล และกรดไฮโดรคลอริกโดยให้ความเข้มข้นของเมทานอลคงที่.....	38
3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมของเมทานอล และกรดไฮโดรคลอริกโดยให้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกคงที่.....	38
3.3.6 ศึกษาข้อมูลสมดุลของระบบ.....	39
3.3.7 ศึกษาผลของการปรับความเร็วของการพัลส์.....	40
3.3.8 ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่.....	41
3.3.9 ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่.....	42
3.3.10 ศึกษาผลของจำนวนรอบในการสกัด.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	44
4.1 ผลของชนิดของสารสกัด.....	44
4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก.....	45
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล.....	47

4.4 ผลผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสม.....	48
4.5 ผลของความเร็วของการพัลส์.....	50
4.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการใช้ของ สารสกัดคงที่.....	52
4.7 ผลของอัตราส่วนอัตราการใช้ของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการใช้ของ สารป้อนคงที่.....	54
4.8 ผลของจำนวนรอบในการสกัด.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ.....	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตินี้

ตารางที่		หน้า
3.1	รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ก.1	ข้อมูลผลการศึกษานิตของสารสกัดเดี่ยว.....	65
ก.2	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว กรดไฮโดรคลอริก.....	66
ก.3	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว เมทานอล.....	67
ก.4	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว เอทานอล.....	68
ก.5	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.2 M.....	69
ก.6	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.4 M.....	70
ก.7	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.6 M.....	71
ก.8	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.8 M.....	72
ก.9	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 M.....	73
ก.10	ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับ เมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1.2 M.....	74
ก.11	ข้อมูลผลการศึกษาสมดุลของระบบ.....	75
ก.12	ข้อมูลผลการศึกษาความเร็วของการพอลิไทเทกกับ 4 มม./วินาที.....	76
ก.13	ข้อมูลผลการศึกษาความเร็วของการพอลิไทเทกกับ 8 มม./วินาที.....	77
ก.14	ข้อมูลผลการศึกษาความเร็วของการพอลิไทเทกกับ 12 มม./วินาที.....	78
ก.15	ข้อมูลผลการศึกษาความเร็วของการพอลิไทเทกกับ 16 มม./วินาที.....	79
ก.16	ข้อมูลผลการศึกษาความเร็วของการพอลิไทเทกกับ 20 มม./วินาที.....	80
ก.17	ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อน และอัตรา การใช้ของสารสกัดเป็น 2:1.....	81
ก.18	ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อน และอัตรา การใช้ของสารสกัดเป็น 3:1.....	82
ก.19	ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อน และอัตรา	

ตารางที่	หน้า
	๗
	หน้า
	83
ก.20	84
ก.21	85
ก.22	86
ก.23	87
ก.24	88
ก.25	89
ก.26	90
ก.27	91
ก.28	92



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงแผนภาพหอสกัดสำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	9
2.2	แสดงลักษณะการไหลแบบต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	10
2.3	แสดงลักษณะการไหลและตำแหน่งของรอยต่อระหว่างภูมิภาคในหอสกัด.....	17
2.4	แสดงหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล.....	18
2.5	แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน.....	19
2.6	แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า.....	19
2.7	แสดง reciprocating pump ซึ่งมีการปรับแอมพลิจูดของการพัลส์อย่างง่าย แล้วผ่านไปยัง stoke-adjustment ของ pump และปรับความถี่ไปยัง gear box บน driver.....	21
2.8	โลหะที่มีความยืดหยุ่นหรือ plastic bellow ที่มีการยืดหยุ่น โดยมีการเคลื่อนที่ กลับไปกลับมาด้วยไฮดรอลิกหรือมีการส่งสัญญาณไฟฟ้า.....	22
2.9	แสดงหน่วยการพัลส์ที่เป็นแบบ diaphragm.....	22
2.10	แสดง air pulsing ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่มีการกด และการขยายของอากาศ ที่อยู่เหนือ dip tube.....	23
2.11	แสดงการไหลของของเหลวเบา และหนักในหอสกัดแบบ Pulse sieve plate column	24
2.12	แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP	25
2.13	แสดงแผนภาพการไหลแบบสวนทางของหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบ พัลส์.....	26
3.1	หอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column.....	33
3.2	หอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column	33
3.3	แสดงการทำงานของหอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column ซึ่งของไหลจะ ไหลสวนทางกัน.....	35
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลา 60 นาที.	45
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกกับร้อยละการ สกัดอาร์เซนิกที่เวลา 60 นาที.....	46
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล และเอทานอลกับ ร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลา 60 นาที.....	47

ภาพที่	หน้า	
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดผสมของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอลกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลา 60 นาที.....	49
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง pulse velocity กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก ที่เวลาต่างๆ.....	50
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง pulse velocity กับค่า HTU_{oy} ที่ 180 นาที.....	51
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลาต่างๆ.....	52
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่กับค่า HTU_{oy} ที่ 180 นาที.....	53
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลาต่างๆ.....	54
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่กับค่า HTU_{oy} ที่ 180 นาที.....	55
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่เวลา 180 นาทีต่อรอบ.....	56
ข.1	แสดงเส้นโค้งสมดุลของการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท.....	94



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

$C_{As,feed} (in)$	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารป้อน
$C_{As,extracted} (out)$	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารสกัดขาออก
HTU	ความสูงของหน่วยถ่ายโอน
L_c	อัตราการไหลของสารสกัด
L_d	อัตราการไหลของสารป้อน
m	ความชันของเส้นสมดุล
NTU	จำนวนของหน่วยถ่ายโอน
x	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารสกัด
y	ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารป้อน
Z	ค่าความสูงของหอสกัด

ตัวห้อย

c	เฟสต่อเนื่อง
d	เฟสกระจาย
lm	ลอกรมิน (Log-mean)
oy	ทั้งหมดของเฟสกระจาย (Overall based on dispersed phase)
1, 2	ตำแหน่งบน และล่างของหอสกัดตามลำดับ

ตัวยก

*	สภาวะสมดุล
---	------------

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันพลังงาน และเชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างมากต่อประเทศ และมีอัตราการขยายตัวสูงทำให้มีความต้องการเชื้อเพลิงมากขึ้น ก๊าซธรรมชาติถูกนำมาใช้ทดแทนน้ำมันมากขึ้น ได้มีการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในระดับครัวเรือนเพื่อการประกอบอาหาร ในธุรกิจอุตสาหกรรมเพื่อการผลิตสินค้าต่างๆ รวมถึงเป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานยนต์เพื่อการเดินทางหรือการขนส่งเป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำมันเหลือน้อยลง และราคาน้ำมันของโลกก็สูงขึ้นประกอบกับก๊าซธรรมชาติจัดเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด เพราะมีคุณสมบัติหลายประการที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและสามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาในการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้เป็นพลังงานทดแทนมากขึ้นทำให้เกิดการสำรวจ และขุดเจาะหาแหล่งน้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติที่ถูกเจาะขึ้นมาจากแหล่งธรรมชาติหรือหลุมผลิตปิโตรเลียม จะประกอบด้วยก๊าซธรรมชาติและสิ่งเจือปนต่างๆ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ก๊าซผสมที่ไม่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (Non-hydrocarbon) ซึ่งประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และน้ำ (H_2O) กลุ่มที่สอง คือ ก๊าซผสมที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซอีเทน (C_2H_6) ก๊าซโพรเพน (C_3H_8) ก๊าซบิวเทน (C_4H_{10}) และก๊าซเพนเทน (C_5H_{12}) และโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า ก๊าซธรรมชาติชนิดนี้อาจจะอยู่ในสถานะก๊าซ สถานะของเหลว หรือทั้งสองสถานะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันโดยทั่วไปก๊าซธรรมชาติจากแหล่งก๊าซซึ่งอยู่ภายใต้ความดันสูง จะอยู่ในสภาพของทั้งสองสถานะรวมกัน ส่วนที่เป็นก๊าซเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) และส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า ก๊าซธรรมชาติเหลว (Condensate)

ก๊าซธรรมชาติเหลวหรือคอนเดนเสท (Condensate) ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มเดียวกับก๊าซธรรมชาติ แต่มีลักษณะเป็นของเหลวในสภาพบรรยากาศ เพราะว่ามีปริมาณคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างโมเลกุลมากกว่าก๊าซธรรมชาติ ก๊าซธรรมชาติเหลวที่อยู่ในแหล่งกักเก็บตามธรรมชาติจะมีสถานะเป็นก๊าซ แต่เมื่อขึ้นมาอยู่ในสภาพบรรยากาศจะกลายเป็นของเหลว จึงเรียกก๊าซธรรมชาติเหลว ซึ่งคอนเดนเสทที่ได้จากหลุมเจาะจะมีปริมาณค่อนข้างมากถึง 16% ของปิโตรเลียมที่ผลิตได้ของไทยในแต่ละปี (ชาญวิทย์ ศุภรานนท์รัตน์ และคณะ, 2536) โดยน้ำมันดิบ

จากหลุมเจาะที่ได้จะมีสารประกอบอาร์เซนิกเจือปนในปริมาณ 0.04-514 mg/l (เฉลี่ย 0.84 mg/l) (Bal et al.,1989) ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไตรฟีนิลอาซีน (Triphenyl arsine; $(C_6H_5)_3As$) (Krupp et al.,2007) โดยซึ่งตามมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม กำหนดให้มีปริมาณสารหนูในน้ำทิ้งไม่เกิน 0.250 ส่วนในล้านส่วน (ppm) แต่ค่าที่เหมาะสมไม่ควรจะให้เกิน 0.100 ppm (Frankiewicz et al.,2000) โดยคอนเดนเสทที่มีปริมาณสารประกอบอาร์เซนิกเจือปนสูงจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ เช่นลดประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา และให้เกิดมลภาวะต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการกำจัดสารประกอบอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต วิธีที่กำจัดอาร์เซนิกมีหลายวิธีซึ่งแบ่งได้ 3 วิธีหลักคือ การบำบัดโดยใช้ความร้อน (Thermal treatment), การบำบัดโดยใช้สารเคมี (chemical treatment) และการดูดซับโดยโลหะ (Adsorption) แต่วิธีเหล่านี้มีข้อเสียโดยการบำบัดด้วยความร้อน ประสิทธิภาพต่ำ ค่าติดตั้งสูง การบำบัดด้วยสารเคมีนั้นอุปกรณ์ในกระบวนการจะเกิดการกัดกร่อนจากสารเคมี และการดูดซับโดยโลหะจะทำให้โลหะที่ดูดซับอาร์เซนิกเสื่อมสภาพลงซึ่งทำให้ต้องนำโลหะนั้นมาทำการบำบัดอีกรอบทำให้ใช้เวลามากขึ้น (พิชาญ ตันติชัยปกรณ์,2541) นอกจากนี้การแยกอาร์เซนิกด้วยเยื่อแผ่นเหลวรองรับด้วยเส้นใยกลวง (Sangtumrong et al.,2007) ก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแยกได้แต่เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดคือสารป้อนต้องเป็นสารละลาย จึงไม่เหมาะสมกับคอนเดนเสทซึ่งเป็นสารอินทรีย์เนื่องจากเยื่อแผ่นเหลวนั้นเป็นสารอินทรีย์เหมือนกัน ดังนั้นการสกัดของเหลวด้วยของเหลวเป็นการบำบัดโดยใช้สารเคมีในการกำจัดอาร์เซนิกจัดเป็นวิธีที่น่าสนใจเพราะเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน (Meera et al.,2001) สามารถใช้กับสารป้อนซึ่งเป็นทั้งสารละลาย หรือเป็นสารอินทรีย์ได้ ทั้งยังออกแบบเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่องได้ ทำให้การสกัดเกิดขึ้นในเวลาที่รวดเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์เพื่อขยายขนาดกำลังการผลิตให้มากขึ้นได้

โดยทั่วไปมีการประยุกต์การสกัดของเหลวด้วยของเหลวโดยใช้หอสกัดเช่นหอสกัดแบบสเปรย์ (Spray column) หอสกัดแบบแพค (Packed column) หอสกัดแบบเพอร์ฟอเรเตดเพลท (Perforated Plate Column) หอสกัดแบบจานหมุน (Rotating Disc Contactor, RDC) และหอสกัดแบบคาร์ (Karr column) เป็นต้น แต่พบว่าหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ (Pulsed sieve plate column) มีข้อดีมากกว่าหอสกัดแบบอื่นโดยหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ให้ค่าการแยกสูง การดำเนินการง่าย ค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้พื้นที่น้อย และสามารถใช้กับสารสกัดก่อนหรือสารกัมมันตภาพรังสีได้เนื่องจากง่ายต่อการซ่อมบำรุง (Usman et al., 2006)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทจากบริษัทวีระสุวรรณ จำกัด ด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อน

สารแบบพัลส์ (Pulsed sieve plate column) เพื่อกำจัดโลหะมีพิษออกจากคอนเดนเสทก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป

1.1.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอาร์ซีนิก (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(ก))

1.1.1.1 สมบัติของอาร์ซีนิก

- เป็นธาตุหมู่ 5 ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุในกลุ่มทรานซิชัน
- มีน้ำหนักอะตอม 74.92 เลขอะตอม 33
- ระเหยเป็นไอที่อุณหภูมิ 100 °C
- ระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 °C
- ระเหิดได้ที่ 615°C บรรยากาศ 760 mm.Hg. โดยไม่มีการหลอมเหลวก่อน
- ไม่ละลายน้ำ
- ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดกำมะถันที่เย็นหรือกรดเกลือที่เย็น
- มีลักษณะเป็นผลึกโลหะมันเงามีสีเงินเทาเทา
- เปราะ หักง่าย
- เมื่อถูกความชื้นในอากาศสามารถเปลี่ยนเป็นสีดำ
- เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ (Arsenic Trioxide, As_2O_3)

สารประกอบอาร์ซีนิกแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. สารประกอบอนินทรีย์ 2. สารประกอบอินทรีย์ และ 3. ก๊าซอาร์ซีน (Arsine, AsH_3) ก๊าซอาร์ซีนนั้นมีความเป็นพิษสูงสุด จะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโลหิต เกิดภาวะโลหิตจาง สารประกอบอนินทรีย์มีความเป็นพิษรองลงมาจากก๊าซอาร์ซีน สารประกอบอนินทรีย์ที่พบมากมีอยู่ 2 รูป คือ อนุมูลประจุ +3 หรืออาร์เซไนต์ (Trivalent Form, Arsenite) และ +5 หรืออาร์เซเนต (Pentavalent Form, Arsenate) โดยอนุมูลประจุ +3 หรืออาร์เซไนต์จะมีความเป็นพิษรุนแรงมากกว่าอนุมูลประจุ +5

1.1.1.2 การใช้ประโยชน์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(ข))

ทางการเกษตร

- สารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง
- สารกำจัดวัชพืช (Herbicides)

- สารดูดความชื้น ป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของฝ้าย
- น้ำยารักษาเนื้อไม้ (Wood Preservatives)
- ผสมในอาหารสัตว์ (Feed Additives)

ทางด้านอุตสาหกรรม

- ใช้ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์ หรือโลหะผสมเพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน
- ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (Semi-conductor)
- ใช้เป็นสารให้สีแดงหรือไม่มีสีในผลิตภัณฑ์แก้ว
- ใช้เป็น Silver Reducer ในอุตสาหกรรมกระจกเงา
- ใช้ Heterocyclic Arsenic Compound (Derivatives of 5,10-Dehydrophenarsazine and Phennoksarszine) เป็น Antifouling Paints
- ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง
- ใช้ในการเก็บรักษามลพิษที่ทำจาก Polylephynes, Polyvinylchloride, Polybenzimidazole
- สารประกอบอินทรีย์อาร์ซีนิกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตพลาสติก

ทางการแพทย์

ใช้เป็นส่วนประกอบของยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว (Protozoal Diseases) โรคที่เกิดจากพยาธิบางชนิด (Helminthiasis) รวมทั้งโรคที่เกิดจากพวกสไปโรชีต (Spirochete)

ทางด้านทหาร

ใช้เป็นสารพิษในการทำสงคราม หรือยับยั้งการก่อจลาจล ซึ่งก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและเยื่อเมือก (Mucous Membrane)

1.1.1.3 ความเป็นพิษ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541(ข))

ความเป็นพิษต่อสัตว์

จากการศึกษาในสัตว์ทดลองพบว่า Trivalent Inorganic มี ความเป็นพิษมากกว่า Pentavalent และสารประกอบที่ละลายน้ำได้ จะมีความเป็นพิษมากกว่า สารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เพราะสารประกอบที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดการดูดซึมเข้าร่างกายได้ ดี พิษที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการทำงานของ SH-group ในเอนไซม์

ความเป็นพิษต่อมนุษย์

ลักษณะการเกิดพิษเนื่องจากอาร์ซีนิกส่วนใหญ่เป็นการเกิดพิษ แบบเรื้อรังจากการสัมผัสอาร์ซีนิกเข้าสู่ร่างกายนานติดต่อกัน ซึ่งอาการที่แสดงออกทางระบบต่าง ๆ แยกเป็น ดังนี้

- ที่ผิวหนังส่วนที่สัมผัสจะเกิดการระคายเคือง เกิดเป็นโรค ผิวหนัง โดยเฉพาะผิวหนังที่อยู่ตามซอกต่าง ๆ บางทีจะเป็น ตุ่มใส ๆ หรือผิวหนังแข็งด้าน
- ที่เยื่อเมือก เมื่อสัมผัสฝุ่นผง หรือก๊าซจะทำให้เกิดการระคาย เคืองตรงส่วนนั้น
- ตา จะเกิดตาแดง ตาอักเสบ
- ระบบหายใจ ทำให้หลอดลมเกิดการอักเสบ อาจจะมีผลทำให้ เกิดมะเร็งปอด
- ระบบประสาท จะเกิดอาการเบื่ออาหาร ปลายประสาท อักเสบ แขนขาชา อาจเป็นอัมพาตได้
- สมอง จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม
- อื่น ๆ เช่น เกิดโลหิตจาง อาการทางตับ ไต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสกัดของเหลวด้วยเหลวเพื่อกำจัดอาร์ซีนิกออกจากคอนเดนเสท ของบริษัทวีระสุวรรณจำกัด โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ ใช้สารสกัดคือกรดไฮโดรคลอริก , เมทานอล และสารสกัดผสมของกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอล

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะต่างๆที่มีผลกระทบต่อการสกัดอาร์เซนิกโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์ ซึ่งมีตัวแปรที่จะศึกษาดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก, เมทานอล และสารสกัดผสมของกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอล
- 2) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารป้อน และอัตราการไหลของสารสกัด
- 3) ค่าความเร็วของการพัลส์ (Pulse velocity)
- 4) จำนวนรอบในการสกัดของสารสกัด

1.2.3 เป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานของการนำกระบวนการสกัดด้วยหอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์ ไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท โดยใช้สารสกัดคือกรดไฮโดรคลอริก, เมทานอล และสารสกัดผสมของกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอล ด้วยหอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์ ได้แก่

- 1) ความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกในช่วงความเข้มข้น 0-1 M และเมทานอล ในช่วง 0-20%โดยปริมาตร และความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอล
- 2) ศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็นอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4,1:5 และ 1:1, 2:1, 3:1, 4:1, 5:1
- 3) ศึกษาค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดในช่วง 4-20 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 4) จำนวนรอบในการสกัดของสารสกัด

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท โดยหอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์

- 1.4.2 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องมือในการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์
- 1.4.3 เป็นแนวทาง และข้อมูลพื้นฐานของการนำกระบวนการสกัดของเหลวด้วยของเหลว โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ ไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

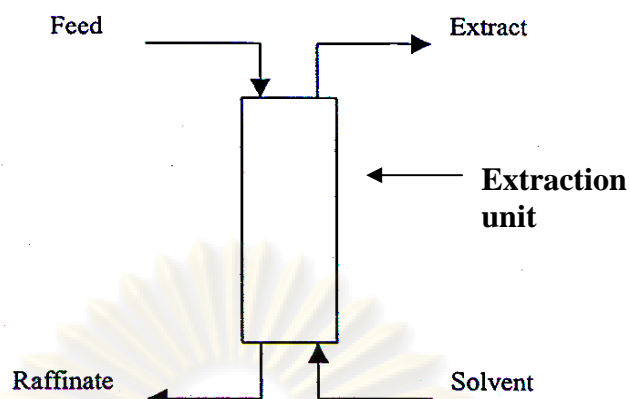
2.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่สำคัญหน่วยหนึ่งในสาขาวิศวกรรมเคมี และเป็นกระบวนการที่มีทฤษฎีพื้นฐานรองรับ จะพบระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยแบบนี้ได้มากในอุตสาหกรรมสามประเภท ได้แก่ อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการสกัดโลหะจากแร่ และอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ นอกจากนี้อาจจะพบได้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

สำหรับอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ การสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นระบบปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่มีความเหมาะสมมาก เนื่องจากเหตุผลหลายประการ (Alegret, 1988) ได้แก่

- 1) เป็นกระบวนการที่สามารถออกแบบให้มีหลายขั้นตอนได้ (Multistage)
- 2) สามารถออกแบบและสร้างให้ทำการควบคุมระยะไกลได้
- 3) เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดของเสียน้อย เพราะมีการป้อนเวียนซ้ำได้
- 4) การเสื่อมสภาพของตัวทำละลาย สามารถถูกทดแทนได้ง่ายทั้งในกระบวนการแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

การสกัดด้วยตัวทำละลาย หรือการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid-Liquid Extraction) เป็นการแยกสารในรูปของสารละลาย โดยอาศัยหลักการที่สำคัญ คือ “ความสามารถในการละลาย (Solubility) ที่ต่างกันของตัวถูกละลาย ในตัวทำละลายที่ต่างชนิดกัน” ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้น สารป้อน (Feed) ที่มีส่วนประกอบของตัวถูกละลายละลายอยู่ในตัวทำละลายชนิดหนึ่ง นำมาผสมกับตัวทำละลาย (Solvent) อีกชนิดหนึ่งที่มีความสามารถในการละลายกับตัวถูกละลายได้มากกว่า โดยที่ตัวทำละลายทั้งสองชนิดจะไม่ละลายซึ่งกันและกัน หรือละลายกันได้น้อยมาก ทำให้ภายหลังการสกัดจะเกิดการแยกชั้นของวัฏภาคขึ้น และตัวถูกละลายส่วนใหญ่จะเกิดการถ่ายเทมวลข้ามวัฏภาคตัวทำละลาย โดยตัวทำละลายที่อิมตัวด้วยตัวถูกละลายเรียกว่า เอกซ์แทรกท์ (Extract) ส่วนสารป้อนที่เหลือจากการสกัดเรียกว่า ราฟฟิเนท (Raffinate) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพหอสกัดสำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลาย (สุภัทร สัมมาภสิพงษ์, 2549)

2.1.1 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction Process)

การถ่ายเทมวลของตัวถูกละลายจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่งในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ

1) การสกัดแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี (Extraction without chemical reaction) เป็นการสกัดโดยอาศัยสมบัติการละลายทางกายภาพ (Physical solubility) ที่ต่างกันของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่างชนิดกัน การสกัดในลักษณะนี้เป็นการและเปลี่ยนมวลสารจากวัฏภาคที่มีสารอยู่หลายชนิดไปสู่วัฏภาคที่มีตัวทำละลายที่เลือกละลายเฉพาะสารที่ต้องการหรือละลายสารที่ไม่ต้องการออกได้มากที่สุด

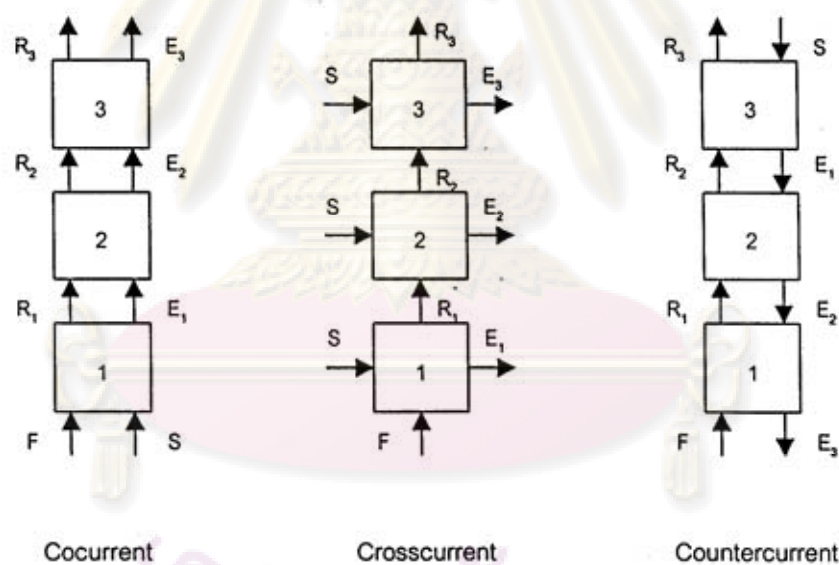
2) การสกัดที่มีปฏิกิริยาเคมี (Extraction with chemical reaction) เกิดขึ้นโดยการเติมสารที่เรียกว่า สารสกัด (Extractant) ในตัวทำละลาย เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลและเพิ่มค่าการเลือกสกัด (Selectivity) เฉพาะสารที่ต้องการสกัดเท่านั้น สารสกัดจะทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ต้องการสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนและถูกสกัดโดยวัฏภาคตัวทำละลาย ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) เช่น การกำจัดสารประกอบซัลเฟอร์ในโรงกลั่นน้ำมันด้วยการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ (Reversible) เช่น การสกัดทองแดงจากสารละลายที่มีความเข้มข้นทองแดงมากกว่าไปยังวัฏภาคของน้ำมันก๊าดซึ่งประกอบด้วยสารสกัดชนิดหนึ่งคือ LIX 64N

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย เป็นการสกัดแบบหลายขั้นตอนซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้ดังนี้ คือ

1) ขั้นตอนแบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Co current) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายไหลในทิศทางเดียวกันกับสารป้อนในแต่ละขั้นตอนของการสกัด เพื่อเป็นการเพิ่มเวลาในการสกัด (Residence time) แต่ไม่ได้เป็นการเพิ่มปริมาณการสกัดเกินไปกว่าการสกัดขั้นตอนเดียว

2) ขั้นตอนแบบไหลตั้งฉากกัน (Crosscurrent) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายจะถูกเติมเพื่อให้สกัดในแต่ละขั้นตอนแล้วไหลแยกออกมา ทำให้สามารถสกัดแยกสารออกได้ปริมาณมากกว่าการสกัดแบบขั้นตอนเดียว แต่เป็นการสิ้นเปลืองสารสกัดมาก

3) ขั้นตอนแบบไหลสวนทางกัน (Countercurrent) เป็นลักษณะการไหลที่ตัวทำละลายสวนทางกับสารป้อนในแต่ละขั้นตอนของสารสกัด วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถใช้กับตัวถูกละลายที่มีอัตราส่วนของสารกระจายใกล้เคียงกันมากๆ ได้ ซึ่งทำให้สามารถแยกตัวถูกละลายที่ต้องการสกัดให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ และทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วย



Cocurrent

Crosscurrent

Countercurrent

(F = Feed, R = Raffinate, E = Extract และ S = Solvent)

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการไหลแบบต่างๆ ในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

(สุภัทร สัมมาภิสิงค์, 2549)

2.1.2 ขั้นตอนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอาจสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

- 1) นำของเหลวที่เป็นสารป้อนมาผสมกับตัวทำละลายที่เลือกใช้ให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการสกัด
- 2) ผสมสารป้อนและตัวทำละลาย ทำให้เกิดการสัมผัสกันเป็นเวลาพอสมควร ปล่อยให้สารผสมแยกออกเป็นสองวัฏภาค
- 3) แยกสารที่สกัดได้และส่วนที่เหลือออกจากกัน
- 4) วิเคราะห์ผลการสกัดและประสิทธิภาพการสกัด
- 5) นำตัวทำละลายที่อยู่ในแต่ละวัฏภาคกลับมาใช้ใหม่

วิธีการข้อ 1) และข้อ 2) อาจจะรวมกันอยู่ในเครื่องมือที่เป็นหอ (Column) หรือเป็นขั้นตอน (Stage) หลาย ๆ ขั้นตอนต่อกันแบบอนุกรม และในแต่ละขั้นตอนจะมีการกวนเพื่อให้วัฏภาคทั้งสองสัมผัสกันได้ดี

2.2 สารสกัด (Extractants)

2.2.1 หลักการเลือกสารสกัด

1) ความสามารถในการละลาย ต้องมีความสามารถในการละลายตัวถูกละลายที่ต้องการออกได้สูงเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล ถ้าสารที่ต้องการสกัดเป็นของเหลวสารสกัดต้องไม่ละลายในสารละลายที่ถูกสกัด สารสกัดต้องมีความสามารถในการละลายสูงในขณะที่มีการใช้จำนวนน้อย และต้องสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการบำบัดที่ไม่ยุ่งยาก

2) มีความสามารถในการคัดแยกสูง โดยสามารถแบ่งออกได้สองชนิดคือ

2.1) สามารถละลายตัวถูกละลายออกจากสารละลายเดิมได้ดี

2.2) สามารถที่เลือกละลายตัวถูกละลายและทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสารที่สกัดแล้วกับสารที่ถูกสกัดได้

ความสามารถในการคัดแยกของสารสกัดสามารถวัดค่าได้โดยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ดังสมการ

สัดส่วนโมลของสารในสายสกัด

$$\text{สัมประสิทธิ์การกระจายตัว} = \frac{\text{สัดส่วนโมลของสารในสายสกัด}}{\text{สัดส่วนโมลของสารในสายที่เหลือ}} \quad (2.1)$$

สัดส่วนโมลของสารในสายที่เหลือ

2.2.2 การเลือกสารสกัดที่เหมาะสม (Cusack et al., 1991)

การเลือกสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเป็นเรื่องที่ยุ้งยากในการพิจารณาสมบัติ โดยสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีค่าการเลือกสกัดสูง มีความสำคัญมากที่สุดในการเลือกสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดด้วยตัวทำละลาย
- 2) ง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ มีความสำคัญเกือบเท่ากับค่าการเลือกสกัด เพราะว่าในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย การแยกตัวถูกละลายออกจากตัวทำละลายมีความจำเป็น ตัวทำละลายจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์
- 3) มีความสามารถละลายซึ่งกันและกันกับสารป้อนต่ำ
- 4) มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันกับสารป้อนพอสมควร ในกระบวนการสกัด โดยทั่วไปจะผสมของเหลวทั้งสองวัฏภาคเข้าด้วยกัน แล้วปล่อยให้แยกชั้น โดยแรงขับของการแยกชั้นเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งควรมีความแตกต่างกันอย่างน้อย 2% และความแตกต่างที่เหมาะสมคือมากกว่า 5% ซึ่งจะทำให้เวลาในการแยกชั้นมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้
- 5) มีแรงตึงผิวพอสมควร แรงตึงผิวมีผลกระทบท่อการผสม ในระบบที่มีแรงตึงผิวต่ำพลังงานที่ใช้ในการกระจายหยดของสารจะมีค่าต่ำ แต่ถ้ามีค่าต่ำมากคือน้อยกว่า 1 dyne/cm จะทำให้เกิดอิมัลชันได้ง่ายซึ่งไม่สามารถแยกชั้นกันได้ในทางกลับกัน ในระบบที่มีแรงตึงผิวสูงมากคือมากกว่า 50 dyne/cm ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการกระจายหยดของสาร และหยดก็มีแนวโน้มที่จะรวมกันใหม่ (Re-coalesce)
- 6) มีความหนืดต่ำ ในกระบวนการสกัดโดยทั่วไปควรใช้สารที่มีความหนืดน้อยกว่า 10 cp เพื่อให้ง่ายต่อการถ่ายเทมวล ในการเลือกควรเลือกสารที่มีความหนืดต่ำ ๆ เท่าที่จะเป็นไปได้
- 7) มีการกักร้อนต่ำ การกักร้อนของสารป้อนจะถูกกำหนดโดยระบบไว้อยู่แล้ว ถึงแม้ว่าอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยการปรับภาวะของระบบทั้งอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด - ด่างก็ตาม สิ่งที่พึงกระทำได้คือการเลือกสารสกัดที่กักร้อนน้อยกว่าสารป้อน

- 8) มีการติดไฟต่ำและมีความเป็นพิษต่ำ ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงสารที่มีการติดไฟได้ การเลือกเครื่องมือ และภาวะการทำงานควรพิจารณาเป็นพิเศษเพื่อลดปริมาณของสาร และถ้าสารมีความเป็นพิษสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงกระบวนการที่จะแยกสารสกัดออกจากระบบ
- 9) มีราคาถูกและหาได้ง่าย ในทางอุตสาหกรรมสารสกัดต้องมีราคาถูก และหาได้ง่ายในท้องตลาด

2.2.3 ชนิดของสารสกัด

สารสกัดที่ใช้ในกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของสารสกัด (Talvarides et al., 1987) ดังนี้

1) สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant)

สารสกัดประเภทนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทย่อย คือ สารสกัดชนิดกรด (Acidic Extractant) และสารสกัดชนิดคีเลต (Chelate Extractant) สารสกัดประเภทแรกประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น $-COOH$, $=P(O)OH$, $-SO_3H$ ส่วนประเภทหลังสารสกัดจะทำปฏิกิริยาคีเลชัน (Chelation) กับไอออนโลหะ ไอออนโลหะชนิดที่มีประจุบวกสามารถทำปฏิกิริยากับสารสกัดชนิดกรดทั้งสองประเภทเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง และสามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์ดังสมการ 2.2



ในที่นี้เครื่องหมายขีดด้านบน หมายถึง สารนั้นอยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ นอกจากนั้นสมการข้างต้นยังแสดงถึงปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุบวกโดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไฮโดรเนียมไอออนกับไอออนโลหะ ความสามารถในการสกัดไอออนโลหะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่างของวัฏภาคสารละลาย นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับธรรมชาติของไอออนโลหะนั้นๆ

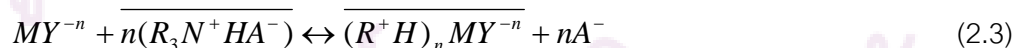
สารสกัดประเภทกรดที่พบว่ามีประโยชน์อย่างมากในการสกัดไอออนโลหะเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อนุพันธ์ของกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัส (Organic Derivatives of Phosphorous Acids) และกรดโมโนคาร์บอกซิลิก (Monocarboxylic Acids) ซึ่งในสารสกัดประเภทนี้โดยเฉพาะ

กรดอัลคิลฟอสฟอริก (Alkyl Phosphoric Acids) ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรดได-2-เอทิลเฮกซิลฟอสฟอริก (di-2-ethylhexyl phosphoric acids; D2EHPA)

สารสกัดประเภทคีเลท ได้แก่ สารสกัดที่ประกอบไปด้วยดอนเนอร์กรุป (Donor Groups) ซึ่งสามารถที่จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนไบเดนเทต (Bidentate Complexes) กับไอออนโลหะได้ สารสกัดประเภทคีเลทเชิงพาณิชย์จำกัดอยู่เพียงสองประเภท คือ (ก) ประเภทกลุ่มของ 2-ไฮดรอกซีเบนโซฟีโนนออกซิม (2-hydroxy benzophenone oximes) ที่ผลิตโดยบริษัท Henkel Corporation (General Mills Inc. USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ LIX สารสกัด Acorga ที่ผลิตโดยบริษัท Imperial Chemical USA และสารสกัด SME ที่ผลิตโดยบริษัท Shell Chemical USA (ข) ประเภทกลุ่มของ 8-ไฮดรอกซีควิโนไลน์ (8-Hydroxyquinoline) ผลิตโดยบริษัท Sherex (Ashland Chemical Company USA) ภายใต้เครื่องหมายการค้าชื่อ Kelex สารสกัดเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นมาโดยเฉพาะเพื่อใช้สกัดไอออนทองแดงทั้งจากสารละลายกรดที่ผ่านมาจากกระบวนการการชะละลาย (Acidic Leach Liquors) และจากสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline)

2) สารสกัดชนิดด่าง (Basic Extractant)

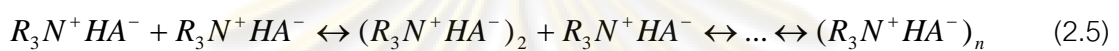
เป็นสารสกัดอินทรีย์ซึ่งง่ายต่อการเกิดเป็นรูปของเกลือในขณะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด สารสกัดที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นพวกเอมีนและแอมโมเนียมเฮไลด์ชนิดจตุภูมิ (Quaternary Ammonium Halides) มีการพัฒนากระบวนการใช้เอมีนของเกลือแอมโมเนียม (Ammonium salt) ชนิดปฐมภูมิ (Primary; RNH_2) ชนิดทุติยภูมิ (Secondary; R_2NR) ชนิดตติยภูมิ (Tertiary; R_3N) และ ชนิดจตุภูมิ (Quaternary; R_4N^+) ประสิทธิภาพของการสกัดไอออนโลหะด้วยสารสกัดเอมีนขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของไอออนโลหะที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายของน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีประจุลบ (Atomic Species) ซึ่งองค์ประกอบนี้ถูกสกัดได้ด้วยเอมีน



เพื่อให้การแลกเปลี่ยนเกิดขึ้น เอมีนต้องเปลี่ยนไปให้อยู่ในรูปของเกลือเอมีนที่เหมาะสมเพื่อแลกเปลี่ยนประจุบวกกับไอออนโลหะ ดังนี้



นั่นคือเอมีนจะรวมตัวกับกรดเป็นเกลือของเอมีนซึ่งมีตัว $R_3N^+HA^-$ ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์นี้สัมผัสกับสารละลายของน้ำที่ประกอบไปด้วยไอออนโลหะ MY^n จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุตั้งสมการ ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสกัดไอออนโลหะโดยการใช้อเอมีนเป็นสารสกัด คือ การรวมตัวของเอมีนที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายอินทรีย์ ซึ่งการรวมตัวนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวทำละลายและธรรมชาติของแอมโมเนียที่มีประจุบวกและประจุลบ (Ammonium Cation และ Anion) การรวมตัวของเอมีนทำให้เกิดวัฏภาคที่สามขึ้นดังสมการ



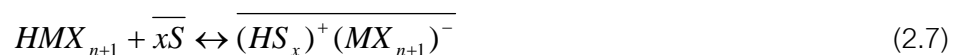
การเกิดวัฏภาคที่สามทำให้วัฏภาคสารละลายอินทรีย์แยกตัวออกเป็นสองส่วนซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของการนำสารสกัดชนิดนี้มาใช้แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารปรับปรุงสภาพ (Modifiers) เช่น พวก long-chain aliphatic alcohol ตัวอย่างสารสกัดชนิดต่าง เช่น tri-n-octylamine (TOA) หรือเกลือของเอมีน เช่น Methyltrioctylammonium Chloride (Aliquat336)

3) สารสกัดชนิดกลาง (Neutral Extractant)

สารสกัดประเภทกลาง (Neutral) หรือ สารสกัดประเภทซอลเวท (Solvating) เป็นสารสกัดที่มีเฉพาะดอนเนอร์รู๊ป จึงไม่สามารถแตกโปรตอนได้ ดังนั้นสารสกัดประเภทนี้จึงไม่มีกลุ่มของไอออนที่มีประจุบวกหรือไอออนที่มีประจุลบเป็นส่วนประกอบของโมเลกุล ไอออนโลหะในวัฏภาคของสารละลายของน้ำจะถูกสกัดโดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุเป็นกลาง ความสามารถการเข้าทำปฏิกิริยาของสารสกัดชนิดนี้จะขึ้นกับความสามารถของไอออนโลหะในการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคสารละลายของน้ำ เช่นเดียวกับกรณีของสารสกัดชนิดต่าง การสกัดเป็นการรวมตัวกันของอะตอมโลหะที่อยู่ตรงกลาง (Central Metal Atom) ของสารประกอบเชิงซ้อนหรือรวมกับโปรตอนในกรณีของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของกรด



หรือ



เมื่อ S เป็นสารสกัดชนิดซอลเวท ความสามารถในการละลายของสารประเภทอนินทรีย์ในวัฏภาคของสารละลายอินทรีย์เพิ่มขึ้นได้โดยการทำปฏิกิริยารวมตัวกันกับสารสกัดชนิดโซลเวทตั้งสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตัวอย่างของสารสกัดชนิดเป็นกลาง เช่น Tri-n-butylphosphate (TBP)

2.3 เครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย

2.3.1 หลักการเลือกใช้เครื่องมือในการสกัด

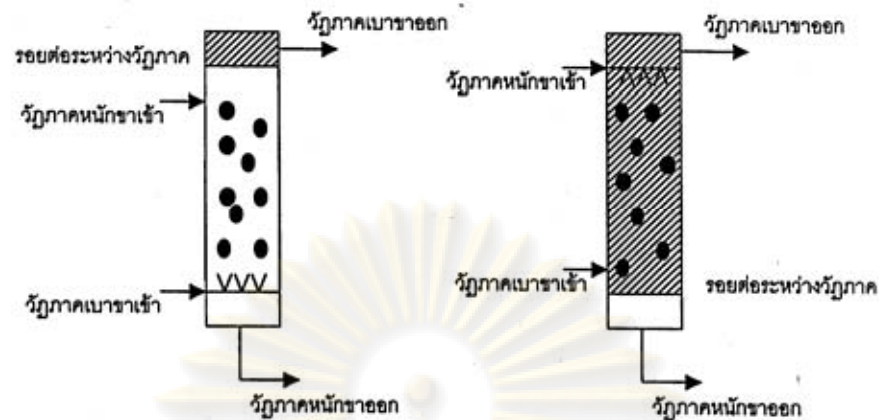
หลักการเลือกใช้เครื่องมือในการสกัดจะพิจารณาจากประสิทธิภาพของการสกัด ความเหมาะสมในการใช้งาน ขนาดและที่ตั้ง ชนิดของสารที่ทำกรสกัด รวมถึงหลักการเลือกทางเศรษฐศาสตร์ความประหยัดและความคุ้มค่า

การเลือกเครื่องสกัดให้เหมาะสม โดยความต้องการพื้นฐานในเชิงอุตสาหกรรม เฉพาะเครื่องสกัดแบบการสกัดของเหลวด้วยของเหลวมีสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่

1. ประสิทธิภาพการสัมผัสกันระหว่างเฟส
2. ประสิทธิภาพการแยกเฟสหลังจากการสกัด
3. ความเหมาะสมกับการใช้งานและสถานที่ตั้ง
4. สามารถควบคุมได้สะดวกและใช้แรงงานน้อย
5. สามารถทำความสะอาดได้ง่าย

2.3.2 หลักการทำงานของเครื่องสกัด

เครื่องสกัดประเภทหอสกัดภายในประกอบด้วยวัฏภาคหนึ่งจะกระจายเป็นหยดของเหลวเรียกว่า “วัฏภาคกระจาย” (Dispersed phase) และไหลสวนทางกับอีกวัฏภาคหนึ่งซึ่งเรียกว่า “วัฏภาคต่อเนื่อง” (Continuous phase) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและความแตกต่างของความหนาแน่นของทั้งสองวัฏภาค วัฏภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือเรียกว่า “วัฏภาคเบา” (Light phase) จะถูกบ่อนเข้าทางด้านล่างของหอและไหลไปทางด้านบนของหอ สัมผัสกับวัฏภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่าหรือเรียกว่า “วัฏภาคหนัก” (Heavy phase) ซึ่งจะถูกบ่อนเข้าทางด้านบนของหอและตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วง โดยภายในหอจะเกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interface) ขึ้น ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างวัฏภาคขึ้นกับการกำหนดให้วัฏภาคที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าหรือมากกว่าเป็นวัฏภาคกระจาย ดังแสดงในรูป 2.3



ระบบที่มีปฏิภาคเบาเป็นเฟสกระจาย

ระบบที่มีปฏิภาคหนักเป็นเฟสกระจาย

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการไหลและตำแหน่งของรอยต่อระหว่างปฏิภาคในหอสกัด
(สุภัทร สัมมาภัสร์, 2549)

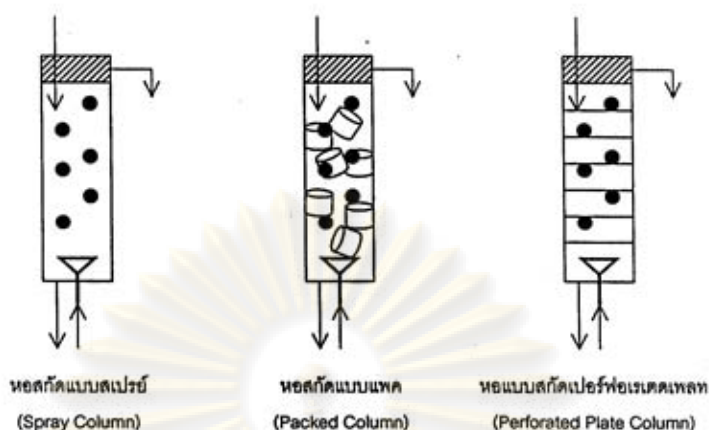
2.3.3 ชนิดของหอสกัด

หอสกัดชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งชนิดได้ตามลักษณะการใช้พลังงานกลภายนอกได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้ (วรพัฒน์ อรรถยุติ. 2526)

2.3.3.1 ชนิดไม่ใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด

เป็นหอสกัดที่มีประสิทธิภาพในการสกัดต่ำ เพราะการที่ไม่ได้เติมพลังงานกลทำให้มีหยดขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่การถ่ายเทมวลสารน้อย และอัตราการสกัดย่อมลดลงตามไปด้วย ดังนั้นหอสกัดชนิดนี้จึงไม่ค่อยถูกนำมาใช้นัก แต่ทว่าในกรณีที่ต้องการสกัดกระทำได้ง่ายเป็นพิเศษ เช่น การสกัดสารจำพวก Mercaptans ที่อยู่ในปฏิภาคอินทรีย์โดยโซดาไฟ ในกรณีเช่นนี้หอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกลนี้มีความเหมาะสมมาก

หอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล ดังแสดงในรูป 2.4 ได้แก่ หอสกัดแบบสเปรย์ (Spray column) หอสกัดแบบแพค (Packed column) และหอสกัดแบบเพอร์ฟอเรตเตดเพลท (Perforated Plate Column) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดงหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล (วรพัฒน์ อรรถยุติ. 2526)

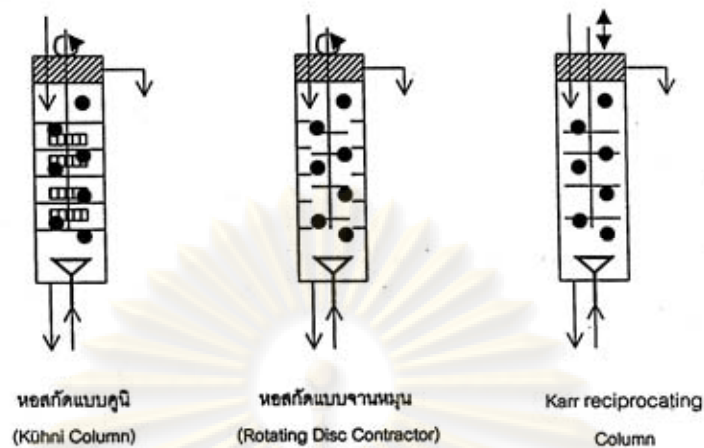
2.3.3.2 ชนิดใช้พลังงานกลมาเพิ่มอัตราการสกัด

เป็นหอสกัดชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง มีความนิยมใช้กันมากกว่าหอชนิดไม่ใช้พลังงานกล พลังงานกล พลังงานกลที่ใช้จะอยู่ในรูปของการกวนหรือการเขย่าซึ่งจะทำให้เกิดการแตกตัวของหยดในหอสกัด ช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวล ดังนั้นประสิทธิภาพการสกัดของหอชนิดนี้จะดีกว่าหอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล

1) ชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน (Rotation)

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน จะมีแกนหมุนติดดิสก์หรือจาน (Disc) หรืออิมเพลเลอร์ (Impeller) หรือเทอร์ไบน์ (Turbine) ทำหน้าที่กวนให้สารกระจายเป็นหยดของเหลว เมื่อสัมผัสกับดิสก์ซึ่งกำลังหมุนอยู่จะถูกเหวี่ยงออกไปทำให้หยดกระจายออกเป็นหยดเล็ก ๆ มีผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารเพิ่มมากขึ้น การปรับความเร็วของแกนหมุนสามารถกำหนดพื้นที่ถ่ายเทมวลสารได้ ทำให้สามารถเพิ่มหรือลดประสิทธิภาพของเครื่องได้

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุนดังแสดงในรูป 2.5 ได้แก่หอสกัดแบบคูนิ (Kuhni column) หอสกัดแบบจานหมุน (Rotating Disc Contactor, RDC) และหอสกัดแบบคาร์ (Karr column) เป็นต้นดังรูป

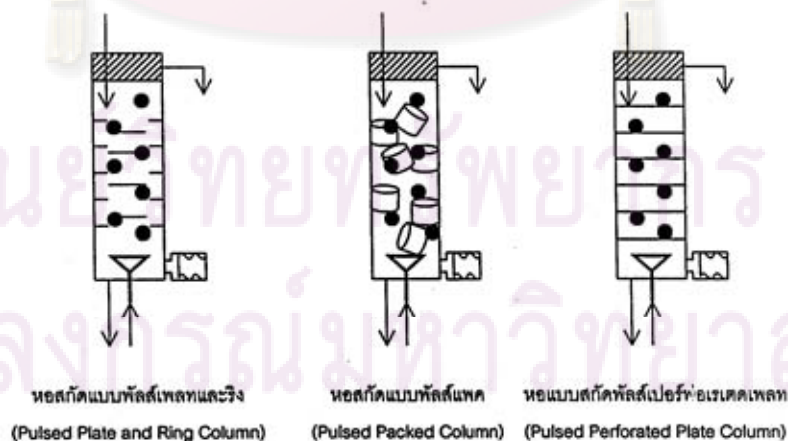


รูปที่ 2.5 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแกนหมุน (วรพัฒน์ อรรถยุติ. 2526)

2) ชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า (Pulsation)

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่ามีการทำงานคล้ายการเขย่าเป็นจังหวะ หอสกัดนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบแกนหมุน แต่ในเวลาเดียวกันก็สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยมากกว่า โดยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของหอแบบเขย่านี้ทำให้สามารถสร้างหอได้สั้นกว่าหอสกัดแบบแกนหมุน

หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า ดังแสดงในรูป 2.6 ได้แก่ หอสกัดแบบพัลส์แพค (Pulsed packed column) หอสกัดแบบพัลส์เพลทและริง (Pulsed plate and ring column) และหอแบบสกัดพัลส์เพอร์ฟอเรตเตดเพลท (Pulse plate perforated plate column) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า (วรพัฒน์ อรรถยุติ. 2526)

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งแยกชนิดของหอกลิ้นตามลักษณะการทำงาน ภายในได้เป็น 2 แบบ คือ เครื่องสกัดแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential contactor) และเครื่องสกัดแบบขั้น (Staged extractor) โดยที่เครื่องสกัดแบบดิฟเฟอเรนเชียลจะคิดเป็นลักษณะคล้ายกับการดูดซึมของแก๊ส ส่วนเครื่องสกัดแบบขั้นจะขึ้นกับแนวคิดที่พัฒนามาจากหอกลิ้น

2.4 เครื่องสกัดสำหรับงานวิจัย (จรัญจน์ อีซอ, 2541)

2.4.1 หอสกัดแบบพัลส์ (Pulsed Extractor)

เมื่อ 50 ปีที่แล้ว Pulsed column ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านนิวเคลียร์สำหรับขบวนการสกัดแยกแร่ยูเรเนียม และใช้ในขบวนการเกี่ยวกับเชื้อเพลิงเตาปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งทำให้มีการปรับปรุง contractor ให้มีความเหมาะสมต่อสภาพการใช้งาน

คอลัมน์ในการสกัดของเหลวด้วยของเหลวซึ่งถูกพัฒนาใช้กันอย่างแพร่หลายในสาขาทางด้านนิวเคลียร์ จากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า Pulsed column มีประโยชน์มากในด้านนี้คือมีการควบคุมการทำงานง่าย มีความทนทานสูง มีประสิทธิภาพ และใช้พื้นที่น้อย

คอลัมน์ที่มีการกวนทางกล ด้วยชุดการหมุนทัวๆไปแล้วจะให้ความจุหรืออัตราการไหลต่อพื้นที่ (Throughput) น้อยกว่า contractor ที่ไม่มีเครื่องกวน ถึงแม้ว่าแบบมีเครื่องกวนจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบไม่มีเครื่องกวน ดังนั้นในการทดลองที่ผ่านมาก็ได้มีการพัฒนาคอลัมน์สกัดด้วยการมีการกวน เช่นการพัลส์ ในเครื่องกวนแบบพัลส์ พลังงานที่ให้ในระบบจะนำไปใช้ในการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดยวิธีการพัลส์ เช่นลูกสูบที่ชักกลับไปกลับมา (reciprocating piston), ลูกสูบ (bellow), diaphragm หรือชิ้นส่วนของเพลทที่เจาะรูที่การเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ขณะที่เฟสของเหลวทั้งสองสัมผัสกันเมื่อมีการไหลสวนทางกันในคอลัมน์

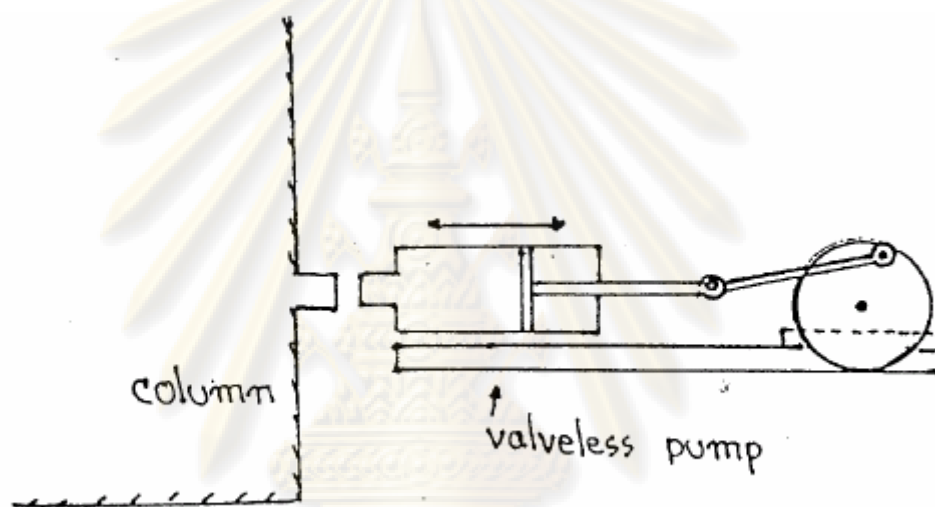
ลักษณะการทำงานของคอลัมน์ที่มีการพัลส์จะแสดงโดย Van Dijet (ค.ศ. 1935) ได้เป็นผู้เสนอวิธีการพัลส์ 2 แบบ

1. การใช้เพลท (plate) ที่มีการเจาะรูโดยจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาขึ้น และลงตามแนวตั้งของคอลัมน์เมื่อมีของเหลวไหลผ่าน
2. โครงสร้างภายในของการสกัด เช่น packing และ sieve plate หยุดนิ่ง ขณะที่ของเหลวถูกพัลส์ด้วยไฮดรอลิกโดยกลไกของการพัลส์ภายนอก พลังงานที่ให้ในการพัลส์จะเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนมวลโดยการเพิ่มพื้นที่สัมผัสหรือจะสร้างให้เกิดความปั่นป่วนสูงขึ้นในระบบ โดยการให้ความเร่งและความหน่วงกลับไปกลับมาในของเหลว

2.4.2 การทำงานโดยระบบพัลส์ (Pulse generation)

ท้าวๆไปนั้นการพัลส์จะต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่และแอมพลิจูดของพัลส์อุปกรณ์ทางกลที่ต่างกันจะให้คลื่นพัลส์ต่างๆ กัน เช่น คลื่นรูปไซน์ (Sine wave), รูปฟันเลื่อย (saw tooth wave) และรูปกึ่งสี่เหลี่ยม (semi-square wave)

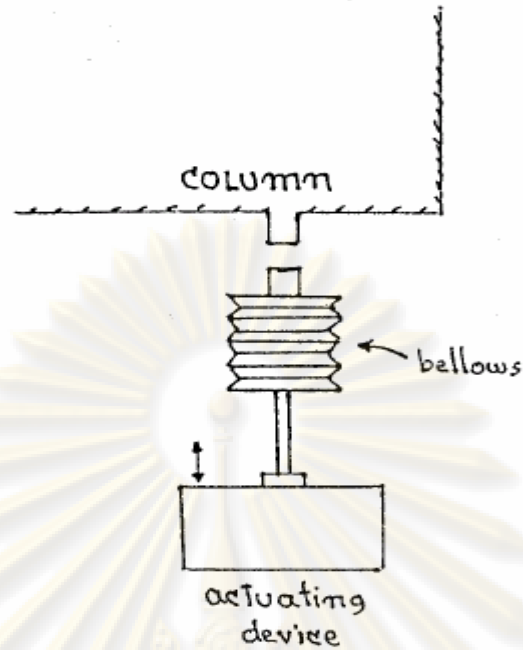
อุปกรณ์ชุดที่ 1 คือพัลส์โดยทั่วไปจะใช้เครื่องกำเนิดพัลส์ที่ประกอบด้วย Valve less plunger pump เชื่อมติดอยู่กับส่วนบนของคอลัมน์โดยใช้การเชื่อมโดยท่อ รูปแบบการเคลื่อนที่ของพัลส์เป็นรูปไซน์ ความถี่และแอมพลิจูดจะเปลี่ยนโดยเปลี่ยนหน่วยของเกียร์ และการปรับสโตรก (stroke) ของ valve less plunger pump ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดง reciprocating pump ซึ่งมีการปรับแอมพลิจูดของการพัลส์อย่างง่าย แล้วผ่านไปยัง stroke-adjustment ของ pump และปรับความถี่ไปยัง gear box บน driver

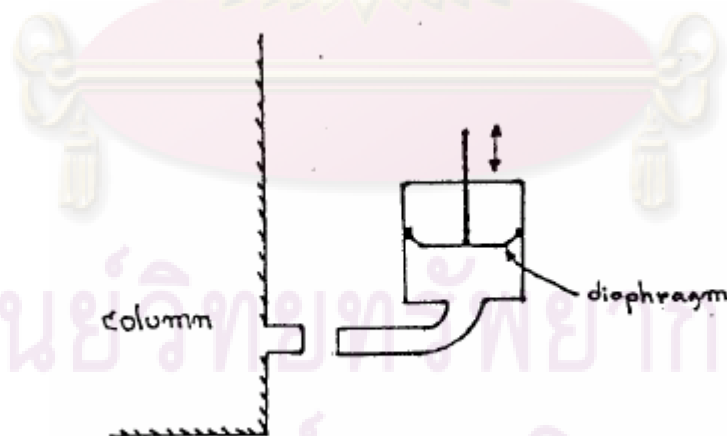
(จิรวัจน์ อีซอ, 2541)

อุปกรณ์ชุดที่ 2 คือพัลส์ที่ประกอบด้วยลูกสูบ (Bellow) ที่เป็นพลาสติกหรือโลหะดังรูป 2.8 ลูกสูบจะติดอยู่กับส่วนบนของคอลัมน์และจะมีตัว follower และลูกเบี้ยวติดอยู่ด้วย อุปกรณ์ชนิดนี้จะให้คลื่นรูปต่างๆ คือคลื่นรูปไซน์, รูปฟันเลื่อย และรูปกึ่งสี่เหลี่ยม สามารถทำงานโดยลูกสูบที่ชักไปมาโดยพลังงานกล, ไฮดรอลิกหรือการควบคุมด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 โฉงะทึมึความยึดหญึนหรือ plastic bellow ทึมึการยึดหญึน โดยมึการเคลึอนทึกลับไป กลับมาด้วยไฮดรอลึกหรือมึการส่งสัญญาณไฟฟ้า (จึรวจัน อึชอ, 2541)

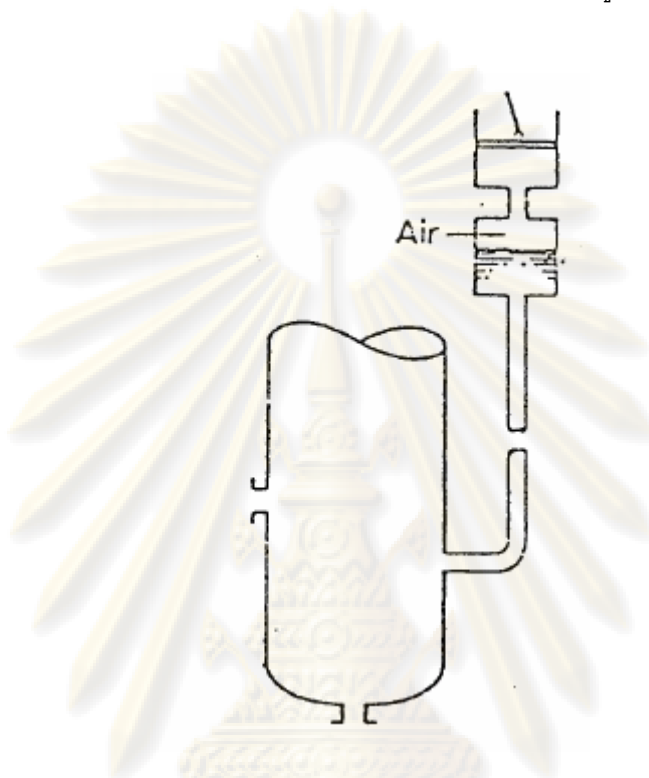
อุปกรณัซุดทึ 3 หนว้การพัลส์ทึใช้คึอ Diaphragm ดังรูป 2.9 ใช้แทน valve less plunger pump หรือลูกสูบ กลไกการทำงานใช้การปรับลูกเบ้ยว การเดินเครื่งใช้มอเตอร์หรือ ลูกสูบสโตกต่าง ๆ หรือ proportioning pump โดยไม่มี check valve



รูปที่ 2.9 แสดงหนว้การพัลส์ทึเป็นแบบ diaphragm (จึรวจัน อึชอ, 2541)

สำหรับสารละลายทึมึการกัดกร่อนหรือ แผล้งสี จะไม่เหมาะสมกัอุปกรณัการ พัลส์ข้างต้นเนื่งจากสารจะต้องสัมผัสโดยตรงกัของเหลว Baird (ค.ศ. 1965) และ Cloete (ค.ศ.

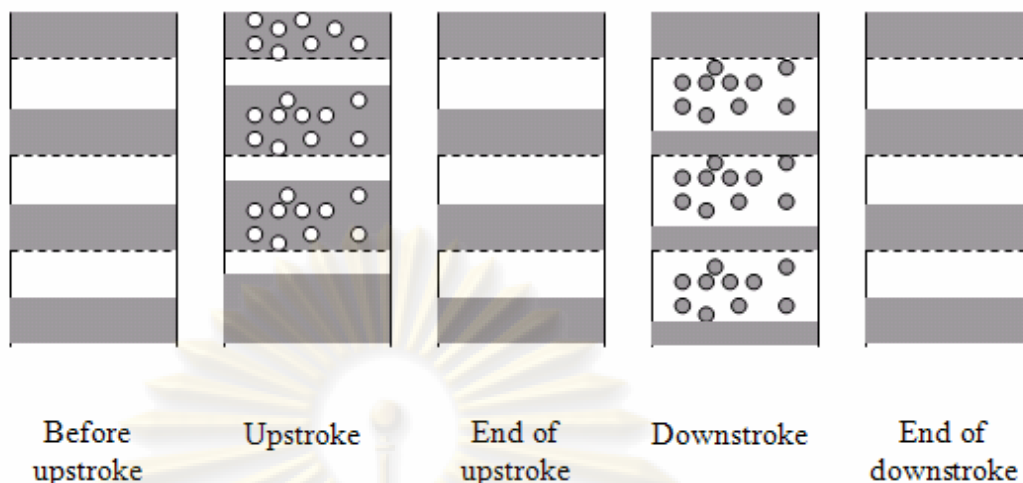
1968) และ Streat (ค.ศ. 1963) มีแนวความคิดใหม่ในการพัลส์โดยการอัดอากาศ ซึ่งสามารถใช้ในคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่ได้ด้วยดังแสดงในรูป 2.10 Cloete และ Streat เกี่ยวกับการเชื่อมต่อเส้นทางในการพัลส์ของคอลัมน์ เพื่อที่จะอัดอากาศใน chamber ซึ่งความดันจะแปรเปลี่ยนโดยจะมีการควบคุมโดยใช้ cyclic leakage (การรั่วไหลเป็นรอบ) ด้วยการใช้ลูกเบี้ยวหรือ flapper valve



รูปที่ 2.10 แสดง air pulsing ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่มีการกด และการขยายของอากาศที่อยู่เหนือ dip tube (จิรวัจน์ อีซอ, 2541)

2.4.3 หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ (Pulse perforated plate column)

การพัลส์ของ Pulse perforated plate column หรือ pulse sieve plate column จะเป็นแบบ coalescence-redispersion cycle (มีการรวมตัว และกระจายตัวซ้ำไปมา) ในเฟสของของเหลวทั้งสอง การลอยตัวของเฟสกระจายจากเพลทหนึ่งไปอีกเพลทหนึ่ง ดังรูป 2.11 ซึ่งมีการรวมตัวขึ้นไปเหนือหรือต่ำกว่าของอีกเพลทหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับว่าของเหลวหนักหรือเบาที่เป็นเฟสกระจาย ชั้นที่ถูกรวมตัวนี้ไม่มีแรงเพียงพอที่จะทำให้ของเหลวผ่านแผ่นรูพรุนได้ เพราะจะมีแรงตึงผิวระหว่างผิวหน้า จนกระทั่งจะมีการพัลส์ขึ้นไปหรือลงมาอีก ซึ่งจะเป็นแรงผลักดันให้เฟสกระจายตัวผ่านแผ่นเจาะรูพรุนขึ้นไปในเพลทต่อไป ดังนั้นจะเห็นว่าสำหรับการทำงานที่มีประสิทธิภาพของ pulsed column เฟสทั้งสองจะไหลจากเฟสหนึ่งไปอีกเฟสหนึ่งโดยจะมีการกระจายตัว และรวมตัวกัน



รูปที่ 2.11 แสดงการไหลของของเหลวเบา และหนักในหอสกัดแบบ Pulse sieve plate column (Yadav et al., 2008)

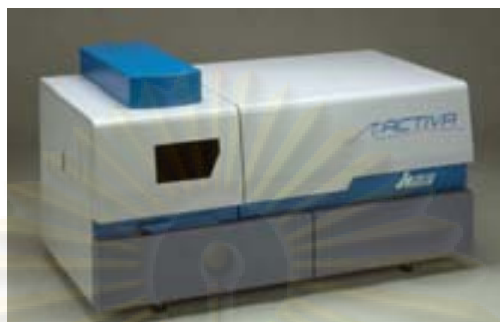
ข้อดีของ Pulse perforated plate column มีดังนี้

1. ความสูงของชั้นตอนจะต่ำกว่าแบบ Conventional packed towers เนื่องจากการกระจาย และการปั่นป่วนจะมี สูง สิ่งนี้จะทำให้เกิดประโยชน์สำหรับขบวนการที่มีกัมมันตรังสี ซึ่งทำให้เกิดการประหยัดในด้านราคาของเครื่องป้องกัน
2. การทำงานมีการยืดหยุ่นดีจะมีลักษณะของ pulse เปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ
3. ใช้กับกระบวนการที่มีความแตกต่างของความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย
4. ทำการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้อย่างง่ายดาย

ข้อเสียของ Pulse perforated plate column มีดังนี้

1. การพัลส์เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดอิมัลชัน
2. มีข้อจำกัดต่อจำนวนตามทฤษฎี ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มพลังงานในการพัลส์ เมื่อเพิ่ม pulse amplitude ทำให้เกิดการผสมย้อนกลับ และทำให้ความสูงของชั้นตอนเพิ่มขึ้นในทางตรงข้ามคือ ถ้าความสูงของของเหลวถูก pulse ที่อัตราสูงขึ้น ความดันที่หน่วยการพัลส์จะน้อยกว่าความดันไอของ process liquor ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เกิด cavitations อย่างไรก็ตามผลกระทบนี้จะไม่เกิดกับระบบ air-pulsed

2.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES) (Patthaveekongka et al., 2006)



รูปที่ 2.12 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP (Patthaveekongka et al., 2006)

เป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว ได้ค่าถูกต้องแม่นยำ นอกจากนั้นการเตรียมสารตัวอย่างยังทำได้ง่ายและรวดเร็ว ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างจะถูกสูบน้ำขึ้นเป็นฝอยในส่วนที่เป็นบิวไลเซอร์ (Nubilizer) แล้วถูกส่งต่อไปยังส่วนที่เป็นเปลวพลาสมาของอาร์กอนเรียกว่า ไอซีพีทอช (ICP-Torch) ซึ่งถูกสปาร์ค (Spark) ในสนามของคลื่นวิทยุ โดยตัวอย่างจะระเหยและกลายเป็นไอ เปลี่ยนเป็นอะตอมและไอออน ทั้งอะตอมและไอออนจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่ออะตอมคืนกลับสู่สภาวะพื้น (Ground state) ก็จะคายพลังงานออกมาในรูปของ Characteristic radiation แสดงในรูปของความยาวคลื่น โดยความเข้มของแสงจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าและผ่านเข้าเครื่องขยายสัญญาณ (PMT) แล้วจึงผ่านหน่วยประมวลผลต่อไป

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์
- 2) เตรียมสารตัวอย่าง
 - ถ้าสารตัวอย่างเป็นของเหลว สามารถนำไปวัดได้ทันที
 - ถ้าสารตัวอย่างเป็นของแข็ง ให้นำสารตัวอย่างประมาณ 0.1 กรัม ละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 2-3 มิลลิลิตร ถ้าไม่ละลายให้นำไปอุ่น แล้วทิ้งให้เย็น ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้กรดไนตริกเข้มข้น 1%
- 3) นำสารละลายมาตรฐานและสารว่างไร้สิ่งตัวอย่าง (Blank) ซึ่งเป็นกรดไนตริกเข้มข้น 1% มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP เพื่อทำเส้นโค้งเทียบมาตรฐาน (Calibration curve)
- 4) นำสารตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP ถ้าหากสารตัวอย่างมีความเข้มข้นมากให้เจือจางด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1% โดยผลที่ได้อยู่ในรูปของความเข้มข้น

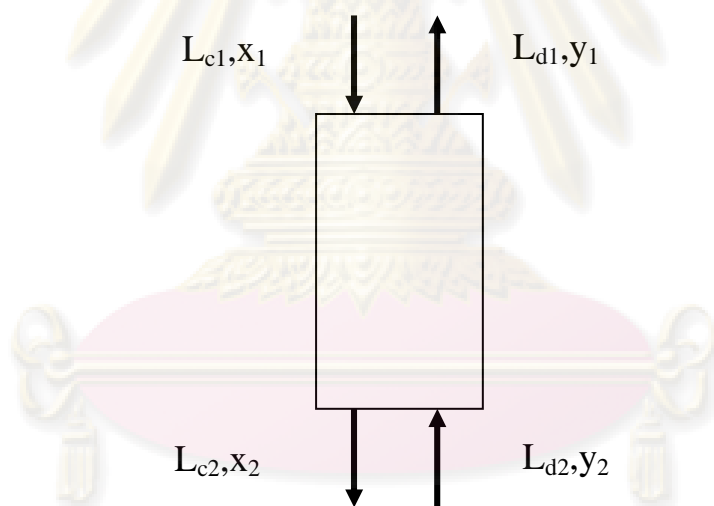
2.6 ประสิทธิภาพของการสกัด

ร้อยละของสารที่สกัดได้ (% Extractions) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{As, \text{extracted (out)}}}{C_{As, \text{feed (in)}}} \times 100 \quad (2.8)$$

2.7 สมรรถนะของการถ่ายเทมวล (Laddha et al., 1978)

หอสกัดแบบจานมีฐู และป้อนสารแบบพัลส์ได้มีการพิจารณาสมรรถนะของการถ่ายเทมวลในเทอมของ HTU_{oy} (The overall height of transfer unit) จากรูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการไหลแบบสวนทางในหอสกัดแบบจานมีฐู และป้อนสารแบบพัลส์ โดย L_c และ L_d เป็นอัตราการไหลของเฟสต่อเนื่อง และ เฟสกระจาย ส่วนตัวแปร x และ y เป็นของเฟสต่อเนื่อง และเฟสกระจายตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพการไหลแบบสวนทางของหอสกัดแบบจานมีฐู และป้อนสารแบบพัลส์ (Laddha et al., 1978)

จากรูปที่ 2.13 นำมาคำนวณค่า NTU_{oy} (The overall number of transfer units) ของเฟสกระจายดังสมการ 2.9

$$NTU_{oy} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y^* - y} = \frac{(y_1 - y_2)}{(y^* - y)_m} \quad (2.9)$$

ให้ $(y^* - y)_m$ เป็นค่าเฉลี่ยของ $(mx_1 - y_1)$ และ $(mx_2 - y_2)$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างของความเข้มข้นของหอสกัดด้านบน และด้านล่าง ดังสมการ 2.10

$$(y^* - y)_m = \frac{(mx_1 - y_1) - (mx_2 - y_2)}{\ln \left(\frac{(mx_1 - y_1)}{(mx_2 - y_2)} \right)} \quad (2.10)$$

ที่ m เป็นความชันของเส้นสมดุล (equilibrium curve)

นำ NTU_{oy} มาแทนในสมการ 2.11 โดยให้ Z แทนความสูงของคอลัมน์ จะคำนวณหาค่า HTU_{oy} ได้จากสมการ 2.11

$$HTU_{oy} = \frac{Z}{NTU_{oy}} \quad (2.11)$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดอาร์เซนิก

Takashi (1979) ได้ทำการศึกษาการแยกอาร์เซนิก (III) จากสารประกอบแอนติโมนี (III) ที่ละลายในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้เบนซีนเป็นสารสกัด และน้ำเป็นสารละลายนำกลับ จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 10-12 N จะสกัดอาร์เซนิกได้มากกว่า โดยแอนติโมนีจะไม่ถูกสกัดออกมาในเบนซีนเลยจากนั้นนำมาผ่านสารละลายนำกลับพบว่าสามารถนำกลับอาร์เซนิก (III) ได้ถึง 95%

Delaney (1988) ศึกษาการกำจัดอาร์เซนิกออกจากน้ำมันหินเชล (Shale oil) ซึ่งมีอาร์เซนิกปริมาณ 31 ppm. โดยใช้สารสกัด 2 ชนิดคือกรดไฮโดรคลอริก และฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์ ทำการรวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าฟอสฟอรัสไตรคลอไรด์สกัดอาร์เซนิกได้ 18% ส่วนกรดไฮโดรคลอริกสามารถสกัดอาร์เซนิกได้ 28.3 % เนื่องจากคลอไรด์สามารถทำลายพันธะระหว่างสารออกแกนิกกับอาร์เซนิกได้ดี และอาร์เซนิกละลายได้ดีที่สภาวะเป็นกรด pH น้อยกว่า 7

Ralf et al. (1991) ได้ทำการสกัดแยกอาร์เซนิกจากสารละลายในอุตสาหกรรมทำทองแดงให้บริสุทธิ์ซึ่งประกอบด้วยอาร์เซนิก, บิสมีท, แอนติโมนี, เหล็ก, ทองแดง และนิกเกิลในสารละลายกรดซัลฟูริกโดยใช้กรดไฮโดรซามิกเป็นสารสกัดในตัวทำละลายเคโรซีน และใช้น้ำเป็นสารละลายนำกลับโดยพบว่าเมื่อทำการปรับ pH สารนำกลับให้อยู่ในช่วง 1.9-4 พบว่าสามารถนำกลับอาร์เซนิกได้ 45% และเมื่อทำการเพิ่มจำนวนรอบขึ้นเป็น 5 รอบสามารถนำกลับอาร์เซนิกได้สูงถึง 66%

Wisniewski (1997) ศึกษาการสกัดแยกอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) จากสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 50-200 กรัมต่อลิตร ด้วยการใช้น้ำสกัด Cyanex 923 ความเข้มข้น 50 % โดยปริมาตรละลายในตัวทำละลาย Exxsol 220/230 พบว่าสารสกัด Cyanex 923 มีประสิทธิภาพในการสกัดอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) ได้ทั้งคู่ โดยการสกัดแยกอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายป้อนสูงขึ้น และน้ำสามารถใช้เป็นสารละลายนำกลับอาร์เซนิก การนำกลับอาร์เซนิกด้วยน้ำสามารถเกิดได้เร็วและเข้าสู่สมดุลใน 5 นาทีโดยนำกลับอาร์เซนิก (III) ได้ 54% และอาร์เซนิก (V) ได้ 50%

Iberhan and Wisniewski (2001) ทำการสกัดแยกอาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) จากสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นโดยศึกษาความแตกต่างๆของประสิทธิภาพของสารสกัดต่างๆชนิดกันคือสารสกัด Cyanex 925, Cyanex 301 และสารผสมระหว่างสารสกัด Cyanex 925 กับ Cyanex 301 และผลของตัวทำละลายสองชนิดคือโทลูอีน และออกเทน ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการสกัดขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก และตัวทำละลายซึ่งประสิทธิภาพของการสกัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายป้อน โดยที่ Cyanex 925 ใช้สกัดแยกอาร์เซนิก (V) ได้ดี ในขณะที่สารผสมระหว่างสารสกัด Cyanex 925 กับ Cyanex 301 ใช้สกัดแยกอาร์เซนิก (III) ได้ดี อาร์เซนิก (III) และอาร์เซนิก (V) ถูกนำกลับโดยน้ำออกจาก Cyanex 925 ใน 2-3 ขั้นตอนได้มากถึงเกือบ 70% การนำกลับอาร์เซนิก(III) และอาร์เซนิก (V) ด้วยน้ำเมื่อใช้สารสกัด Cyanex 301 และสารผสมระหว่าง Cyanex 925 และ Cyanex 301 ไม่สามารถนำกลับได้

Shuzo et al. (2002) ทำการศึกษากระบวนการล้างด้วยกรดเพื่อสกัดอาร์เซนิกจากดินคุโรโบกุซึ่งพบว่าในดินมีอาร์เซนิกอยู่ในปริมาณ 2830 mg/kg ดังนั้นจึงต้องทำการลดอันตรายของดินไม่ให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ โดยการล้างด้วยสารสกัดต่างๆชนิดกันคือกรดไฮโดรคลอริก,

กรดไนตริก, กรดซัลฟูริก, กรดอะซิติก และกรดเปอร์คลอริก ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน จากการทดลองพบว่าเมื่อนำดินมาผสมกับกรดไฮโดรคลอริกแล้วทำการเขย่าที่ความเข้มข้น 35% เป็นเวลา 6 ชั่วโมงสามารถสกัดอาร์เซนิกได้ถึง 98%

Pizarro et al. (2003) ศึกษาประสิทธิภาพการสกัดโดยใช้สารสกัดต่างชนิดกันคือน้ำ, เมทานอล และกรดฟอสฟอริก เพื่อสกัดอาร์เซนิกจากข้าว, ปลา, ไข่ และดิน จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของของผสมเมทานอลกับน้ำที่ 1:1 ให้ประสิทธิภาพในการสกัดดีที่สุดสำหรับข้าว, ไข่ และปลา โดยเมื่อทำการสกัดสามารถพบว่ามีอาร์เซนิกจากข้าวได้ 96.02 % ,ไข่ได้ 75.0 % และปลาได้ 92.0 % ส่วนดินสารสกัดที่เหมาะสมคือกรดฟอสฟอริกเข้มข้น 1M สกัดเป็นจำนวนสามารถพบสามารถสกัดอาร์เซนิกได้ 99.0 %

Yuan et al. (2005) ศึกษาการสกัดอาร์เซนิกจากฟางข้าวโดยเปรียบเทียบกับสารสกัดต่างๆ กันคือน้ำ, เมทานอล, น้ำ-เมทานอล, น้ำ-เอทานอล และ น้ำ-อะซิโตไนโตร และวิธีสกัดต่างๆ กัน คือ การเขย่า, การใช้อุลตราโซนิก, การใช้ไมโครเวฟ และชอกเก็ต จากการทดลองจะได้ว่าวิธีการสกัดโดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเป็นจำนวน 3 รอบ โดยใช้สารสกัดน้ำ-เอทานอล สามารถสกัดอาร์เซนิกจากฟางข้าวได้ดีที่สุดถึง 89.3 %

ทรรชนก ประภาสวัสด์ (2549) ศึกษาแยกไอออนอาร์เซนิก (III) และ อาร์เซนิก (V) ออกจากสารละลายกรดซัลฟูริกด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงโดยใช้ Cyanex 923 เป็นสารสกัดละลายในโทลูอีน และไซโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำเป็นสารละลายนำกลับ ในการทดลองได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายป้อน ความเข้มข้นของสารสกัด Cyanex 923 และความเข้มข้นของไซโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับ พบว่าสามารถสกัดแยกอาร์เซนิก (V) ออกจากสารละลายได้ดีกว่าอาร์เซนิก (III) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกในสารละลายป้อน เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับสูงขึ้นเช่นกันจนถึงความเข้มข้นของ Cyanex 923 เท่ากับ 30% โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Cyanex 923 สูงกว่า 30% โดยปริมาตร เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับจะลดลง เพราะเยื่อแผ่นเหลวมีความหนืดสูงเกินไป เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายนำกลับ เปอร์เซ็นต์การสกัดและนำกลับมีแนวโน้มลดลง พบว่าสารละลายนำกลับที่ดีที่สุดคือนำกลับอาร์เซนิก (III) ได้ 33%และ อาร์เซนิก (V) ได้ 36%

Mir et Al. (2007) ได้พัฒนาวิธีการสกัดอาร์เซนิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดจากพืชที่ปลูกในดินสองสถานที่ที่ปนเปื้อนอาร์เซนิกโดยใช้การสกัดสองขั้นตอนคือขั้นตอนแรกใช้สารสกัดคือ 1:1 น้ำ-เมทานอล และตามด้วยการใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.1 M ซึ่งจากการทดลองพบว่าวิธีนี้สามารถสกัดอาร์เซนิกในรูปอินทรีย์ และอนินทรีย์ได้ โดยพืชใน เยลโลว์ไนฟ์ (Yellowknife) ถูกสกัดอาร์เซนิกเฉลี่ย 46 % ส่วนดีโลโร (Deloro) ถูกสกัดอาร์เซนิกเฉลี่ย 70 %

2.8.2 งานวิจัยเกี่ยวกับหอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์

Khaled et al. (2000) ทำการวิจัยการสกัดยูเรเนียมที่มีความเข้มข้น 71 ppm จากกระบวนการทำสารละลายกรดฟอสฟอริกให้บริสุทธิ์แบบเปียกด้วยหอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์ โดยใช้การสกัดแบบควบคู่ของสารผสมระหว่าง DEPA และ TOPO ในตัวทำละลายเคโรซีน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารสกัดผสมที่เหมาะสมในการสกัดคือ DEPA 0.5 M และ TOPO 0.125 M ให้ผลการสกัดดีที่สุดจากนั้นทำการศึกษาผลของการพัลส์ที่มีผลต่อการสกัดพบว่าเมื่อเพิ่มการพัลส์ขึ้นจะให้ค่าการสกัดเพิ่มขึ้นโดยค่าการพัลส์ที่เหมาะสมคือ 34 mm/s ให้ค่าการสกัด 93.9%

Gottlieb et al. (2000) ทำการศึกษาการใช้หอสกัดแบบจานมีรุ และป้อนสารแบบพัลส์ในการนำกลับกรดซัลฟูริกจากสารละลายทองแดงในอุตสาหกรรม โดยใช้สารสกัด TEHA (Tris(2-ethylhexyl)amine ในตัวทำละลาย Shellsol 2046 และเติม ไอโซไตรตีคานอลเป็นโมดิฟายเออร์ พบว่าการถ่ายเทมวลเพิ่มตามการเพิ่มความรุนแรงการพัลส์ และการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดลดลง

สุภัทร สัมมาภัสร์ (2549) ศึกษาการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ด้วยเครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบจานมีรุยึดติดกับที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ (pulse sieve plate column) โดยใช้สารสกัดคือไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) ที่ความเข้มข้น 5-20% ในตัวทำละลายเคโรซีน ให้ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเข้าคงที่เท่ากับ 3 โมลต่อลิตร และอัตราการป้อนสารป้อนตั้งต้น และสารสกัดเป็น 1:1 จากผลการทดลองความเข้มข้นของไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดที่เหมาะสมในการสกัดยูเรเนียมคือ 10% โดยปริมาตร, สกัดทอเรียมเท่ากับ 20% โดยปริมาตร จากนั้นและศึกษาผลของการสกัดโดยปรับเปลี่ยนค่าจังหวะการเขย่า (pulse setting number) พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ 7 สามารถสกัดยูเรเนียมและ

ทอเรียบม เท่ากับร้อยละ 89.46 และร้อยละ 76.08 ตามลำดับ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัด เท่ากับ 40 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงสารเคมีและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองรวมทั้งขั้นตอนและวิธีการทดลองในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษามีอิทธิพลต่อการกำจัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้จะใช้สารป้อนเป็นคอนเดนเสทจากหลุมก๊าซธรรมชาติซึ่งได้รับอนุเคราะห์มาจากบริษัทปิระสุวรณ์ จำกัดโดยสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองศึกษาสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชนิด	ชื่อสาร	สูตรโมเลกุล	ระดับคุณภาพ	บริษัท
สารละลายป้อน	คอนเดนเสทที่ได้จากหลุมขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ	-	-	บริษัทปิระสุวรณ์ จำกัด
สารสกัด	Hydrochloric acid	HCl	Analytical	Merck
	Methanol	CH ₃ OH	Analytical	Merck
	Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	Analytical	Merck
	Ammonium Sulfate	(NH ₄) ₂ SO ₄	Analytical	Merck
	Nitric acid	HNO ₃	Analytical	Merck
	Sulfuric acid	H ₂ SO ₄	Analytical	Merck
	Sodium Hydroxide	NaOH	Analytical	Merck
	Sodium chloride	NaCl	Analytical	Merck

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1) หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ (Pulse sieve plate column) ซึ่งเป็นเครื่องมือของภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column



รูปที่ 3.2 หอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column

1) รายละเอียดทางเทคนิคเครื่องสกัด Liquid-Liquid Extraction Pulse Sieve Plate Column

ลักษณะเฉพาะของคอลัมน์		
เส้นผ่านศูนย์กลาง	50	มม.
ความสูงของแต่ละคอลัมน์	1000	มม.
จำนวนคอลัมน์	2	คอลัมน์
จำนวนแผ่นมีรู(plate)	19	ชั้นต่อคอลัมน์
ระยะห่างของแผ่น	50	มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นมีรู	50	มม.
ขนาดของรูบนแผ่น	2	มม.
จำนวนรูโดยเฉลี่ย	140	รูต่อเพต
พื้นที่ว่างเปล่าเฉลี่ย	25%	

2) ส่วนทำการแยก (Separating chambers)

chamber diameter	100	มม.
chamber height	695	มม.
ปริมาตรโดยประมาณ	5.5	ลิตร

3) ปัมของไหล (Twin Head Metering Pump)

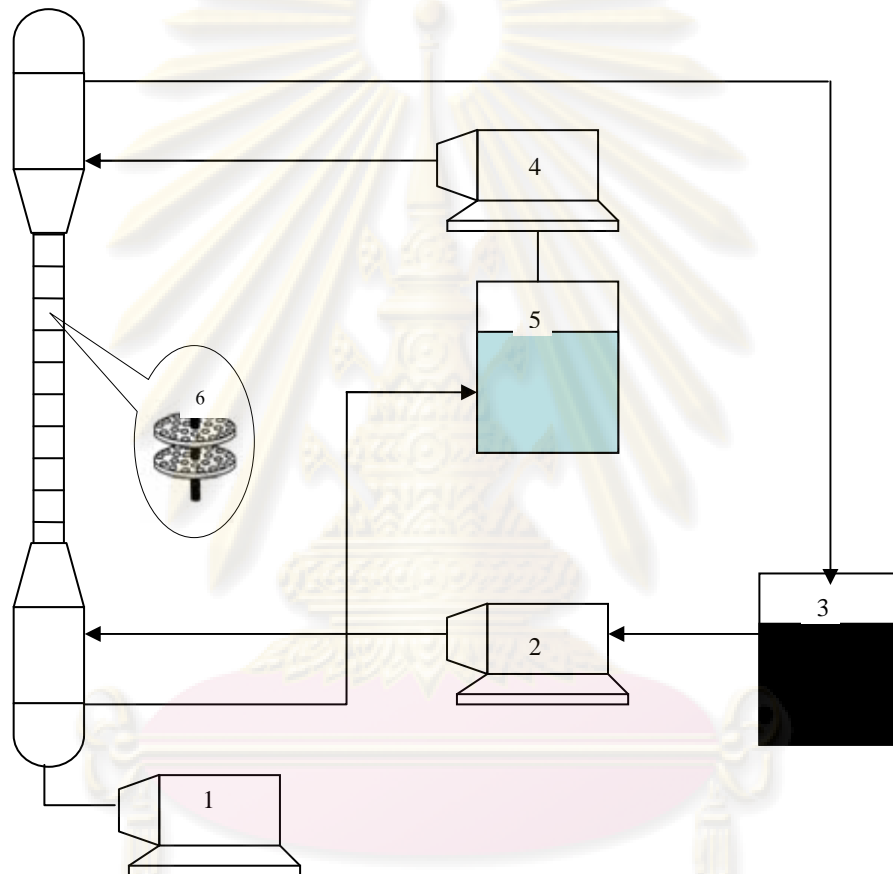
ชนิดของปั๊ม	QVF DN300
Stroke	แบบต่อเนื่อง ปรับค่าได้ 0-20 mm.
ความเร็ว	คงที่ 100 stroke per minute
อัตราการไหล	สูงสุดที่ 44 ลิตรต่อชั่วโมง

4) ส่วนของการเขย่า (Pulse unit)

Stokes	แบบต่อเนื่อง ปรับค่าได้ 0-20 mm.
Speed	แบบต่อเนื่อง ปรับค่าได้ 17-150 mm. stoke per minute
อัตราการไหล	มากที่สุดถึง 300 liters per hour

หมายเหตุ: ส่วนของการเขย่าเป็นการปรับค่าแอมพลิจูดโดยให้ค่าความถี่ที่ซึ่งงานวิจัยจะใช้เป็นค่า Pulse velocity

3.2.2) เครื่องมือ Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES) Perkin Elmer model PLASMA-1000 เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก



รูปที่ 3.3 แสดงการทำงานของหอสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column ซึ่งของไหลจะไหลสวนทางกัน

1. Pulse unit

2. ปุ่มสารละลายป้อน

3. ถังของสารละลายป้อน

4. ปุ่มสารสกัด

5. ถังสารสกัด

6. จานมีรู

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาผลของชนิดสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยตั้งค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

- 1) เตรียมสารสกัดคือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกันเมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดที่ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนสารสกัดเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต, กรดไนตริก, กรดซัลฟูริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยตั้งค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

- 1) เตรียมสารสกัดคือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที

- 4) เริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกันเมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดที่ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของเมทานอล และเอทานอลที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยหอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยตั้งค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

- 1) เตรียมสารสกัดคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 10% โดยปริมาตร ปริมาตร 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกัน เมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดที่ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลเป็น 5%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35% โดยปริมาตร ตามลำดับ
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลเป็น 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% และ 35% โดยปริมาตร ตามลำดับ

- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.4 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมของเมทานอล และกรดไฮโดรคลอริกโดยให้ความเข้มข้นของเมทานอลคงที่ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทหอสกัดแบบจวนมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยตั้งค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาณ 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกันเมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดที่ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.2 โมลต่อลิตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.5 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมของเมทานอล และกรดไฮโดรคลอริกโดยให้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกคงที่ ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทหอสกัดแบบจวนมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ โดยตั้งค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร

- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) เริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกันเมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดที่ 60 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทานอลเป็น 2.5%, 5%, 10%, 15%, 25% และ 30% โดยปริมาตร ตามลำดับ
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.6 ศึกษาข้อมูลสมมูลของระบบ

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 50 มิลลิลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 3) เติลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) จากนั้นนำไปกวนที่เครื่อง Stirrer เป็นเวลา 60 นาที
- 5) รวบรวมแยกชั้น
- 6) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.7 ศึกษาผลของค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด (Pulse velocity) โดยให้ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของเมทานอลเป็น 20% โดยปริมาตร ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) ทำการปรับค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเป็น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นเริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกัน เมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดทุก 30 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) การสกัดจะดำเนินไปประมาณ 300 นาที หรือจนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล จึงหยุดการสกัดลง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนปรับเปลี่ยนค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเป็น 8, 12, 16 และ 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีตามลำดับ
- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.8 ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่ ให้ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของเมทานอลเป็น 20%โดยปริมาตร ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) ทำการปรับค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีจากนั้นเริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกันเมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดทุก 30 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) การสกัดจะดำเนินไปประมาณ 300 นาที หรือจนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล จึงหยุดการสกัดลง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารป้อนเป็น 110, 165, 220 และ 275 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.9 ศึกษาผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ ให้ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของเมทานอลเป็น 20%โดยปริมาตร ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร
- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 4) ทำการปรับค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีจากนั้นเริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกัน เมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดทุก 30 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) การสกัดจะดำเนินไปประมาณ 300 นาที หรือจนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล จึงหยุดการสกัดลง
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 110, 165, 220 และ 275 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ
- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

3.3.10 ศึกษาผลของจำนวนรอบในการสกัด ให้ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของเมทานอลเป็น 20%โดยปริมาตร ที่มีผลต่อการสกัดไอออนอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทโดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์

- 1) เตรียมสารสกัดผสมคือสารละลายเมทานอลความเข้มข้น 20%โดยปริมาตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตรรวม 10 ลิตร

- 2) เตรียมสารป้อนคือคอนเดนเสทปริมาตร 10 ลิตร
- 3) ป้อนคอนเดนเสท (feed) เข้าทางด้านล่างของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 220 มิลลิลิตรต่อนาที
- 4) ทำการปรับค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีจากนั้นเริ่มป้อนสารสกัดเข้าสู่หอสกัดทางด้านบนของหอสกัด อัตราการไหลเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที โดยการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง และไหลสวนทางกัน เมื่อสารเกิดการผสมกันภายในหอสกัดจะเกิดการแยกชั้นกันบริเวณด้านบนของหอสกัด สารสกัดที่ผ่านการสกัดแล้วไหลออกทางด้านล่างของหอสกัด เก็บตัวอย่างสารสกัดที่ผ่านการสกัดทุก 30 นาที เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิก
- 5) การสกัดจะดำเนินไปประมาณ 300 นาที หรือจนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล จึงหยุดการสกัดลงต่อรอบ
- 6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1 ถึง 5 โดยเปลี่ยนสารป้อนใหม่ทุกรอบ และใช้สารสกัดซ้ำเป็นจำนวน 6 รอบ
- 7) นำตัวอย่างที่เก็บได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของไอออนอาร์เซนิกด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

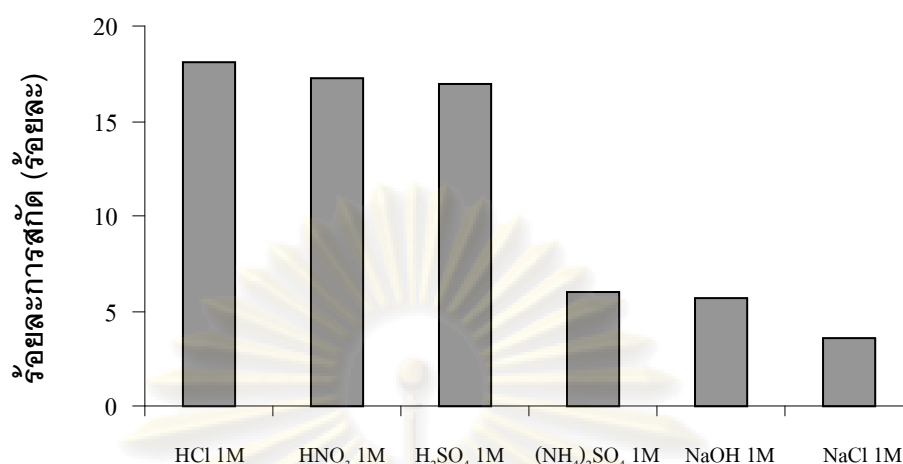
ผลการทดลองและวิจารณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ (Pulse sieve plate column) โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว สัดส่วนของสารสกัดผสม ความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด (Pulse velocity) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัด และจำนวนรอบในการสกัดนอกจากนั้นยังนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองการถ่ายโอนมวล

4.1 ผลของชนิดของสารสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

การทดลองนี้ศึกษาชนิดของสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้สารสกัดคือสารละลายกรดไฮโดรคลอริก, แอมโมเนียมซัลเฟต, กรดไนตริก, กรดซัลฟูริก, โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมล/ลิตร และปัจจัยอื่น ๆ คงที่คือ สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ชนิดของสารสกัด

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก: ค่าความเร็วของการพัลส์ของหลอดสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 เวลา 60 นาที

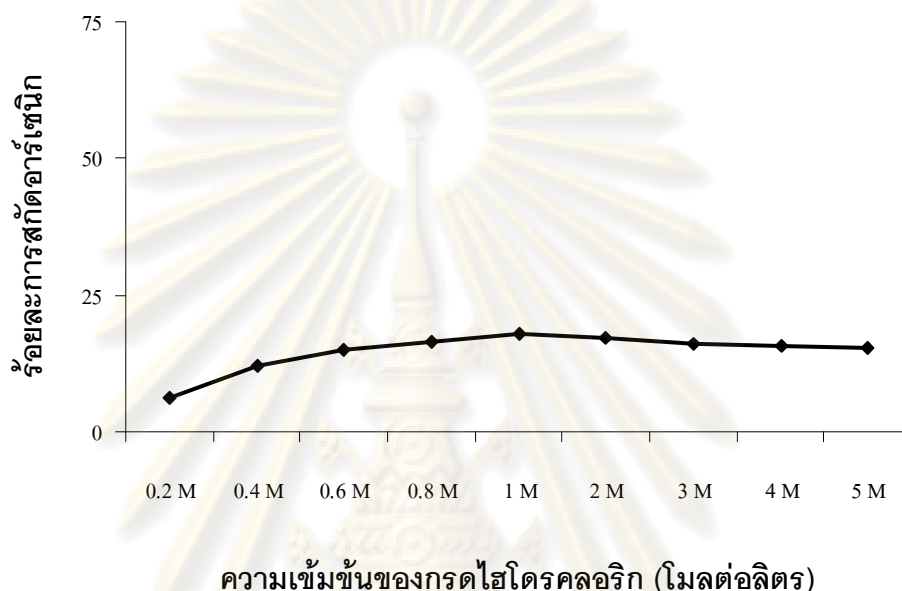
จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก พบว่าสารสกัดที่เป็นกรดจะสามารถสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทได้สูงกว่าสารสกัดที่มีฤทธิ์เบส และกลาง เนื่องจากสารสกัดที่เป็นกรดนั้นสามารถละลายอาร์เซนิกออกมาได้ดีโดยกรดจะไปทำลายพันธะระหว่างสารประกอบออการ์โนเมทัลลิก (Organo metallic compound) ของอาร์เซนิกในคอนเดนเสทโดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ให้ร้อยละการสกัดมากที่สุด เพราะหมู่ฮาไลด์ไอออนคือคลอไรด์ไอออนมีผลต่อการสกัดมากที่สุด (Dennis, 1988) ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (4.1)



4.2 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

การทดลองนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกต่อการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทที่ค่าความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4

และ 5 มิลลิลิตร และกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ คือสารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2

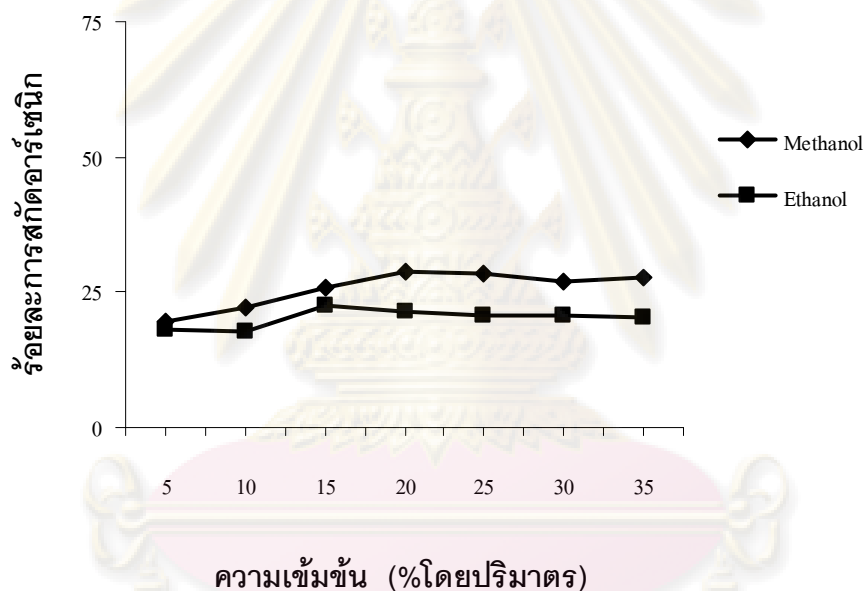


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก: ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าร้อยละการสกัดสูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริกมากกว่า 1 M จะเห็นว่าค่าร้อยละการสกัดมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสกัดมากที่สุดคือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 M ให้ร้อยละการสกัด 18.1% โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่านี้การสกัดก็ไม่เพิ่มขึ้นทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี

4.3 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอลต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

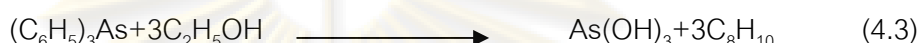
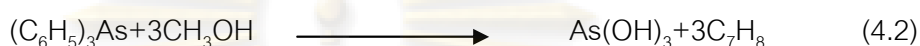
การทดลองนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล ต่อการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทที่ค่าความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล และเอทานอล 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 % โดยปริมาตร และกำหนดให้ปัจจัยอื่น ๆ คงที่ คือ สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล และเอทานอลกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก: ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 เวลา 60 นาที

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล และเอทานอลกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเมทานอล และเอทานอลเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าร้อยละการสกัดสูงขึ้น เพราะทั้งเมทานอล และเอทานอลเป็นสารอินทรีย์จึงสามารถสกัดสกัดอาร์เซนิกในรูปอินทรีย์ได้ดี (Mir et al., 2007) ซึ่งที่ทุกความเข้มข้นของเมทานอลจะให้ค่าร้อยละ

การสกัดอาร์เซนิกสูงกว่าเอทานอล เนื่องจากขนาดโมเลกุลของเมทานอลเล็กกว่าเอทานอลจึงทำให้เมทานอลเข้าทำปฏิกิริยาได้มากกว่าเอทานอล โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทานอลมากกว่า 20% โดยปริมาตร จะเห็นว่าค่าร้อยละการสกัดมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสกัดมากที่สุดคือเมทานอลที่ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตรให้ร้อยละการสกัด 28.8% โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่านี้การสกัดก็ไม่เพิ่มขึ้นทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (4.2) และ(4.3)

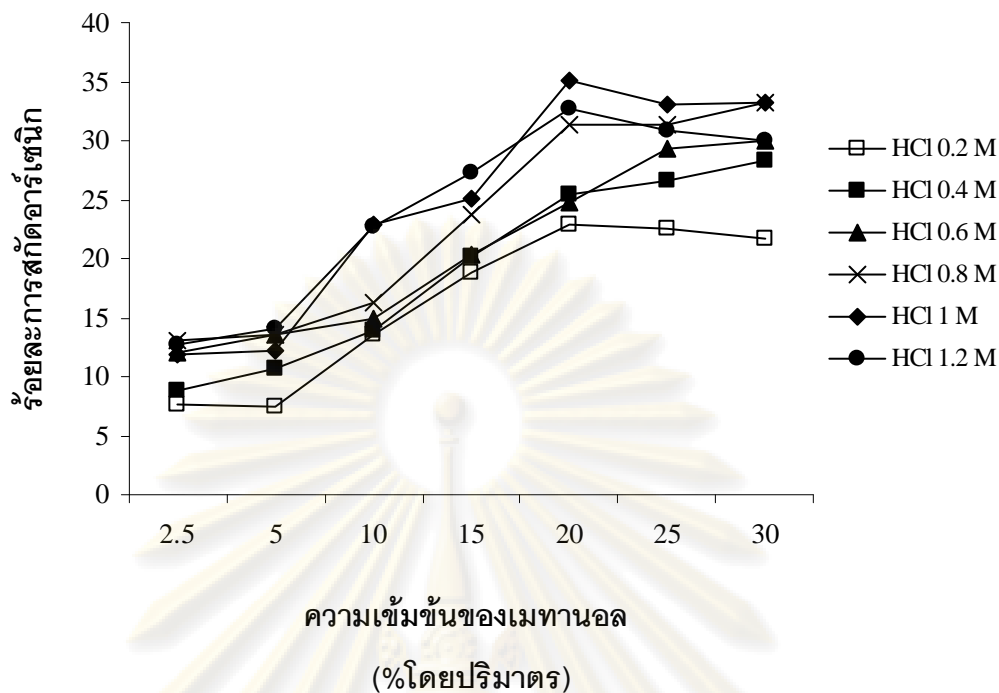


4.4 ผลของความเข้มข้นของสารสกัดผสมต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิก

จากคอนเดนเสท

การทดลองนี้ทำการศึกษาว่าอัตราส่วนระหว่างสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอลที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4 และ 5 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 2.5, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 % โดยปริมาตร และกำหนดปัจจัยอื่นคงที่คือสารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการฟลัดของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4

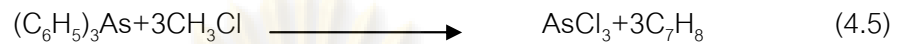
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดผสมของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอลกับร้อยละการสัต์ดาร์เซนิค: ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสัต์ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสัต์มีค่าเท่ากับ 1:1 เวลา 60 นาที

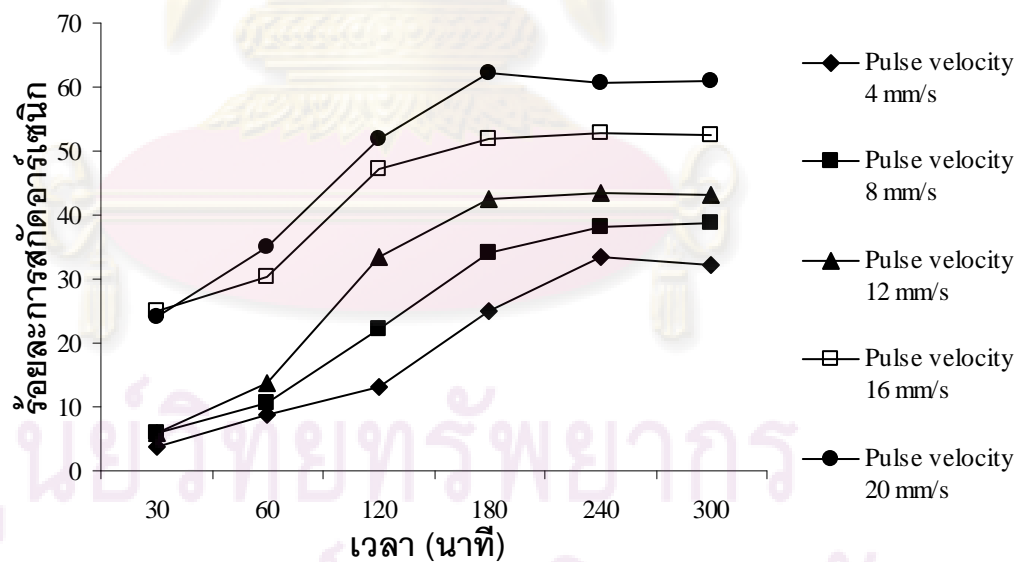
จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสกัดผสมของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอลกับร้อยละการสัต์ดาร์เซนิค พบว่าเมื่อความเข้มข้นของเมทานอลเพิ่มขึ้นที่ทุกความเข้มข้นของสารสกัดกรดไฮโดรคลอริก จะทำให้ค่าร้อยละการสัต์สูงขึ้น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทานอลมากกว่า 20%โดยปริมาตร จะเห็นว่าค่าร้อยละการสัต์จะลดลง และมีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสัต์มากที่สุดคือเมทานอลที่ความเข้มข้น 20% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 1 M ให้ร้อยละการสัต์ 35.06% โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่านี้การสัต์ก็ไม่เพิ่มขึ้นทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละการสัต์ของกรดไฮโดรคลอริก หรือ เมทานอลเพียงอย่างเดียวพบว่ร้อยละการสัต์ที่ได้จากการผสมกันระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และ เมทานอลจะเพิ่มมากกว่าเนื่องจากเมทานอลเป็นสารที่ประกอบด้วยหมู่อัลคิล (CH_3^-) และไฮดรอกไซด์อะตอม ($-\text{OH}$) เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรคลอริกจะเกิดสารสกัดผสมคลอโรมีเทนขึ้นดังสมการที่ (4.4) จากนั้นนำสารสกัดผสมคลอโรมีเทนทำปฏิกิริยาการสัต์กับคอนเดนเสท ซึ่งปฏิกิริยาเป็นดังสมการที่ (4.5) โดยหมู่อัลคิลจะละลายในคอนเดนเสทซึ่งเป็นสารอินทรีย์เหมือนกันจากนั้นอาร์เซนิคจึงถูกสัต์ โดย

อาร์เซนิกจะเกิดพันธะกับคลอไรด์ไอออนผ่านเข้ามาในเฟสของสารสกัด โดยสารสกัดผสมนี้จะรวมข้อดีของสารสกัดทั้งสองอย่างคือเมทานอลจะมีหมู่อัลคิล และกรดไฮโดรคลอริกจะมีคลอไรด์ไอออนซึ่งช่วยทำให้ร้อยละการสกัดสูงกว่าการสกัดด้วยสารสกัดเดียว



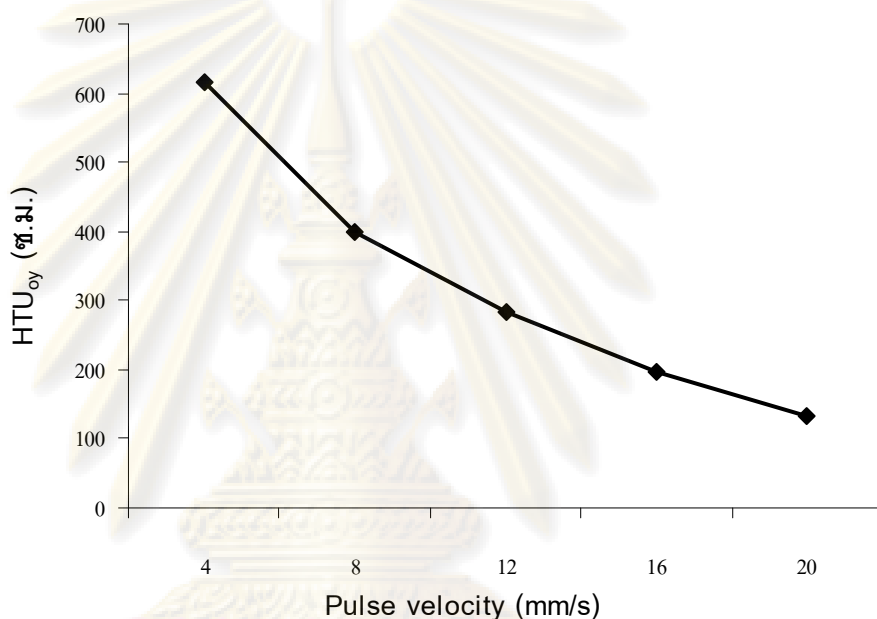
4.5 ผลของค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด (Pulse velocity) ต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

การทดลองนี้ทำการศึกษาค่าความเร็วของการพัลส์ (Pulse velocity) ของหอสกัดแบบจานมีรู และบ่อนสารแบบพัลส์ ที่มีผลต่อการสกัดอาร์เซนิก ที่ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 4, 8, 12, 16 และ 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีและกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ คือสารละลายบ่อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายบ่อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่ pulse velocity ต่างๆ: ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายบ่อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pulse velocity กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก พบว่าเมื่อเพิ่มค่า pulse velocity และเวลาในการสกัดขึ้นค่าร้อยละการสกัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มค่า pulse velocity จะเป็นการเพิ่มแอมพลิจูด โดยใช้พลังงานจากภายนอกเป็นการขับเคลื่อนของเหลวผ่านรูพรุน เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดมากขึ้นทำให้ของเหลวกลายเป็นเม็ดขนาดเล็กมากขึ้น (Yadav et al., 2008) สารสกัดกับสารบ่อนจึงสัมผัสมากขึ้น ดังนั้นพื้นที่ถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละการสกัดสูงขึ้น ดังนั้นค่าที่เหมาะสมคือ ค่า pulse velocity เท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

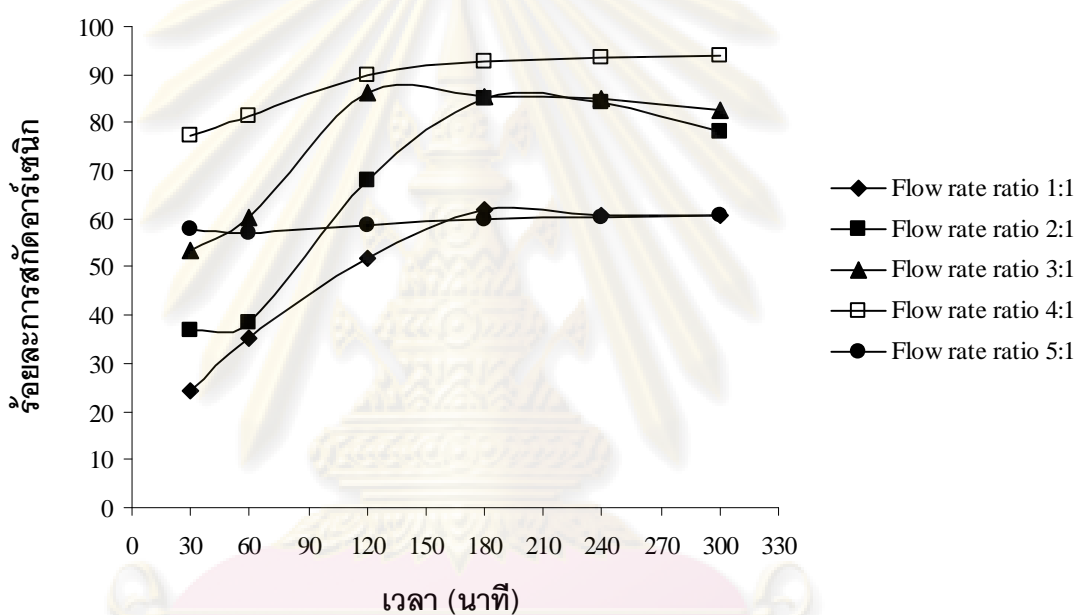


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง pulse velocity กับค่า HTU_{oy} : ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายบ่อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 ที่เวลา 180 นาที

จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำปริมาณการสกัดอาร์เซนิกที่ได้มาทำการคำนวณประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลโดยแสดงเป็นค่า HTU_{oy} ในสมการที่ (2.11) จะเห็นว่าค่า HTU_{oy} จะขึ้นกับค่า pulse velocity โดยเมื่อทำการเพิ่มค่า pulse velocity จะทำให้ค่า HTU_{oy} มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.6 และลดต่ำสุดที่ค่า pulse velocity เป็น 20 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากการเพิ่มค่า pulse velocity เป็นการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทมวลให้สูงขึ้นดังที่กล่าวในรูป 4.5 ดังนั้นค่า HTU_{oy} ซึ่งแปรผกผันกับการถ่ายเทมวลจึงลดลง ค่า HTU_{oy} ที่ pulse velocity เท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาทีคำนวณได้เท่ากับ 134 ซ.ม. ดังนั้นค่า pulse velocity นี้ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากรูปที่ 4.5

4.6 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่ต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

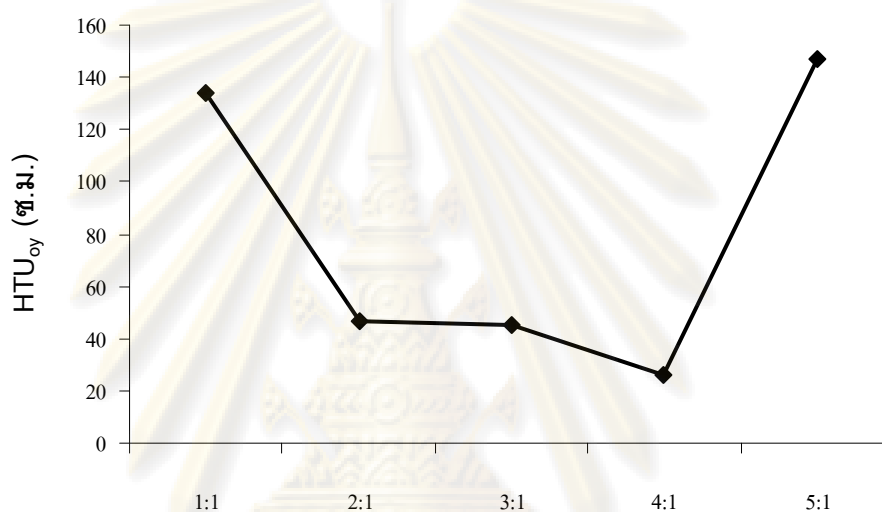
การทดลองนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารสกัดที่ 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 และกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ คือ คือสารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดต่างๆ โดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่: ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก เมื่อให้อัตราการไหลของสารสกัดคงที่ และเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทเป็นอัตราส่วน 1:1, 2:1, 3:1, และ 4:1 ตามลำดับ พบว่าร้อยละการสกัดมากขึ้นตามอัตราการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทเป็นการเพิ่มปริมาณของสารป้อนคอนเดนเสทในหอสกัดมากขึ้นทำให้สารสกัดที่ไหลเข้ามาแบบสวนทางสัมผัสกับสารป้อนคอนเดนเสท

มากขึ้นทำให้การสกัดสูงขึ้นตามปริมาณสารป้อนคอนเดนเสทที่มากขึ้นดังนั้นก็ร้อยละการสกัดจึงเพิ่มมากขึ้น ยกเว้นที่อัตราส่วนการไหลของสารสกัดต่ออัตราการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทเป็น 5:1 ที่มีร้อยละการสกัดคงที่ เพราะว่าปริมาณสารป้อนคอนเดนเสทที่มากเกินไปทำให้เมื่อเวลาสารป้อนผ่านรูพรุนแล้วแตกเป็นหยดเกิดการรวมตัวกันของหยดขึ้นทำให้ขนาดของหยดใหญ่ขึ้นพื้นที่ในการถ่ายเทมวลจึงลดลง(Yadav et al., 2008) ดังนั้นร้อยละการสกัดจึงเพิ่มเล็กน้อยจนถึงคงที่ ดังนั้นอัตราส่วนการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทต่ออัตราการไหลของสารสกัดที่เหมาะสมคือ 4:1 ให้ร้อยละการสกัด 92.88% และเวลาที่เหมาะสมคือ 180 นาที



อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัด

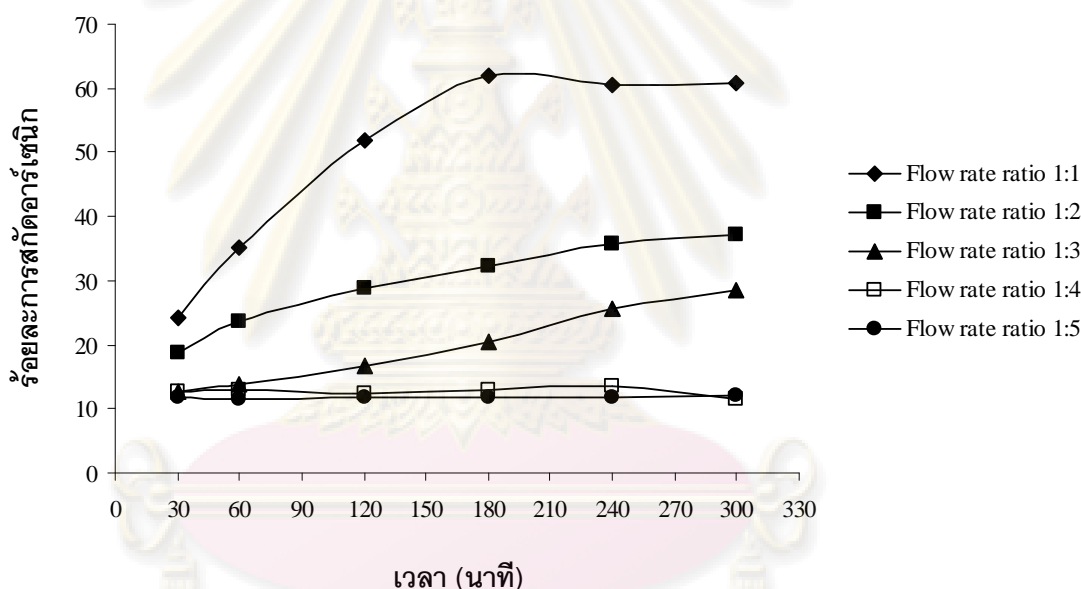
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่กับค่า HTU_{oy} : ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 180 นาที

จากรูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่กับค่า HTU_{oy} จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนเพิ่มขึ้นจาก 1:1 ถึง 4:1 ค่า HTU_{oy} ลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารป้อนมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสระหว่างสารป้อนและสารสกัดมากขึ้นทำให้การถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นยกเว้นที่อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 5:1 ดังเหตุผลที่กล่าวในรูปที่ 4.7 เมื่อนำปริมาณอาร์เซนิกที่สกัดได้จากรูปที่ 4.7 มาคำนวณค่า HTU_{oy} จะได้

ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือที่ อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัด 4:1 จะให้ค่า HTU_{oy} เป็น 26 ซ. ม. ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับรูปที่ 4.7

4.7 ผลของอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

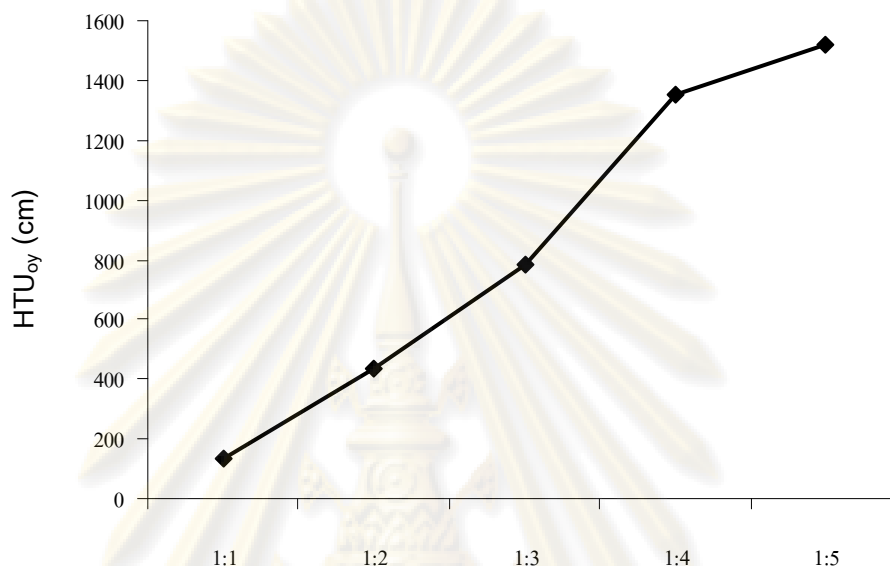
การทดลองนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และสารสกัดที่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 และกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ คือ คือสารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 %โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกที่อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดต่างๆ โดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่: ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 %โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่กับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก เมื่อให้อัตราการไหลของสารสกัดเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลของสารป้อนคอนเดนเสทคงที่เป็นอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารสกัดขึ้นร้อยละการสกัดมีแนวโน้มลดลงทั้งหมด

เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของสารสกัดเป็นการเพิ่มปริมาณสารสกัดในหอสกัดมากขึ้น และทำให้ปริมาณของสารป้อนในคอลัมน์น้อยกว่าสารสกัด ดังนั้นสารสกัดไหลออกจากหอสกัดเร็วขึ้น ทำให้เวลาในการสัมผัสกับสารป้อนคอนเดนเสทน้อยลงร้อยละการสกัดอาร์เซนิกจึงลดลง



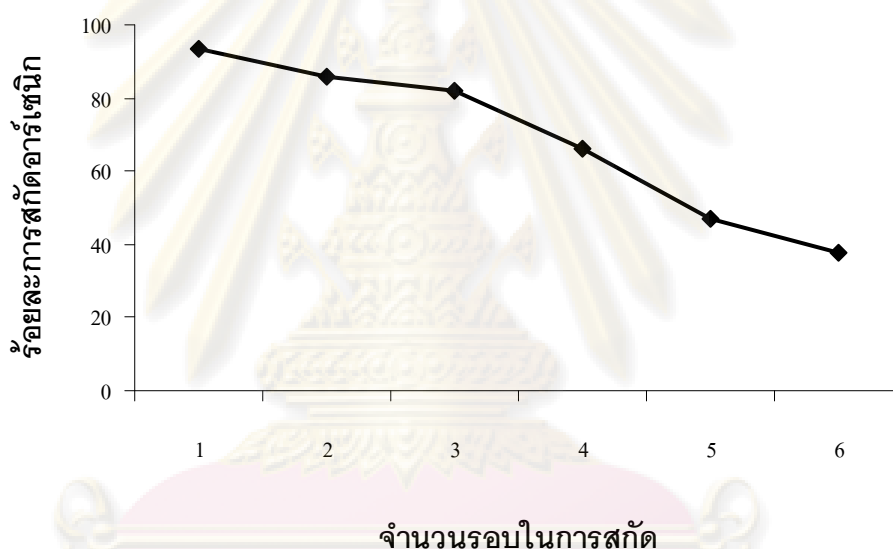
อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัด

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่กับค่า HTU_{oy} : ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ 180 นาที

จากรูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารป้อนคงที่กับค่า HTU_{oy} เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของสารสกัดเพิ่มขึ้นจาก 1:1 ถึง 1:5 ค่า HTU_{oy} เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารสกัดในหอสกัดมากขึ้นทำให้ปริมาณสารป้อนในหอสกัดน้อยลง และสารสกัดสัมผัสสารป้อนน้อยลงดังนั้นการถ่ายเทมวลลดลงจึงทำให้ค่า HTU_{oy} มีค่าเพิ่มขึ้นโดยที่อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดเป็น 1:5 ค่า HTU_{oy} เพิ่มสูงถึง 1522 ซม.

4.8 ผลของจำนวนรอบในการสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

การทดลองนี้ทำการศึกษาผลของจำนวนรอบในการสกัด และกำหนดปัจจัยอื่นคงที่ คือ สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 4:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกันผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิก: ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตร ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 4:1 ที่เวลา 180 นาทีต่อรอบ

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบในการสกัดกับร้อยละการสกัดอาร์เซนิกโดยใช้คอนเดนเสทใหม่ทุกรอบ และสารสกัดนำมาใช้ซ้ำ พบว่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกในคอนเดนเสทจะลดลงตามจำนวนรอบในการสกัด โดยในจำนวนรอบที่ 1-4 ปริมาณอาร์เซนิกในคอนเดนเสทหลังสกัดได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม

กำหนดให้มีปริมาณสารหนูในน้ำทิ้งไม่เกิน 0.100 ppm และจำนวนรอบที่ 5-6 มีค่าปริมาณอาร์เซนิกเหลืออยู่หลังสกัดมากกว่าค่ามาตรฐานเนื่องจากการใช้สารสกัดซ้ำทำให้ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัดมีการสะสมอาร์เซนิกมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดของสารสกัดลดลง ดังนั้นจำนวนรอบที่เหมาะสมในการใช้สารสกัดซ้ำคือ 4 รอบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดแยกอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรู และป้อนสารแบบพัลส์ (Pulse sieve plate column) และผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการสกัดได้แก่ ชนิดของสารสกัด ความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว สัดส่วนของสารสกัดผสม ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอ (Pulse velocity) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัด และจำนวนรอบในการสกัดซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- 1) ชนิดสารสกัดที่มีผลต่อการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทมากที่สุดคือสารสกัดชนิดที่เป็นกรด
- 2) ความเข้มข้นของสารสกัดจะมีความเหมาะสมในช่วงความเข้มข้นหนึ่งเท่านั้น ถ้ามากกว่า หรือน้อยกว่าช่วงดังกล่าว เปอร์เซ็นต์การสกัดจะลดลง สารสกัดเดี่ยวที่เหมาะสมในการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสทคือ กรดไฮโดรคลอริก และเมทานอล ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมคือกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร และเมทานอล 20% โดยปริมาตรให้ค่าร้อยละการสกัดสูงสุด
- 3) การผสมสารสกัดระหว่างกรดไฮโดรคลอริก และเมทานอลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดมากกว่าการใช้สารสกัดเดี่ยวโดยสัดส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมคือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร ความเข้มข้นของสารสกัดเมทานอล 20 % โดยปริมาตรจะให้ค่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกมากกว่าใช้สารสกัดเดี่ยว
- 4) เมื่อเพิ่มค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด (Pulse velocity) มากขึ้นค่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกเพิ่มขึ้น โดยค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดที่เหมาะสมคือ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที เพราะทำให้สารที่ป้อนเข้าไปในหอสกัดมีการผสมกันด้วยอัตราที่เหมาะสม เกิดการถ่ายเทมวลอย่างสมบูรณ์
- 5) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการไหลของสารสกัดคงที่ ค่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกเพิ่มขึ้น อัตราส่วนอัตราการไหลของสารป้อนต่อสารสกัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 4:1 ให้ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก 92.88 ที่เวลา 180 นาที

6) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนอัตราการใช้ของสารป้อนต่อสารสกัดโดยอัตราการใช้ของสารป้อนคงที่ ค่าร้อยละการสกัดอาร์เซนิกลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการใช้ของสารสกัดทำให้สารสกัดไหลออกจากหลอดสกัดได้เร็วทำให้การสัมผัสกับสารป้อนน้อย

7) เมื่อทำการนำสารสกัดกลับมาใช้ซ้ำ และเปลี่ยนสารป้อนใหม่ทุกครั้งพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการสกัด ร้อยละในการสกัดอาร์เซนิกลดลง โดยเมื่อทำการสกัดมากกว่า 4 รอบพบว่าปริมาณอาร์เซนิกที่เหลือในสารป้อนหลังสกัดมีค่า 0.109 ppm สูงกว่าค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม (0.100 ppm) ดังนั้นสารสกัดในการทดลองนี้สามารถนำมาใช้สกัดซ้ำได้ 4 รอบ โดยเหลือปริมาณอาร์เซนิก 0.07 ppm

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองนี้สารตั้งต้นคอนเดนเสทอาจมีปริมาณอาร์เซนิกต่ำ จึงควรมีการทดลองกับคอนเดนเสทที่มีปริมาณอาร์เซนิกสูงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

2) ในการวิเคราะห์นั้นเนื่องจากสารละลายมีปริมาณเมทานอล หรือเอทานอลปนในสารสกัดจึงต้องมีการเจือจางก่อนนำเข้าเครื่อง ICP เพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อเครื่องวิเคราะห์ แต่ก็ไม่สามารถเจือจางได้มากนักเพราะสารละลายมีปริมาณของอาร์เซนิกต่ำ ถ้ายิ่งเจือจางมากจะทำให้ผลวิเคราะห์ที่ได้นั้นคลาดเคลื่อน

3) ควรจะศึกษาชนิดสารสกัดแบบอื่นๆ ซึ่งอาจจะทำให้สามารถสกัดอาร์เซนิกสูงมากขึ้นได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ควบคุมมลพิษ, กรม. (ก). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อทำแผนปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช. เล่มที่ 1/2. กรุงเทพมหานคร: กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (อัดสำเนา), 2541.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. (ข). เอกสารชุดสารเคมีเฉพาะเรื่อง (Monograph), สารหนู (Arsenic). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: ฝ่ายศูนย์ข้อมูลสารอันตรายและอนุสัญญา กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ. (อัดสำเนา), 2541.
- จิรวัจน์ อีซอ. ผลของการปนเปื้อนสารเวียนรอบต่อการสกัดแยกธาตุกลุ่มแอมโมเนียมโดยอุปกรณ์พัลส์คอลัมน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- ชาญวิทย์ สุภรานนท์รัตน์ และ พิเชฐ อินทร์เอื้อ. การใช้ประโยชน์ของคอนเดนเสทจากก๊าซธรรมชาติ. รายงานโครงการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
- ทรรชนก ประภาสวัสดี. การแยกไอออนอาร์ซีนิกโดยการใช้เยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- พิชานู ดันดิชัยปกรณ์. การกำจัดสารประกอบปรอท และอาร์ซีนิกออกจากไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้การดูดซับบนตัวดูดซับนิเกิลคอปเปอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- วรพัฒน์ อรรถยุติ. การศึกษากระบวนการสกัดของเหลวที่จะเป็นประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมในประเทศไทย. โครงการวิจัยเลขที่ 25-IE-2521. ทูลเสริมการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526.
- สุภัทร สัมมาภัสร์. การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์ โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรูยึดติดกับที่และปนเปื้อนเป็นช่วงๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ภาษาอังกฤษ

- Alegret, S. Developments in solvent extraction. (n.p.): Ellis Horwood, 1988.
- Bal K. Puri and Kurt J. Irgolic. Determination of arsenic in crude petroleum and liquid hydrocarbons. (1989): 95-99.
- Cusack, R.W., Fremeaux, P., and Glatz, A.D. Fresh look at liquid-liquid extraction. Chemical Engineering (1991): 67-76.
- Dennis D. Arsenic removal from shale oil by chloride addition. United States Patent 4752380: 1988.
- Frankiewicz, Theodore C. and Gerlach, John. Removal of hydrocarbons, mercury and arsenic from oil-field produced water. United States Patent 6117333: 2000.
- Gottlieb K., Grinbaum B., Chen D. and Stevens G. W. The use of pulsed perforated plate extraction column for recovery of sulphuric acid from copper tank house electrolyte bleeds. Hydrometallurgy 58(2000): 203–213.
- Iberhan L. and Wisniewskisi M. Extraction of arsenic (III) and arsenic (V) with Cyanex 301, Cyanex 925 and their mixture. Hydrometallurgy 63 (2001): 23-30.
- Khaled M. Rawajfeh, Ali Kh. Al-Matar. Uranium extraction from purified wet process Jordanian phosphoric acid: a development study. Hydrometallurgy 56 (2000): 309–322.
- Krupp E.M., Johnson C., Rechsteiner C., Moir M., Leong D. and Feldmann J.. Investigation into the determination of trimethylarsine in natural gas and its partitioning into gas and condensate phases using (cryotrapping)/gas chromatography coupled to inductively coupled plasma mass spectrometry and liquid/solid sorption techniques. Spectrochimica Acta Part B 62 (2007): 970–977.
- Laddha G.S. and Degaleesan T.E. Transport Phenomena in Liquid Extraction. : McGraw-Hill, 1978.
- Meera R., Francis T. and Reddy M.L.P. Studies on the liquid–liquid extraction of mercury (II) from acidic chloride solutions using Cyanex 923. Hydrometallurgy 61 (2001): 97–103.

- Mir K. A., Rutter A., Koch I., Smith P., Reimer K. J. and Poland J. S. Extraction and speciation of arsenic in plants grown on arsenic contaminated soils. Talanta 72 (2007): 1507–1518.
- Patthaveekongka, W., Ramakul, P., Assabumrungrat, S., and Pancharoen, U. Transport of Cerium, Lanthanum, Neodymium and Palladium via Hollow Fiber Supported Liquid membrane Base on Equilibrium Theory. Journal of the Chinese Institute Chemical of Engineering (2006): 11-14.
- Pizarro I., Gómez M., Cámara C. and Palacios M.A. Arsenic speciation in environmental and biological samples extraction and stability studies. Analytica Chimica Acta 495 (2003) : 85–98.
- Ralf K., Werner S., Robert B. Sudderth, and Gary A. Korkosky. Process for selective extraction of contaminant elements from mixtures. US Patent 428275: 1991.
- Sangtumrong S., Ramakul P., Satayaprasert C., Pancharoen U. and Lothongkum A.W. Purely separation of mixture of mercury and arsenic via hollow fiber supported liquid membrane. J. Ind. Eng. Chem 13 (2007): 751-756.
- Shuzo T. and Toshikatsu H. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil. Chemosphere 46 (2002): 31-38.
- Takashi K. Atomic Absorption Spectroscopic Determination of Arsenic in Antimony Compounds Using Solvent Extraction and Arsine Generation. Mikrochimica Acta [Wien] 1 (1979): 435-443.
- Talvarides, L.L., Bae, J.H., and Lee, C.K. Solvent extraction, membranes and ion exchange in hydrometallurgical dilute metals separation. Separation Science and Technology 22(2&3) (1987): 581-617.
- Usman M. R., Hussain S. N., Rehman L., Bashir M. and Butt M. A. Mass transfer performance in a pulsed sieve-plate extraction column. Proc. Pakistan Acad. Sci. 43(3) (2006): 173-179.
- Wisniewski, M. Extraction of arsenic from sulphuric acid solution by Cyanex 923. Hydrometallurgy 46 (1997): 235-241.
- Yadav R.L. and Patwardhan A.W. Design aspects of pulsed sieve plate columns. Chemical Engineering Journal 138 (2008): 389–415.

Yuan C., Jiang G. and He B. Evaluation of the extraction methods for arsenic speciation in rice straw, *Oryza sativa* L., and analysis by HPLC-HG-AFS. J. Anal. At. Spectrom 20 (2005): 103-110.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลผลการศึกษาชนิดของสารสกัดเดี่ยว

ชนิดของสารสกัด	ความเข้มข้น (M)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
HCl	1	60	0.03693	18.103
HNO ₃	1	60	0.03519	17.249
H ₂ SO ₄	1	60	0.03449	16.907
(NH ₄) ₂ SO ₄	1	60	0.01226	6.011
NaOH	1	60	0.01150	5.636
NaCl	1	60	0.00732	3.586

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัดสัของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว กรดไฮโดรคลอริก

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกใน สารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
0.2	60	0.01237	6.064
0.4	60	0.02466	12.088
0.6	60	0.03036	14.882
0.8	60	0.03382	16.578
1.0	60	0.03693	18.103
2.0	60	0.03538	17.345
3.0	60	0.03271	16.034
4.0	60	0.03230	15.833
5.0	60	0.03160	15.492

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัดสของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว เมทานอล

ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกใน สารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
5	60	0.04003	19.624
10	60	0.04559	22.350
15	60	0.05302	25.989
20	60	0.05875	28.800
25	60	0.05811	28.488
30	60	0.05485	26.888
35	60	0.05620	27.551

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดเดี่ยว เอทานอล

ความเข้มข้นเอทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกใน สารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
5	60	0.03726	18.263
10	60	0.03613	17.713
15	60	0.04578	22.440
20	60	0.04357	21.358
25	60	0.04243	20.801
30	60	0.04243	20.798
35	60	0.04146	20.324

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.2 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
0.2	2.5	60	0.01564	7.669
0.2	5	60	0.01514	7.424
0.2	10	60	0.02782	13.640
0.2	15	60	0.03830	18.773
0.2	20	60	0.04664	22.862
0.2	25	60	0.04587	22.485
0.2	30	60	0.04421	21.669

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.4 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
0.4	2.5	60	0.01781	8.729
0.4	5	60	0.02193	10.752
0.4	10	60	0.02841	13.928
0.4	15	60	0.04106	20.127
0.4	20	60	0.05189	25.436
0.4	25	60	0.05445	26.690
0.4	30	60	0.05784	28.351

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.6 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
0.6	2.5	60	0.02472	12.117
0.6	5	60	0.02760	13.527
0.6	10	60	0.03060	14.999
0.6	15	60	0.04156	20.375
0.6	20	60	0.05041	24.711
0.6	25	60	0.05975	29.291
0.6	30	60	0.06105	29.927

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 0.8 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
0.8	2.5	60	0.02652	13.000
0.8	5	60	0.02760	13.527
0.8	10	60	0.03332	16.335
0.8	15	60	0.04838	23.716
0.8	20	60	0.06404	31.393
0.8	25	60	0.06384	31.295
0.8	30	60	0.06787	33.268

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
1.0	2.5	60	0.02436	11.942
1.0	5	60	0.02477	12.144
1.0	10	60	0.04666	22.872
1.0	15	60	0.05130	25.148
1.0	20	60	0.07152	35.059
1.0	25	60	0.06729	32.985
1.0	30	60	0.06787	33.268

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลผลการศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริกกับเมทานอลโดยที่ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็น 1.2 M

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัดอาร์เซนิก (%)
1.2	2.5	60	0.02578	12.638
1.2	5	60	0.02886	14.148
1.2	10	60	0.04643	22.761
1.2	15	60	0.05565	27.279
1.2	20	60	0.06673	32.711
1.2	25	60	0.06289	30.826
1.2	30	60	0.06128	30.037

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหลอด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้ของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลผลการศึกษามวลของระบบ

ปริมาณอาร์เซนิกในคอนเดนเสท เริ่มต้น (ppm)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ปริมาณอาร์เซนิกในคอนเดนเสท สุดท้าย (ppm)
0.154	0.086	0.092
0.204	0.109	0.121
0.327	0.171	0.195

ภาวะที่ทำการทดลอง : อัตราส่วนระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 1 M กับเมทานอล 20%v/v

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.00785	3.829
		60	0.01770	8.634
		120	0.02715	13.244
		180	0.05105	24.902
		240	0.06830	33.317
		300	0.06605	32.220

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 8 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.01215	5.927
		60	0.02180	10.634
		120	0.04560	22.244
		180	0.06975	34.024
		240	0.07825	38.171
		300	0.07951	38.784

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 8 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 12 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาท)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.01236	6.029
		60	0.02832	13.815
		120	0.06845	33.390
		180	0.08710	42.487
		240	0.08919	43.507
		300	0.08840	43.122

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 12 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 16 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.05126	25.005
		60	0.06236	30.420
		120	0.09687	47.254
		180	0.10638	51.893
		240	0.10843	52.893
		300	0.10791	52.639

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 16 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลผลการศึกษาค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาท)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.04943	24.112
		60	0.07187	35.059
		120	0.10644	51.922
		180	0.12724	62.068
		240	0.12412	60.546
		300	0.12470	60.829

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพอลิเมอร์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.17 ข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 2:1

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.07533	36.746
		60	0.07917	38.620
		120	0.13921	67.907
		180	0.17408	84.917
		240	0.17240	84.098
		300	0.16010	78.098

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 2:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 3:1

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.10986	53.590
		60	0.12357	60.278
		120	0.17669	86.190
		180	0.17504	85.385
		240	0.17460	85.171
		300	0.16894	82.410

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 3:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลผลการศึกษ้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 4:1

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.15846	77.298
		60	0.16720	81.561
		120	0.18390	89.707
		180	0.19041	92.883
		240	0.19181	93.566
		300	0.19262	93.961

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 4:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 5:1

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.11878	57.941
		60	0.11699	57.068
		120	0.12042	58.741
		180	0.12242	59.717
		240	0.12379	60.385
		300	0.12447	60.717

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 5:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.21 ข้อมูลผลการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 1:2

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.03856	18.810
		60	0.04865	23.732
		120	0.05922	28.888
		180	0.06605	32.220
		240	0.07328	35.746
		300	0.07602	37.083

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:2 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลผลการศึกษ้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 1:3

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.02610	12.732
		60	0.02819	13.749
		120	0.03400	16.585
		180	0.04215	20.561
		240	0.05272	25.717
		300	0.05860	28.585

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:3 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลผลการศึกษ้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 1:4

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.02585	12.608
		60	0.02672	13.034
		120	0.02539	12.385
		180	0.02410	11.756
		240	0.02788	13.600
		300	0.02346	11.445

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:4 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.24 ข้อมูลผลการศึกษ้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อน และอัตราการไหลของสารสกัดเป็น 1:5

ความเข้มข้น กรดไฮโดรคลอริก (M)	ความเข้มข้นเมทานอล (%v/v)	เวลา (นาที)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
1	20	30	0.02410	11.756
		60	0.02392	11.666
		120	0.02399	11.700
		180	0.02399	11.700
		240	0.02435	11.877
		300	0.02454	11.968

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:5 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ตารางที่ ก.25 ข้อมูลผลการศึกษาน้ำจืดจำนวนรอบการสกัด

จำนวนรอบ ในการสกัด	ปริมาณอาร์เซนิกในคอนเดนเสท (ppm)		ปริมาณอาร์เซนิกในสาร สกัด (ppm)	ปริมาณอาร์เซนิกในสารป้อน หลังสกัด (ppm)	ร้อยละการสกัด อาร์เซนิก (%)
	เริ่มต้น	สุดท้าย			
1	0	0.191	0.191	0.014	93.171
2	0.191	0.367	0.176	0.029	85.854
3	0.367	0.535	0.168	0.037	81.951
4	0.535	0.67	0.135	0.07	65.854
5	0.670	0.766	0.096	0.109	46.829
6	0.766	0.843	0.077	0.128	37.561

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนระหว่างอัตราไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 4:1 รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.26 ข้อมูลของการศึกษาค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดต่อค่า HTU_{oy}

ความเร็วการพัลส์ (mm/s)	HTU_{oy} (ซ.ม.)
4	615.451
8	400.092
12	282.953
16	197.551
20	134.244

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดมีค่าเท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 1 M กับเมทานอล 20%v/v รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.27 ข้อมูลของการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดต่อค่า HTU_{oy} โดยอัตราการไหลของสารละลายสกัดคงที่

อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัด	HTU_{oy} (ซ.ม.)
1:1	134.244
2:1	46.835
3:1	45.512
4:1	25.766
5:1	146.964

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการฟิลล์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 1 M กับเมทานอล 20%v/v รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.28 ข้อมูลของการศึกษาอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัดต่อค่า HTU_{oy} โดยอัตราการไหลของสารละลายป้อนคงที่

อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของสารละลายป้อนและสารละลายสกัด	HTU_{oy} (ซ.ม.)
1:1	134.244
1:2	433.024
1:3	785.051
1:4	1353.716
1:5	1521.732

ภาวะที่ทำการทดลอง : สารละลายป้อนคอนเดนเสทที่มีอาร์เซนิกเข้มข้นประมาณ 0.204 ส่วนในล้านส่วน ค่าความเร็วของการพัลส์ของหอสกัดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของสารสกัดผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก 1 M กับเมทานอล 20%v/v รูปแบบการไหลเป็นแบบสวนทางกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข.1 ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสกัด (Percent Extraction)

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.1 สามารถคำนวณร้อยละการสกัดได้ดังนี้

พิจารณาข้อมูลของปริมาณอาร์เซนิกที่สกัดโดยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร

สารละลายป้อนเข้ามีอาร์เซนิกเข้มข้นเท่ากับ 0.204 ppm

ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารสกัดขาออกเท่ากับ 0.037 ppm

ร้อยละของสารที่สกัดได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

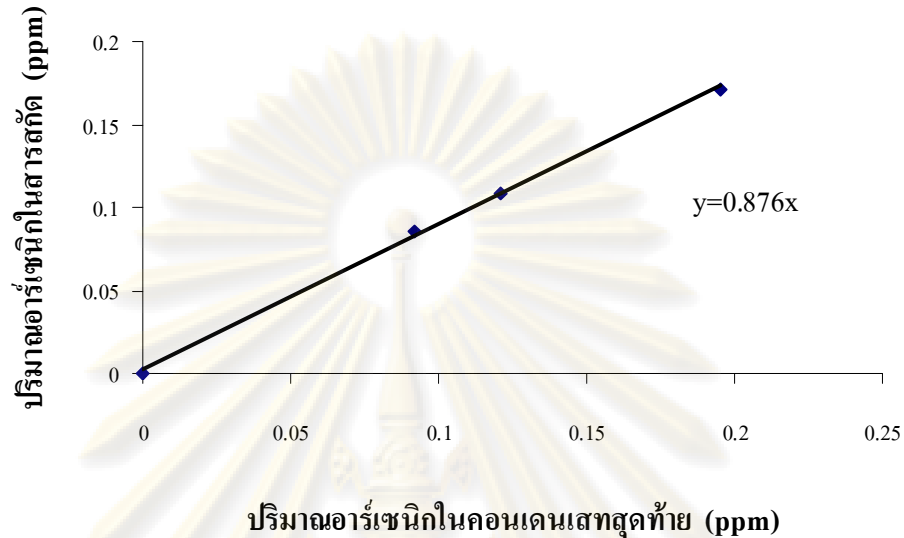
$$\% \text{ Extraction} = \frac{C_{As, \text{extracted (out)}}}{C_{As, \text{feed (in)}}} \times 100$$

$$\text{ดังนั้น ร้อยละการสกัดมีค่าเท่ากับ } \frac{0.037}{0.204} \times 100 = 18.103$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณค่า HTU_{oy}

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.11 สามารถสร้างกราฟดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แสดงเส้นโค้งสมดุลของการสกัดอาร์เซนิกจากคอนเดนเสท

ข้อมูลจากภาคผนวก ก.16 และรูปที่ 2.13 สามารถคำนวณค่า HTU_{oy} ได้ดังนี้

ค่าความเร็วของการพลัสของหอสกัด 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่เวลา 180 นาที

สารสกัดขาเข้ามีอาร์เซนิกเข้มข้นเท่ากับ (x_1)	0	ppm
สารละลายป้อนขาออกมีอาร์เซนิกเข้มข้นเท่ากับ (y_1)	0.078	ppm
ความเข้มข้นของอาร์เซนิกในสารสกัดขาออกเท่ากับ (x_2)	0.127	ppm
สารละลายป้อนขาเข้ามีอาร์เซนิกเข้มข้นเท่ากับ (y_2)	0.204	ppm
ค่าความชันของเส้นสมดุล (m)	0.876	
ค่าความสูงของหอสกัด (H)	200	cm.

หา NTU_{oy} และ HTU_{oy} ได้จากสมการที่ 2.9-2.11

$$NTU_{oy} = \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{y^* - y} = \frac{(y_1 - y_2)}{(y^* - y)_m}$$

$$(y^* - y)_m = \frac{(mx_1 - y_1) - (mx_2 - y_2)}{\ln \left(\frac{(mx_1 - y_1)}{(mx_2 - y_2)} \right)}$$

$$(y^* - y)_m = \frac{(0.876 * (0) - 0.078) - (0.876 * (0.127) - 0.204)}{\ln\left(\frac{(0.876 * (0) - 0.078)}{(0.876 * (0.127) - 0.204)}\right)}$$

$$(y^* - y)_m = -0.085$$

$$NTU_{oy} = \frac{(0.078 - 0.204)}{-0.085}$$

$$NTU_{oy} = 1.489$$

$$HTU_{oy} = \frac{Z}{NTU_{oy}}$$

$$HTU_{oy} = \frac{200}{1.489}$$

$$HTU_{oy} = 134.244 \text{ cm}$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบงกช โรจนศิริประภา เกิดที่กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนรองจากจำนวนทั้งหมด 4 คน ของนายพงศกร และนางนิภาพร โรจนศิริประภา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2545 และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย