



การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ

Removal of Arsenic in Water by Adsorption

รัชนก แซ่เจิน

Ratchanok Saejen

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Environmental Management

Prince of Songkla University

2541

Order Key	18603
BIB Key	156184

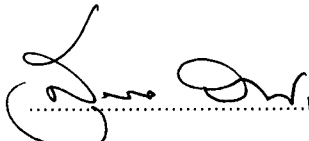
เลขหมู่	00544 712 1511 ๑.๒
เลขทะเบียน	- 1, ๒๓.๘. 2542

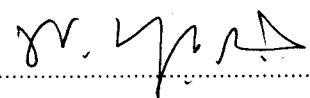
(1)

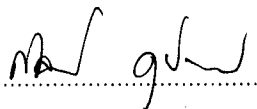
ชื่อวิทยานิพนธ์      การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ  
ผู้เขียน              นางสาวรัชชก แซ่เจิน  
สาขาวิชา              การจัดการสิ่งแวดล้อม

---

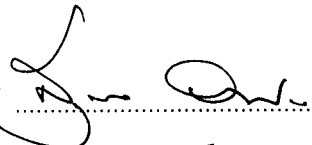
คณะกรรมการที่ปรึกษา

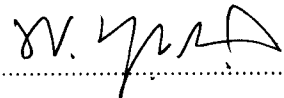
  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

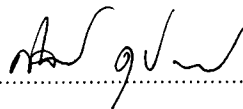
  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ บุญนวล)

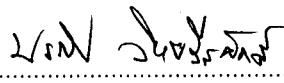
  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

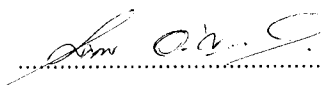
คณะกรรมการสอบ

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

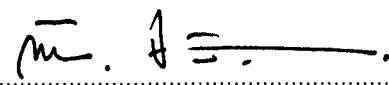
  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ บุญนวล)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

  
..... กรรมการ  
(ดร.บรรจง วิทย์วีรศักดิ์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ อธิบุญนารถ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ก้าน จันท์พรหมมา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ  
ผู้เขียน นางสาวรัชก เชนเจน  
สาขาวิชา การจัดการสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2541

### บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น ซึ่งผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารกระตุ้น 2 ชนิด คือ เกลือแกง(NaCl) และเฟอริกคลอไรด์( $FeCl_3$ ) ที่ใช้ในอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบ ต่อสารกระตุ้นที่เหมาะสม โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับสารหนูในถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ได้จาก กะลามะพร้าว ต่อ NaCl (1:3) กะลามะพร้าว ต่อ  $FeCl_3$  (1:3) แกลบ ต่อ NaCl (1:1) และ แกลบ ต่อ  $FeCl_3$  (1:1) พบว่า ให้ความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 เป็น 0.01 0.44 0.03 และ 0.21 มิลลิกรัมสารหนู ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ และให้ความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 เป็น 0.01 3.26 0.01 และ 2.92 มิลลิกรัมสารหนู ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากค่าคงที่ในสมการของ Freundlich ผลของการหาค่าไอโซเทอรั่มการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์มีความเหมาะสมต่อการดูดซับสารหนูได้ดีกว่าชนิดที่ใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น และในการทดสอบแบบต่อเนื่องได้เลือกใช้คอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชนิดแกลบ ต่อ  $FeCl_3$  ในอัตราส่วน 1:1 พบว่าให้ค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และ 5 เท่ากับ 0.48 และ 0.82-1.02 มิลลิกรัมสารหนู ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ

Thesis Title            Removal of Arsenic in Water by Adsorption  
Author                    Miss Ratchanok Saejen  
Major Program         Environmental Management  
Academic Year         1998

#### Abstract

The objective of this research is to study the adsorption of Arsenic(III) and Arsenic(V) by activated carbon prepared from residual materials available locally. They were made by chemical activated process. Chemicals used were sodium chloride (NaCl) and ferric chloride ( $\text{FeCl}_3$ ) in an appropriate ratio with raw material. Batch adsorption tests were used to evaluate the efficacies of arsenic adsorption. Four types of activated carbon were tested, which are Coconut shell:NaCl (1:3), Coconut shell: $\text{FeCl}_3$  (1:3), Rice husk :NaCl (1:1) and Rice husk: $\text{FeCl}_3$  (1:1). The results show that the adsorption capacity constants (K) for Arsenic(III) calculated according to Freundlich equation were 0.01, 0.44, 0.03 and 0.21 mg As/ g activated carbon, respectively and those for Arsenic(V) were 0.01, 3.26, 0.01 and 2.92 mg As/ g activated carbon, respectively. It was concluded from the adsorption isotherm that arsenic was better adsorbed by  $\text{FeCl}_3$ -activated carbon than by NaCl-activated carbon. Continuous adsorption tests using column of Rice husk : $\text{FeCl}_3$  (1:1) activated carbon were performed. The adsorption capacity constants were found to be 0.48 mg As/g activated carbon for Arsenic(III) and 0.82-1.02 mg As/ g activated carbon for Arsenic(V), respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษา เสนอแนะแนวทาง และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง ตลอดจนคอยติดตามความก้าวหน้าอยู่เสมอ จากอาจารย์ที่ปรึกษา คือ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชณู บุญนวล และผู้ช่วยศาสตราจารย์กัลยาณี คุปตานนท์ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.บรรจง วิทยวีรศักดิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ อรัญนารอด ที่ได้กรุณาช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกเกี่ยวกับสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ และขอขอบคุณ คุณยุพิน จันทรัตน์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณนิภา มหารัชพงศ์ คุณจินตนา แก้วบริสุทธ์ คุณสุจริต สิงห์พันธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณคุณจีรพา บุญญคง ที่ได้ช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่าง ตลอดจนเพื่อนๆ และน้องๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ได้เป็นกำลังใจให้ด้วยดีตลอดมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆ ที่ได้ให้การสนับสนุนการศึกษา และเป็นกำลังใจสำคัญตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

รัชนก แซ่เจิน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	3
วัตถุประสงค์	24
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	24
2 วิธีการวิจัย	25
วัสดุ	25
อุปกรณ์	25
ขอบเขต และวิธีการวิจัย	26
วิธีการวิเคราะห์	31
3 ผล และการอภิปรายผล	33
การทดลองที่ 1 การเตรียม และศึกษาสมรรถนะของถ่านกัมมันต์	33
การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างพื้นผิว ความเป็น รูพรุนของถ่านกัมมันต์	37
การทดลองที่ 3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูแบบ ไม่ต่อเนื่อง	44
การทดลองที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ แบบต่อเนื่อง	59

## สารบัญ. (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดลองที่ 5 การลดปริมาณสารหนู โดยใช้ น้ำจาก บ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	66
4 บทสรุป และข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก. การเตรียมอุปกรณ์ และวิธีการวิเคราะห์	88
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่จากไอโซเธอร์มการดูดซับ	96
ภาคผนวก ค. การคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	97
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	99
ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์สารประกอบในพื้นผิวถ่านกัมมันต์	100
ภาคผนวก ฉ. ลักษณะวัตุถุติบผสมสารกระตุ้น ก่อนและหลังผ่านการเผา	103
ภาคผนวก ช. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง	104
ภาคผนวก ซ. ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	105
ประวัติผู้เขียน	108

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1 ชนิดของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ	11
2 การใช้ประโยชน์ของสารหนู และสารประกอบของสารหนู	12
3 ค่ามาตรฐานของสารหนูที่ยอมรับได้ในน้ำประเภทต่างๆ	18
4 แสดงการลดปริมาณสารหนู ด้วยวิธีการดูดซับ	21
5 วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำตัวอย่าง	31
6 แสดงค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบต่างๆ ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	34
7 แสดงค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป	36
8 ลักษณะความพรุนที่เห็นจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของกะลามะพร้าว แกลบ และถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ	42
9 ผลการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ในการดูดซับสารหนู วาเลนซี 3 ที่เวลาต่างๆ	44
10 ผลการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ในการดูดซับสารหนู วาเลนซี 5 ที่เวลาต่างๆ	45
11 แสดงค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 เมื่อเปลี่ยนแปลง น้ำหนักของถ่านกัมมันต์	49
12 แสดงค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 เมื่อเปลี่ยนแปลง น้ำหนักถ่านกัมมันต์	50
13 แสดงค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด จากสมการของ Freundlich	54
14 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารหนูที่เหลือในน้ำ ของถ่านแกลบ ต่อ FeCl <sub>3</sub> ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5	56
15 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่าน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 2.08 มก./ล.	60
16 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่าน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1.81 มก./ล.	61



## รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
17 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่าน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 5.06 มก./ล.	62
18 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 อ.ร่อนพิบูลย์ หลังผ่านการตกตะกอนตามธรรมชาติ	67
19 ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	68
20 แสดงความเข้มข้นของสารหนูในน้ำแบบไม่ต่อเนื่องจากบ้าน เลขที่ 28/5 หมู่ 12 อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	71
21 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนู	75
22 ค่า IODINE CORRECTION FACTOR ในการหาค่าไอโอดีน	90
23 ตัวอย่างผลการคำนวณค่า X/M ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 1	96
24 ตัวอย่างข้อมูลการหาความสัมพันธ์เชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่จากสมการ ของ Freundlich	96

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ลักษณะเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับ ในเฟสของเหลว	8
2 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์	9
3 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 3 กับค่าพีเอช	13
4 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 5 กับค่าพีเอช	13
5 ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนูที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ ความดัน 1 บรรยากาศ	14
6 แสดง Eh-pH ไดอะแกรมในแต่ละสปีชีส์ของสารหนู และเหล็ก	16
7 การละลายของตะกอนเฟอริกฮาร์ซีเนท และ Scorodite กับค่าพีเอช	17
8 แบบจำลองในการลดปริมาณสารหนู ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	27
9 ชุดการทดลองที่ใช้ทดสอบแบบต่อเนื่อง	30
10 ขั้นตอนการศึกษาในงานวิจัย เพื่อใช้ในกระบวนการลดปริมาณ สารหนูในน้ำ	32
11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีน กับอัตราส่วนระหว่าง เกลือแกง ต่อวัตตุดิบ	35
12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีน กับอัตราส่วนระหว่าง เฟอริกคลอไรด์ ต่อวัตตุดิบ	35
13 แสดงลักษณะโครงสร้าง ของกะลามะพร้าวก่อนทำการเผา และ กระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์	38
14 แสดงลักษณะโครงสร้าง ของแกลบก่อนทำการเผา และกระตุ้น ให้เป็นถ่านกัมมันต์	39
15 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว ต่อเกลือแกง(1:3) ที่อุณหภูมิ 800 °C	40
16 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์(1:3) ที่อุณหภูมิ 800 °C	40

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากแกลบ ต่อเกลือแกง(1:1) ที่อุณหภูมิ 800 °C	41
18 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ จากแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์(1:1) ที่อุณหภูมิ 800 °C	41
19 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิต จากกะลามะพร้าว ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:3	46
20 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิต จากแกลบ ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1	46
21 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิต จากกะลามะพร้าว ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:3	47
22 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิต จากแกลบ ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1	47
23 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 1	51
24 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 2	51
25 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 3	52
26 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 1	52
27 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 2	53
28 ไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านชนิดต่างๆ ในสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 3	53
29 เปรียบเทียบไอโซเทิร์มการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ของถ่านกัมมันต์ ชนิดแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5	57
30 เปรียบเทียบไอโซเทิร์มการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ของถ่านกัมมันต์ ชนิดแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5	57
31 แสดงโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ชนิด แกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:0.5	58
32 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3	63

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5	63
34 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3	64
35 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5	64
36 แสดงลักษณะสีของน้ำดิบก่อน และหลังผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์	69
37 แสดง Breakthrough Curve ระหว่าง C/Co (%) กับปริมาตรของน้ำ(ลิตร) ของน้ำจาก อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	69
38 แสดง Breakthrough Curve ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูกับปริมาตรของน้ำ(Bed Volume) จาก อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	70
39 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับสารหนูออกจากตัวอย่างน้ำของ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช	72
40 ตัวอย่างกราฟคาลิเบรชันการวิเคราะห์สารหนู	95
41 แสดงตัวอย่างไอโซเทิร์มการดูดซับจากการคำนวณ	96
42 ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรถ่านในคอลัมน์ และการนำไปใช้	97
43 แสดงตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง	99
44 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ชนิดเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์(1:1) ด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)	100
45 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบ เพื่อหาชนิดของสารประกอบ ด้วยวิธี X-ray Diffraction (XRD)	102
46 ของผสมระหว่างกะลามะพร้าว กับสารกระตุ้น ก่อนเผา	103
47 ของผสมระหว่างเกลบ กับสารกระตุ้น ก่อนเผา	103
48 ตัวอย่างถ่านจากเกลบ และกะลามะพร้าว ที่ผ่านการเผาแล้ว	103
49 เตาเผา พร้อมภาชนะดินเผาที่มีฝาปิด	104
50 เครื่องเขย่าขวด	104
51 ชุดการวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์	104
52 เครื่องสตริปปีง โฟเทนซิโอมิเตอร์	104

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันปัญหาทางสิ่งแวดล้อมมีขึ้นมากมายหลายรูปแบบ ปัญหาหนึ่งที่นำสนใจศึกษา คือ ปัญหาทางด้านโลหะเป็นพิษ เพราะนับวันจะมีแนวโน้มของการสะสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยมีการสนับสนุนนโยบายทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี เช่น การทำเหมืองแร่ในอดีต ตลอดจนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน กิจกรรมเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ระดับความเข้มข้นของโลหะเป็นพิษสูงเกินกว่าสภาพปกติตามธรรมชาติ และก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อมตามมา นอกจากนั้นยังส่งผลต่อเนื่องมาสู่มนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆทั้งทางตรง และทางอ้อม ดังเช่น กรณีในประเทศญี่ปุ่น ประชาชนมีการบริโภคอาหารจากสัตว์ทะเล ซึ่งมีสารปรอทสะสมอยู่ในปริมาณสูง ก่อให้เกิดโรคมินามาตะ โดยมีอาการหงุดหงิด อารมณ์อ่อนไหวง่าย ความจำเลอะเลือน สายตาคิดปกติ มีอาการทางระบบประสาท เกร็ง ปวดตามข้อ จนไม่สามารถบังคับกล้ามเนื้อให้ทำงานเหมือนปกติได้ ปัญหาเหล่านี้จึงส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของคนญี่ปุ่นบริเวณอ่าวมินามาตะครั้งนั้นเป็นอย่างมาก

สำหรับประเทศไทย เมื่อประมาณปี พ.ศ. 2530 ได้ตรวจพบโรคพิษสารหนู หรือที่เรียกกันว่าโรคใช้ดำ ในอำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งมีสาเหตุมาจากการทำเหมืองแร่ดีบุกในตำบลร่อนพิบูลย์เป็นเวลาเกือบร้อยปี(มงคล ณ สงขลา และจันทร์เพ็ญ ชูประภาวรณ, 2539) สารหนูซึ่งอยู่ในรูปของแร่อาร์ซีโนไฟไรต์ เป็นเพื่อนแร่ตามธรรมชาติที่หลงเหลือจากการทำเหมืองได้เกิดการผุกร่อน และละลายปะปนไปกับน้ำที่ไหลผ่านลงสู่ลำธาร คลอง ปนเปื้อนเข้าไปในบ่อน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งน้ำดื่ม น้ำใช้ของชาวบ้าน นอกจากนี้ กระบวนการทำเหมืองแร่ และแต่งแร่ยังทำให้สารหนูปนเปื้อนลงในดิน และตะกอนท้องน้ำ(อารี สุวรรณมณี, 2533) เกิดการสะสมสารหนูในพืช และสัตว์ปริมาณค่อนข้างสูง อีกทั้งยังสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ โดยถ่ายทอดผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Food Chain)

การปนเปื้อนของสารหนูในตำบลร่อนพิบูลย์ สามารถแพร่กระจายไปยังบริเวณที่ห่างไกลออกไปโดยเฉพาะบริเวณลุ่มน้ำปากพนัง ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ในทิศทางการไหลของกระแส น้ำจากเทือกเขาไปทางทิศตะวันออกผ่านตำบลร่อนพิบูลย์ ออกไปสู่อ่าวปากพนัง ครอบคลุมพื้นที่ 7 อำเภอ

คือ อำเภอชะอวด อำเภอรัษฎา อำเภอเชียรใหญ่ อำเภอหัวไทร อำเภอปากพนัง พื้นที่บางส่วนของอำเภอลานสกา และอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช จึงมีโอกาสก่อให้เกิดโรคพิษสารหนูได้ในหมู่คนจำนวนมากขึ้น หากยังมีการอุปโภค บริโภคน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนู

จากการศึกษาของ ณรงค์ ณ เชียงใหม่ (2534) พบว่า มีปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำอยู่ระหว่าง 0.055-5.556 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีการสะสมของสารหนูในเส้นผม ฟันผุ ผลไม้ในเขตตำบลรัษฎา และจากการศึกษาของ สุรพล อารียกุล (2534) ได้เก็บตัวอย่างน้ำในเขตพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง ครอบคลุม 12 ตารางกิโลเมตร พบว่า มีความเข้มข้นของสารหนูในช่วง 0.026-1.45 มิลลิกรัมต่อลิตร Arrykul, Kooptarnon and Wittayawarawat (1996) ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของสารหนู แคลเซียม และตะกั่ว ในลุ่มน้ำปากพนัง พบว่า ในแหล่งน้ำมีเพียงสารหนูที่มีปริมาณสูงเกินค่ามาตรฐานน้ำดื่มที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งประชาชนยังคงนิยมบริโภคน้ำจากบ่อน้ำตื้น และน้ำบาดาล จึงมีความเสี่ยงต่อการได้รับปริมาณสารหนูโดยตรง โดยพิษสารหนูจะสะสม และก่อให้เกิดอันตรายต่ออวัยวะต่างๆ เกือบทุกระบบ ตั้งแต่ผิวหนังภายนอก จะเกิดตุ่มเม็ดสีดำขึ้นลุกลาม จนเป็นมะเร็งผิวหนัง และยังสามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งในระบบอื่นๆตามมา เช่น ระบบทางเดินอาหาร ระบบหายใจ ระบบประสาท ระบบหัวใจ และหลอดเลือด (สุโขทัยธรรมมาภิราชมหาวิทยาลัย, 2538)

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ทางรัฐบาลได้เข้าช่วยเหลือหลายวิธี ตั้งแต่การลดปัญหาแหล่งกำเนิดจากกองเศษแร่ การแจกโถงน้ำรองรับน้ำฝนเพื่อใช้บริโภค การให้บริการน้ำประปาแก่ชาวบ้าน ฯลฯ แต่พบว่ายังมีปัญหาเกิดขึ้น เนื่องจากบางพื้นที่ยังอยู่ห่างไกล จนการบริการต่างๆ เข้าไม่ถึง หรือ บางครอบครัวมีปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอต่อการบริโภค จึงยังคงจำเป็นต้องใช้น้ำจากน้ำบ่อน้ำตื้นบริโภคโดยตรง การลดปริมาณสารหนูในน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ได้น้ำ ซึ่งปลอดภัยต่อการใช้อุปโภคบริโภค และลดอัตราความเสี่ยงต่อการเกิดโรคพิษสารหนู ซึ่งอาจเกิดขึ้นกับประชาชน ดังนั้น การบำบัดน้ำเพื่อลดปริมาณสารหนู ด้วยกระบวนการดูดซับจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการแก้ปัญหาพิษสารหนูที่ อาจเกิดขึ้นต่อไปในอนาคต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ซึ่งมีความสามารถสูงในการดูดซับ สามารถเตรียมได้จากอินทรีย์วัตถุ โดยเฉพาะแกลบ และกะลามะพร้าวเป็นวัสดุเหลือใช้ และหาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงเป็นประโยชน์สำหรับนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการลดปริมาณสารหนูในน้ำครั้งนี้

## การตรวจเอกสาร

เนื่องจากการศึกษาวิจัยในฉบับนี้ ศึกษาการบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น เพื่อลดความเป็นพิษของสารหนู ดังนั้นจึงมีรายละเอียดที่ศึกษาดังต่อไปนี้

### 1. กระบวนการดูดซับ ( Adsorption )

การดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งนิยมใช้กันมากในด้านการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยตัวดูดซับ (adsorbent) แยกระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) กับตัวทำละลาย (solvent) ออกจากกัน ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุน และมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ผิวประมาณ  $450-1,500 \text{ m}^2/\text{g}$  (Weber, 1981) และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่  $10-10,000 \text{ \AA}$  (Hassler, 1963)

#### 1.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น

ก. เศษวัสดุที่ได้จากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ชังข้าวโพด และเมล็ดผลไม้ เป็นต้น

ข. ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท บิทูมินัส

ค. ชิ้นส่วนจากสัตว์ เช่น กระดูก และ เลือดแห้ง

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ จะขึ้นอยู่กับ วัตถุดิบที่ใช้ และกระบวนการผลิต ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืช และสัตว์ จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน (ดำรง ชุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533)

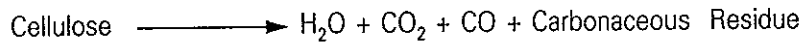
#### 1.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

##### 1.2.1 การเผาวัตถุดิบให้เป็นผลึกถ่าน (Carbonization)

การคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนของการเผาวัตถุดิบให้แปลงสภาพเป็นถ่าน โดยปราศจากอากาศ ซึ่งจะเกิดการสลาย (Pyrolysis) ขององค์ประกอบในวัตถุดิบจำพวกไม้ ได้แก่ เศษวัสดุ เหมเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อมีการเผาไหม้เกิดขึ้น องค์ประกอบเหล่านี้ก็จะสลายไป ซึ่งการสลายขององค์ประกอบต่างๆ เกิดขึ้น (Bhattacharya and Shrestha, 1990) ดังนี้

ก. การสลายของกลุ่มเซลลูโลส (Cellulose Pyrolysis) เซลลูโลสจะสลายไปได้

ดังสมการ



ที่ความร้อนต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเกิดการสลายไปได้อย่างช้าๆ ซึ่งตรงข้ามกับเมื่อใช้ความร้อนสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายไปอย่างรวดเร็ว และเกิดการระเหยของน้ำมันดิบ(Tar) เหลือแต่ถ่านไม้ การสลายตัวของเซลลูโลสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 350 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียสจะเกิดการระเหยออกไปในรูปก๊าซ

ข. การสลายไปของเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose Pyrolysis)

เมื่อเปรียบเทียบกับ การสลายไปของเซลลูโลส พบว่า เฮมิเซลลูโลสจะเริ่มเกิดการสลายตัวไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า และผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านเกิดขึ้นได้น้อยกว่า

ค. การสลายไปของลิกนิน (Lignin Pyrolysis)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่มีความเสถียรมากที่สุด การสลายของลิกนินเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส และจะเกิดถ่านได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลส ในอัตราความร้อนต่างๆ จะให้ผลผลิตที่เป็นถ่านจากลิกนินได้มากกว่า 50 % โดยน้ำหนัก

### 1.2.2 การกระตุ้นวัตถุดิบ (Activation) ให้เป็นถ่านกัมมันต์

การกระตุ้น เป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับถ่าน โดยปกติกระบวนการกระตุ้นมี 2 แบบ คือ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ และวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งทั้ง 2 วิธีการต้องใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้พลังงานความร้อนนี้ไปทำให้สารประกอบ และคาร์บอนที่ผิวของแท่งถ่านหลุดไป ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นมากมายที่ผิวของถ่าน

ก. วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

วิธีการนี้นิยมใช้ ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอากาศ เป็นตัวที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งจะอยู่ในรูปของออกซิไดซิงก๊าซ (Oxidizing gas) และจะทำปฏิกิริยากับน้ำมันดิบ และอะตอมของถ่าน ให้รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่าชนิดที่กระตุ้นโดยใช้สารเคมี รูพรุนนี้เหมาะสำหรับดูดกลิ่นไอ หรือ ก๊าซพิษได้ดี

ข้อดีสำหรับวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือหลังจากกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้วสามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้าง สำหรับ



ข้อเสีย คือ ต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นค่อนข้างสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยไอน้ำที่ใช้ต้องเป็นไอน้ำที่ถูกเผาจนร้อนมาก จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

#### ข. วิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีการกระตุ้นโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกับวัตถุดิบ และสารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำ (Dehydrating Agent) เช่น ซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) เป็นต้น (Kinoshita, 1976) โดยวิธีนี้จะนิยมใช้กับวัตถุดิบที่มาจากไม้ และพีท (Hassler, 1974)

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ผสมวัตถุดิบกับสารเคมีโดยตรงแล้วทำให้เป็นผลึกถ่าน (Carbonization) และกระตุ้นครั้งเดียวติดต่อกันไปเลย หรือ

แบบที่ 2 ทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านก่อนแล้วจึงเติมสารเคมีทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง

วิธีแรกจะลำบากในการล้างสารเคมีที่อยู่ตามรูพรุนออกได้ยากกว่าวิธีหลัง แต่จากการทดลองของ ดำรง ชุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล (2533) ได้ทำการกระตุ้นวัตถุดิบจากกะลามะพร้าว และถ่านกะลา ทั้ง 2 วิธี โดยใช้เกลือแกง (NaCl) เป็นตัวกระตุ้นในอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบกับเกลือแกงพบว่า ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 3 ค่าไอโอดีน (Iodine Number) จากแบบแรกจะมีค่าสูงกว่าแบบที่สอง และใช้เวลาในการกระตุ้นนาน 60 นาที ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสจะเป็นสภาวะที่ให้ค่าไอโอดีนสูงสุด

ข้อดีของการใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น คือ การแทรกซึมได้ทั่วถึง ได้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างใหญ่ และใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก สำหรับข้อเสีย คือ จะต้องล้างสารเคมีที่ติดกับถ่านกัมมันต์ออกให้หมด เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน จึงเป็นการสิ้นเปลืองเวลา แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำได้ อีกทั้งยังมีราคาถูก หาซื้อได้ในท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดพิษตกค้างหลังผ่านการกระตุ้น (ดำรง ชุมมงคล และ อภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533)

### 1.3 ประเภทของถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น

1.3.1 ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powdered Activated Carbon :PAC) หมายถึงปริมาณถ่านที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก

1.3.2 ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon :GAC) หมายถึงปริมาณถ่านที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

#### 1.4 รูปแบบของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) เป็นการดูดซับซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's force) เกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับ เคลื่อนที่สัมผัสกับตัวดูดซับ โดยมีแรงดึงดูดมากกว่าพลังงานจลน์ของอนุภาคสารนั้นและง่ายต่อการผันกลับของการดูดซับ (desorption)

1.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เป็นการดูดซับที่เกิดจากพันธะเคมีระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ กับสารที่ถูกดูดซับ มีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ และยากต่อการเกิดการผันกลับของการดูดซับ (Ford, 1981)

#### 1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ คือ

##### 1.5.1 ขนาด และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็ก จะมีอัตราการดูดติดผิวเร็วกว่า ดังนั้นคาร์บอนผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนเม็ด สำหรับพื้นที่ผิวมีความสำคัญโดยตรงกับขีดความสามารถในการดูดซับ นั่นคือ คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลสารได้มากกว่าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวของคาร์บอนส่วนใหญ่ได้มาจากรูพรุน หรือช่องว่างภายในคาร์บอนทั้งแบบผง และแบบเม็ด จึงมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2538)

##### 1.5.2 สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ

ก. ความสามารถในการละลาย : สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับบนถ่านได้น้อย

ข. ขนาดของโมเลกุล : การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุด เมื่อขนาดของโมเลกุลสารถูกดูดซับเล็กกว่าขนาดของรูพรุนเล็กน้อย และ โมเลกุลที่มีโครงสร้างเป็นกิ่ง (Branched Chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง (Straight Chain)

1.5.3 ค่าความเป็นกรดต่าง(pH): การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวน้ำคาร์บอน เช่น เมื่อพีเอชลดลง ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ที่พื้นผิวน้ำคาร์บอนเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น (Ford, 1981)

1.5.4 อุณหภูมิ : การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของถ่านเร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของถ่านอ่อนลง (Broughton , 1981)

## 1.6 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งกำหนดการนำไปใช้งาน มีดังนี้

1.6.1 ค่าไอโอดีน (Iodine Number) หมายถึงจำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับ และผ่านการกรองแล้วเป็น 0.02 นอร์มอล (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณรูพรุนที่สามารถดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แสดงถึงสมรรถนะของคาร์บอนในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลเล็ก(มันซิน ดัณฑุลเวคม์, 2538) ตามมาตรฐานของ AWWA กำหนดค่าของไอโอดีนไม่ต่ำกว่า 500 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านกัมมันต์ (AWWA, 1991)

1.6.2 ขนาด พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่าน เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับ กรณีถ่านมีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนมาก จะทำให้มีความสามารถในการดูดซับมากตามไปด้วย สำหรับขนาดของถ่านสามารถตรวจสอบจากการใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) เพื่อคัดขนาดของเม็ดถ่านก่อนที่จะนำไปใช้งาน

1.6.3 ปริมาณร้อยละของเถ้า (Ash Percent) แสดงถึงกากของถ่านกัมมันต์ ว่ามีปริมาณมาก หรือน้อยเพียงใด

1.6.4 ตัวเลขโมลาสเสส (Molasses Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

1.6.5 ตัวเลขความทนทาน (Abrasion Number) เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินความคงทนหรือความต้านทานของอนุภาคคาร์บอนที่ถูกการขัดสี

1.6.6 ตัวเลขแทนนิน (Tannin Number) เป็นค่ากำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่เกิดจากการย่อยสลายของพืช

1.6.7 ตัวเลขฟีนอล (Phenol Number) เป็นการวัดค่าความสามารถในการดูดซับกลิ่นและรสในสารละลาย

1.6.8 ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน (วิลโลพร วณิชย์วโรดม, 2536)

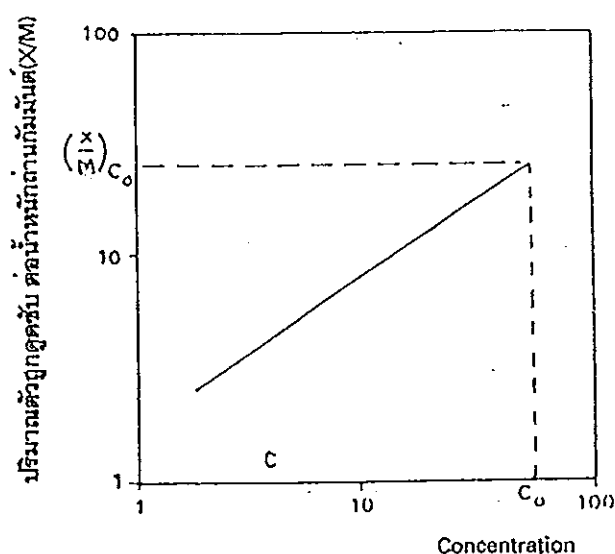
## 1.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity)

การหาความสามารถในการดูดซับของถ่านเป็นการหาค่าไอโซเทิร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อคัดเลือกถ่านที่มีความเหมาะสมสำหรับดูดซับมลสารในน้ำ

ไอโซเทอริมการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก หรือ จำนวนโมลของสารที่ถูกดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ยังคงเหลืออยู่ ที่จุดสมดุลของการดูดซับ (Schuliger, 1978) ความสัมพันธ์ดังกล่าวเมื่อนำไปพลอตบนกระดาษกราฟลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่เป็นแกนนอน และปริมาณของสารดูดซับอยู่ในแกนตั้ง เส้นที่ลากผ่านจุดที่พลอตได้ คือ เส้นไอโซเทอริมการดูดซับ สามารถอธิบายได้ดังสมการของ Freundlich (Wagner and Jula, 1981) ดังนี้

$$X/M = KC^{1/n} \quad \text{หรือ} \quad \log X/M = \log K + (1/n) \log C$$

เมื่อ X	คือ	ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ
M	คือ	น้ำหนักของถ่าน
C	คือ	ความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่
K, n	คือ	ค่าคงที่



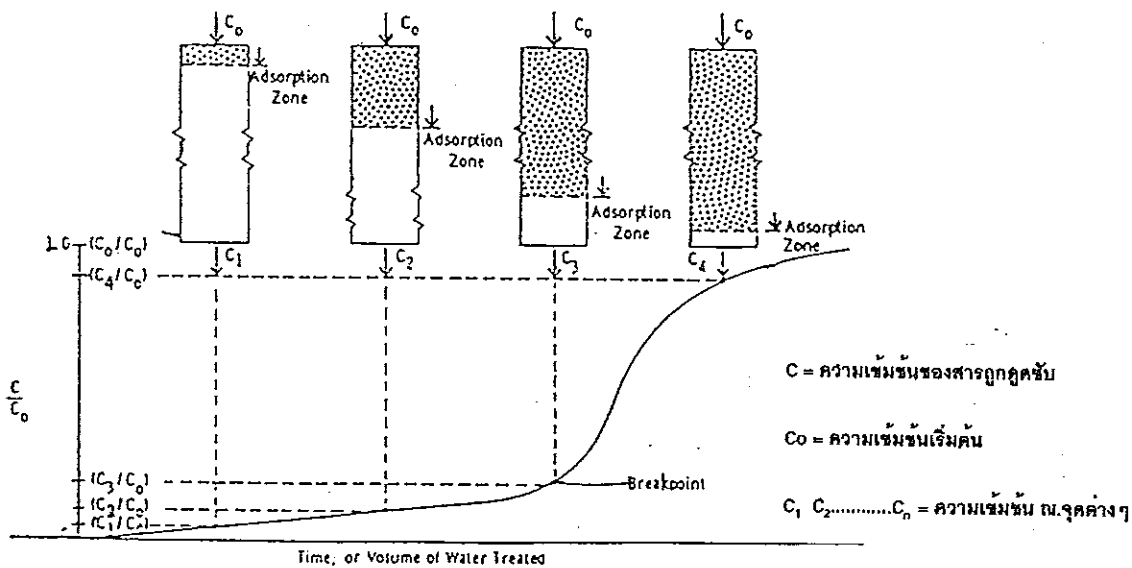
ภาพประกอบ 1 ลักษณะเส้นไอโซเทอริมการดูดซับ ในเฟสของเหลว  
ที่มา Schuliger (1978)

ลักษณะของเส้นกราฟไอโซเทอริม แสดงดังภาพประกอบ 1 ค่าคงที่ K จากสมการของ Freundlich บอกถึงความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ และ  $1/n$  เป็นค่าความชันที่ได้จาก

สมการเส้นตรง ซึ่งสามารถบอกถึงความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับได้ โดยหากมีค่า  $1/n$  ต่ำ จะให้พันธะของการดูดซับค่อนข้างแข็งแรง มากกว่าค่าที่มี  $1/n$  สูง (Snoeyink, 1990) กรณีเส้นไอโซเทอรั่มการดูดซับมีค่าความชันสูง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารที่ต้องการดูดซับมีความเข้มข้นสูง (Ford, 1978) โดยทั่วไปถ่านที่มีเส้นไอโซเทอรั่มการดูดซับที่ชันมาก หรืออยู่เหนือเส้นอื่น จะมีประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่า (เสริมพล รัตสุข, 2524)

1.8 การศึกษาอายุการใช้งานของถ่าน และศึกษาค่าคงที่

สำหรับการออกแบบระบบดูดซับด้วยถ่าน การศึกษาในขั้นนี้กระทำโดยผ่านน้ำที่ต้องการทดสอบเข้าสู่ท่อซึ่งบรรจุถ่านกัมมันต์อย่างต่อเนื่อง เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นถ่าน เม็ดถ่านชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพในการดูดซับก่อน และค่อยๆ หมดประสิทธิภาพลงไปจนถึงถ่านชั้นล่าง (ดังภาพประกอบ 2 ) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นถ่านแล้ว ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับปริมาตรที่ใช้ เรียกว่า Breakthrough Curve ซึ่งจะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการใช้งานของถ่าน ที่จะค่อยๆ ลดลงตามเวลา หรือปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านชั้นถ่านนั้น (Weber, 1981)



ภาพประกอบ 2 แสดง Breakthrough Curve ของการทดสอบแบบคอลัมน์  
 ที่มา Weber (1981)

## 2. สารหนู

### 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของสารหนู

สารหนู (Arsenic: As) เป็นธาตุที่มีสมบัติจัดอยู่ในประเภทธาตุกึ่งโลหะ มีน้ำหนักอะตอม 74.92 สีเงินแกมเทา มีมวลล้ามีวค่อนข้างเปราะ ความหนาแน่น 5.727 จุดหลอมเหลวที่ 817 องศาเซลเซียส จุดระเหิดที่ 613 องศาเซลเซียส (Eisler, 1994) สามารถเกิดเลขออกซิเดชันเป็น -3 0 +3 และ +5 โดยทั่วไปจะพบอยู่ในวาเลนซ์ +3 และ +5 ในรูปสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ (Sorg and Logsdon, 1978) ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ เป็นรูปที่มีความเป็นพิษสูงกว่าสารประกอบอินทรีย์ และสารหนูอนินทรีย์วาเลนซ์ 3 จะมีความเป็นพิษสูงกว่าสารหนูวาเลนซ์ 5 โดยที่ทั้งสองวาเลนซ์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปมาซึ่งกันและกันได้ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเกิดอยู่ในรูปของก๊าซอาร์ซีน

ก. สารหนูวาเลนซ์ 3 (Arsenite) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ  $\text{AsO}_3^{3-}$  และเป็นสารอนุพันธ์ของ arsenious acid ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน และอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น  $\text{Cu}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)(\text{AsO}_3)$  เป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง  $\text{CuHAsO}_3$  ใช้ในการผลิตสี เป็นต้น

ข. สารหนูวาเลนซ์ 5 (Arsenate) มีสูตรโมเลกุลที่มีประจุลบ คือ  $\text{AsO}_4^{3-}$  และเป็นสารอนุพันธ์ของ orthoarsenic acid ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) และมักอยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ เช่น  $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$  และ  $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$  เป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง

ค. ก๊าซอาร์ซีน (Arsine) มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{AsH}_3$  เป็นก๊าซไม่มีสี แต่มีกลิ่นฉุนคล้ายกระเทียม ระเหยง่าย มีความเป็นพิษสูง เกิดการสะสมได้ในตับ กระจก และ ผิวหนัง หากได้รับในปริมาณสูงจะเกิดการสะสมในเส้นผม และเล็บ ในกรณีได้รับพิษนานเกิน 1 ถึง 2 ชั่วโมงอาจทำให้เสียชีวิตได้ทันที (Weaver, 1987)

### 2.2 ชนิดของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ

สำหรับสารหนูที่พบในธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแร่ เช่น แร่อาร์ซีนไฟโรไรต์ (Arsenopyrite) แร่อาร์ซีนไลต์ (Arsenolite) เป็นต้น แร่ดังกล่าวซึ่งมีสารหนูเป็นองค์ประกอบ ได้แสดงไว้ในตาราง 1

ตาราง 1 ชนิดของแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ

ชนิดของแร่	สูตรโมเลกุล
Arsenargentite	$Ag_3As$
Chloanthite	$(Ni,Co)As_{3-x}$
Domeykite	$(Cu_3As)$
Loellingite	$FeAs_2$
Niccolite	$NiAs$
Safflorite	$(Co,Fe)As_2$
Sperrylite	$PtAs_2$
Skutterudite	$(Co,Ni)As_3$
Orpiment	$As_2S_3$
Realgar	$AsS$
Arsenopyrite	$FeAsS$
Cobaltite	$CoAsS$
Enargite	$Cu_3AsS_4$
Tennantite	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$
Pearceite	$Ag_{16}As_2S_{11}$
Proustite	$Ag_3AsS_3$
Gersdorffite	$NiAsS$
Glaucodote	$(Co,Fe)AsS$
Arsenolite	$As_2O_3$
Adamite	$Zn_2AsO_4OH$
Olivenite	$Cu_2AsO_4OH$
Scorodite	$(Fe,Al)(AsO_4)2H_2O$
Pharmacosiderite	$Fe_3(AsO_4)_2(OH)_3$

### 2.3 การใช้ประโยชน์ของสารหนู และสารประกอบของสารหนู

โดยปกติสารหนูที่อยู่ในรูปอิสระ จะพบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในรูปสารประกอบของสารหนู ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมี โดยที่สารหนู และสารประกอบของสารหนู นิยมใช้กันมากในด้านต่างๆ เช่น ทางการเกษตร อุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 การใช้ประโยชน์ของสารหนู และสารประกอบของสารหนู

แนวทาง	การใช้ประโยชน์
ด้านการเกษตร	ยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง สารรักษาเนื้อไม้ และเนื้อดิน
ด้านปศุสัตว์	สารช่วยป้องกันโรค เช่น โรคพยาธิหัวใจ (canine heartworm) และโรคบิดในสุกร (swine dysentery)
ด้านยารักษาโรค	เป็นส่วนผสมในยาปฏิชีวนะ *
ด้านอิเล็กทรอนิกส์	ประยุกต์ใช้ในเซมิคอนดักเตอร์ ไดโอดเรืองแสง
ด้านอุตสาหกรรม	ผลิตตัวเร่งเคมี (Catalysts) สีกันเชื้อรา สีย้อมผ้า เครื่องแก้ว และสบู่ เป็นต้น
ด้านการแพทย์	โลหะอัลลอยด์ในการผ่าตัด

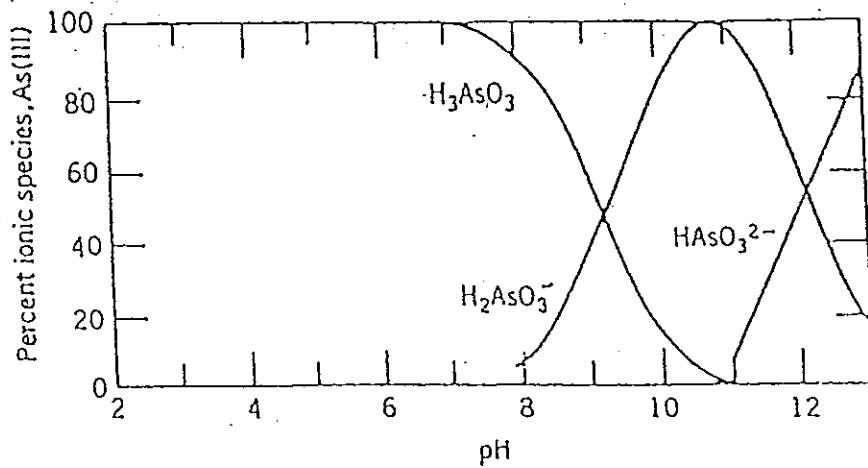
หมายเหตุ \* สารหนูยังเป็นส่วนผสมในยารักษาโรค ในประเทศกำลังพัฒนา  
ที่มา Azcue and Nriagu (1994)

จากการใช้ปริมาณสารหนู และสารประกอบของสารหนูข้างต้น รวมไปถึงการทำเหมือง การแต่งแร่ การร่อนและล้างแร่ ซึ่งแร่ต่างๆ เหล่านี้มีสารหนูเป็นองค์ประกอบร่วมด้วย จึงเกิดการสลายตัวและฟุ้งกระจาย ประกอบกับมีทางน้ำไหลผ่านบริเวณนี้ ส่งผลให้มีการเพิ่มระดับการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในดิน และน้ำ ดังเช่น ใน Western Montana นั้น น้ำในแม่น้ำ Clark Fork ซึ่งเป็นแหล่งน้ำผิวดินได้ถูกปนเปื้อนจาก สารหนู ทองแดง สังกะสี และอื่นๆ จากดินตะกอน จึงส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำบาดาลด้วย เนื่องจากอยู่ในสภาวะที่มีซัลไฟด์ จึงทำให้โลหะหนักในดินตะกอน ถูกชะล้างไปสู่ระบบน้ำบาดาลได้ (Moore, et al., 1988) ซึ่งกรณีเช่นนี้ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์ และสัตว์ในบริเวณนั้น

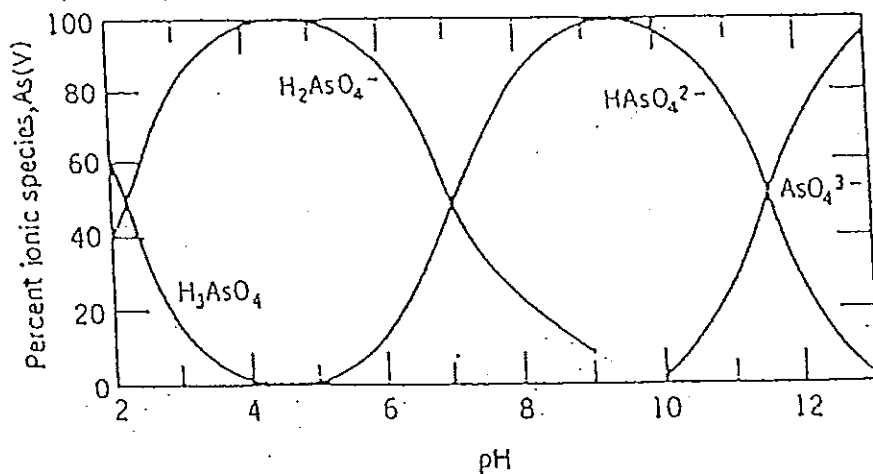


## 2.4 การแพร่กระจายของสารหนูในน้ำธรรมชาติ

รูปแบบของสารหนูที่สามารถเกิดขึ้น ได้แก่ วาเลนซี -3 0 +3 และ +5 แต่ในน้ำธรรมชาติจะพบสารหนูวาเลนซี +3 และ +5 มากที่สุดโดยสารหนูวาเลนซี 3 จะพบมากในน้ำที่มีออกซิเจนน้อยหรือไม่มีเลย และสารหนูวาเลนซี 5 จะมีอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายอยู่ (Gupta and Chen, 1978), (Sorg and Logsdon, 1978) ซึ่งสารหนูอยู่ในวาเลนซีใดขึ้นอยู่กับค่าไอเอช และพีเอช ดังที่จะกล่าวต่อไป

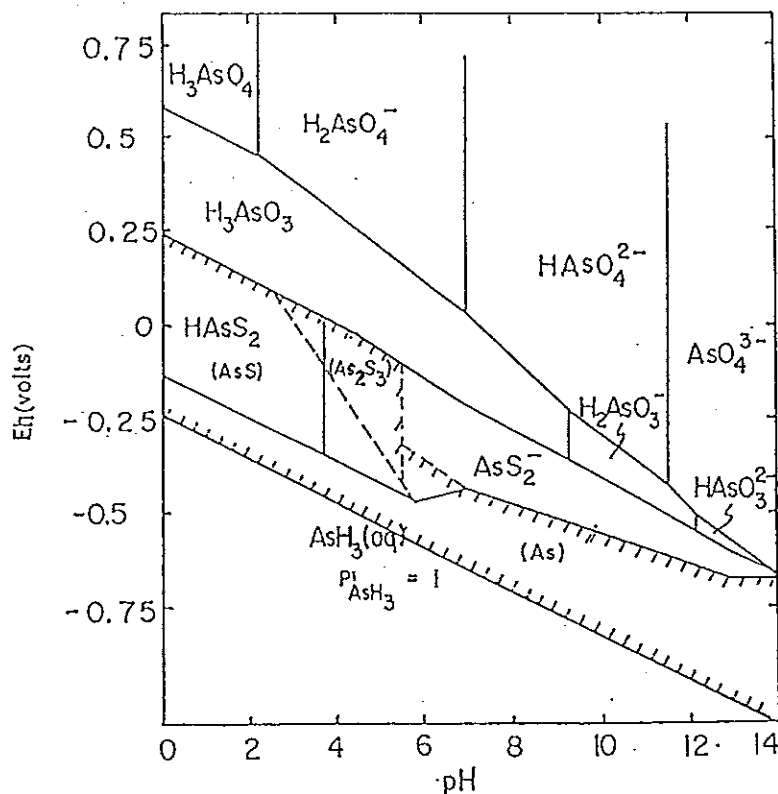


ภาพประกอบ 3 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 3 กับค่าพีเอช  
ที่มา Gupta and Chen (1978)



ภาพประกอบ 4 การแพร่กระจายของแต่ละสปีชีส์ของสารหนูวาเลนซี 5 กับค่าพีเอช  
ที่มา Gupta and Chen (1978)

จากภาพประกอบ 3 และ 4 แสดงรูปแบบของสารหนูที่มีวาเลนซ์ 3 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าวาเลนซ์ 5 มีช่วงพีเอชตั้งแต่ 3 ขึ้นไปที่สามารถแตกตัวได้อยู่ในรูปแบบของสารประกอบต่างๆ สำหรับวาเลนซ์ 3 พบว่าที่พีเอชเป็นกรดสามารถแตกตัวได้น้อย และจะอยู่ในรูปของ  $H_3AsO_3$  มากกว่าในรูปอื่นๆ โดยทั่วไปสารหนูในน้ำจะอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ ได้แก่ กรดเมธิลอาร์โซนิค (Methyarsonic acid) และกรดไดเมธิลอาร์ซีนิก (Dimethylarsenic) แต่มีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าในรูปสารประกอบอนินทรีย์พวกอาร์ซีนีไนด์ และอาร์ซีนีเนท (WHO, 1981) สารประกอบอาร์ซีนีเนทสามารถละลายได้ดีในน้ำที่มีพีเอชต่ำ และจะตกตะกอนในช่วงพีเอชที่สูงขึ้น จนถึงพีเอชที่เป็นด่าง โดยเกิดการดูดซับกับสารประกอบของเหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี (Willson and Hawkin, 1987) สารหนูจะอยู่ในรูปของสารประกอบใดขึ้นกับ สภาพพีเอช (pH) และค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh) ดังแสดงในภาพประกอบ 5



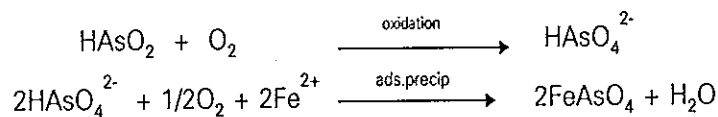
ภาพประกอบ 5 ไดอะแกรม Eh-pH ของสารหนูที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และ

ความดัน 1 บรรยากาศ

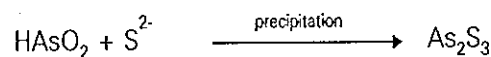
ที่มา

Ferguson and Gavis (1972)

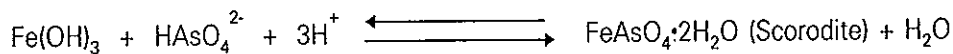
จากภาพประกอบ 5 ในน้ำที่มีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง สารหนูวาเลนซี 5 จะอยู่ในรูปสารประกอบของ  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HASO}_4^{2-}$  และ  $\text{AsO}_4^{3-}$  (Dickerson, 1980) เนื่องจากอยู่ในสภาวะมีออกซิเจน จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้น โดยสารประกอบอาร์ซีเนทสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ แต่ถ้าในแหล่งน้ำมีโลหะพวกเหล็ก หรืออลูมิเนียม ก็สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะเหล่านี้ ดังสมการ



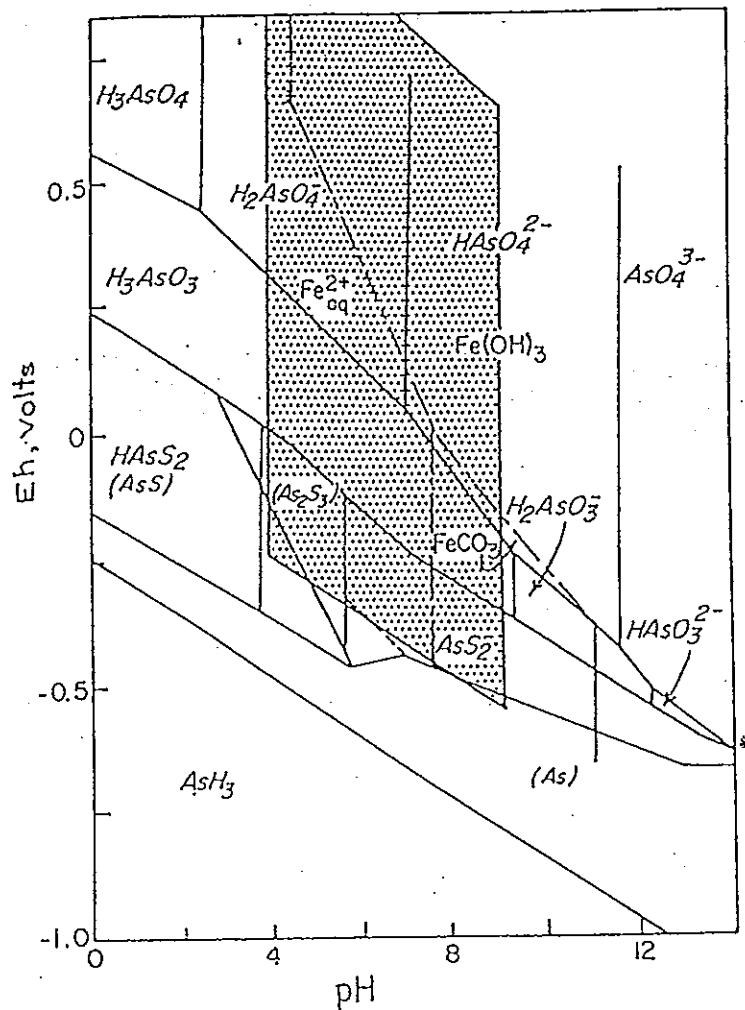
บางส่วนที่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน สามารถเคลื่อนตัวไปสู่ชั้นน้ำที่ไม่มีออกซิเจน (hypolimnion) ดังนั้นสารประกอบอาร์ซีเนท สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารประกอบอาร์ซีไนต์ พบอยู่ในรูปสารประกอบของ  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$  และ  $\text{HASO}_3^{2-}$  ซึ่งมีความเสถียรเมื่อถูกรีดิวซ์ให้ค่าอีเอชลดลง หากในน้ำมีปริมาณซัลไฟด์เพียงพอ และมีค่าอีเอช และพีเอชเหมาะสม ก็จะตกตะกอนในรูป  $\text{As}_2\text{S}_3$  ดังสมการ



นอกจากการทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ในน้ำแล้ว สารหนูสามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กในธรรมชาติเกิดสารประกอบที่ค่อนข้างเสถียร ดังภาพประกอบ 6 ซึ่งพบว่าภายใต้สภาวะพีเอชช่วง 4 ถึง 8.5 และค่าอีเอช ช่วง 0.5 ถึง 0.75 สารหนูจะอยู่ในรูป  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HASO}_4^{2-}$  และ  $\text{AsO}_4^{3-}$  ในสภาวะที่มีออกซิเจนสำหรับ  $\text{HASO}_4^{2-}$  นั้นมีสภาวะของค่าอีเอช และพีเอช ระดับเดียวกับไฮดรอกไซด์ของเหล็ก (Mok, et al., 1994) จึงสามารถทำปฏิกิริยา และตกตะกอนได้ดังสมการ

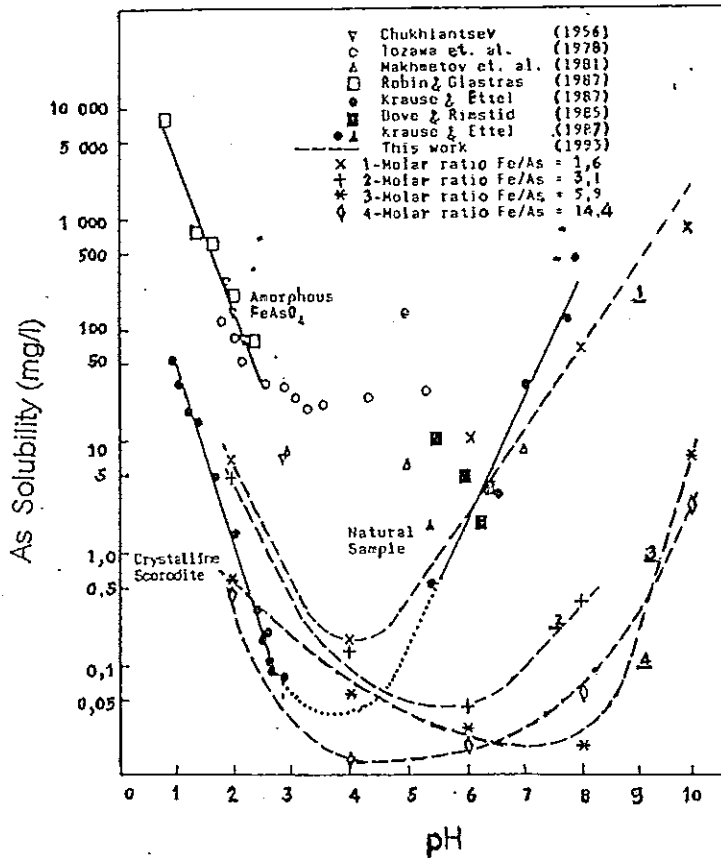


ปฏิกิริยาการเกิด Scorodite ดังกล่าวสามารถเกิดได้ดีในช่วงที่มีความเป็นด่างเล็กน้อยหรือเกิดขึ้นได้น้อยในสภาวะธรรมชาติ อย่างไรก็ตามสารหนูในรูปวาเลนซี 3 เช่น  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  สามารถเกิดปฏิกิริยากับเหล็ก ซึ่งอยู่ในรูป  $\text{Fe}^{2+}$  ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายต่ำ มีค่าพีเอช และอีเอชในระดับเดียวกัน แต่สารหนูวาเลนซี 5 สามารถตกตะกอนร่วมกับ  $\text{Fe(OH)}_3$  ได้มากกว่าวาเลนซี 3 จึงส่งผลให้การแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นสารหนูวาเลนซี 3 เป็นส่วนใหญ่ (Pierce and Moor, 1980)



ภาพประกอบ 6 แสดง Eh-pH ไดอะแกรมในแต่ละสปีชีส์ของสารหนู และเหล็ก  
ที่มาจาก Ferguson and Gavis (1972)

Edita, et al. (1995) ศึกษาการละลายของตะกอนที่ได้จากสารหนู และสารประกอบเพอริก  
อาร์ซีเนท ที่พีเอช ในช่วง 2 ถึง 10 และจำกัดอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กต่อสารหนู  
พบว่า ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส มีค่าคงที่ของการละลาย ( $K_{sp}$ ) เท่ากับ  $10^{-24.45}$  และได้ทำการ  
เปรียบเทียบการละลายของสารหนูจากตะกอนของเพอริกอาร์ซีเนท ดังภาพประกอบ 7 พบว่าค่า  
การละลายของสารหนู มีค่าน้อยมากในช่วงสภาวะพีเอชที่ 3 ถึง 8 และจะมีค่าการละลายที่สูงขึ้น  
ในสภาวะที่เป็นกรด หรือต่างอย่างรุนแรง ดังนั้นสารประกอบสารหนูในรูปของตะกอน Fe-As มี  
ความเสถียรในสภาวะพีเอชตามธรรมชาติ จึงสามารถถูกบำบัด โดยการฝังกลบที่ถูกต้องได้อย่าง  
ปลอดภัย เนื่องจากมีการละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยมาก



ภาพประกอบ 7 การละลายของตะกอนเฟอร์ริกอาร์ซีเนท และ Scorodite กับค่าพีเอช  
ที่มา Vircikova, et al. (1995)

Papassiopi, et al. (1996) ทำการทดลองในการหาความคงตัวของตะกอน เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลของเหล็กต่อสารหนู พบว่าที่อัตราส่วนมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ตะกอนในรูปเฟอร์ริกอาร์ซีเนทจะมีความเสถียรสูง และสามารถทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Krause and Eitel (1989) ที่ได้เคยศึกษาความสามารถในการละลายของสารหนูในรูปเฟอร์ริกอาร์ซีเนท โดยพบว่าถ้าอัตราส่วนระหว่างมวลโมเลกุลเหล็กต่อสารหนูเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การละลายของสารหนูลดลง และที่อัตราส่วนมวลโมเลกุล เท่ากับ 8 เฟอร์ริกอาร์ซีเนทจะมีอัตราการละลายต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชช่วง 3 ถึง 8 และอัตราการละลายจะไม่เพิ่มขึ้นในระยะเวลา 2 ถึง 3.7 ปี

จากปัญหาโรคพิษสารหนู ที่เกิดขึ้นที่ อำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ในปี พ.ศ.2530 นั้นได้มีการติดตามตรวจสอบ และเฝ้าระวังการปนเปื้อนของสารหนูในพื้นที่ดังกล่าวอยู่เรื่อยๆ มาเสมอ ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำ และตะกอนธาณน้ำในปี พ.ศ. 2535 ถึง พ.ศ. 2538

พบว่าบริเวณต้นน้ำบนเขา และแหล่งแร่ มีค่าสารหนูปนเปื้อนอยู่ในช่วง 0.08 ถึง 0.76 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานแหล่งน้ำผิวดิน และเมื่อไหลผ่านที่ราบลุ่มที่เคยเป็นพื้นที่ทำเหมืองแร่ เรือขุด จะมีสารหนูเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1.08 ถึง 1.43 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีค่าลดลงเท่าเกณฑ์มาตรฐาน จนตรวจหาไม่พบในพื้นที่ห่างไกลออกไป สำหรับแหล่งน้ำใต้ดิน จะมีระดับการปนเปื้อนของสารหนูสูงตั้งแต่ 0.05 ถึง 5.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้ปริมาณสารหนูในน้ำเป็นตัวชี้วัดคุณภาพน้ำ โดยทั่วไปได้มีการกำหนดมาตรฐานของแหล่งน้ำแต่ละประเภท เพื่อให้เป็นที่ยอมรับได้ ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ค่ามาตรฐานของสารหนูที่ยอมรับได้ในน้ำประเภทต่าง ๆ

ประเภท	ค่ามาตรฐานสารหนู (มก./ล)	หน่วยงานที่กำหนด	ปีที่กำหนด
น้ำดื่ม	0.01	องค์การอนามัยโลก *	2537
แหล่งน้ำผิวดิน	0.01	กรมควบคุมมลพิษ **	2535
แหล่งน้ำบาดาล	0.05	กรมทรัพยากรธรณี ***	2521

ที่มา : \* WHO (1996)

\*\* กรมควบคุมมลพิษ (2538)

\*\*\* กรมทรัพยากรธรณี (2541)

นอกจากแหล่งน้ำชนิดต่างๆ แล้วที่มีสารหนูปนเปื้อน ยังพบว่าพืชผัก ผลไม้ และเนื้อสัตว์มีค่าสารหนูเกินมาตรฐานบางอย่างในพื้นที่ที่มีระดับสารหนูสูง (จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ, 2535) และในปี พ.ศ. 2539 ตริรัตน์ ทองบริบูรณ์ ได้ทำการศึกษาการปนเปื้อนของสารหนูในพืชน้ำและสัตว์น้ำ บริเวณตำบลอ่อนพิบูลย์ ถึงลุ่มน้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่าสารหนูในพืชน้ำมีค่าระหว่าง 0.23 ถึง 2.97 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก โดยพืชน้ำที่พบสารหนูสูงสุดคือ ผักตบชวา ส่วนปริมาณสารหนูในสัตว์น้ำมีค่าระหว่าง ตรวจไม่พบถึง 2.45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม น้ำหนักเปียก โดยพบสูงสุดในหอยขม นอกจากนี้ผลการศึกษา พบว่าผักตบชวา และหอยขม มีปริมาณสารหนูสัมพันธ์ กับปริมาณสารหนูในน้ำ และดินตะกอน

จากการศึกษาข้างต้นนี้ พบว่ามีปริมาณสารหนูค่อนข้างสูงทั้งในพืช และสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ซึ่งหากมีการบริโภคบ่อยๆ เป็นประจำ จะก่อให้เกิดการสะสมปริมาณสารหนูในเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกาย โดยพบว่าจะมีการสะสมมากที่สุดที่ตับ ไขกระดูก และปอด ตาม

ลำดับ (Liebscher and Smith, 1968) ทั้งนี้เนื่องจากในเนื้อเยื่อเหล่านี้มีเคราติน(Keratin)มาก ไตรวาเลนท์อาร์ซีนิก จะจับกับหมู่ซัลไฟดริล(Sulfhydryl Group) และถูกทำให้เข้มข้นขึ้นในเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดลิวโคไซด์ (สุโขทัยธรรมมาธิราชมหาวิทยาลัย, 2538) แต่โดยปกติร่างกายสามารถขับสารหนูออกมากับปัสสาวะ ซึ่งจะอยู่ในรูป dimethylarsenic acid ประมาณ 65% และ methylarsonic acid ประมาณ 20% (กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2530)

## 2.5 ความเป็นพิษ (Toxicity)

สารหนูเมื่อเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางใด จะเกิดการสะสม และหากมีปริมาณมากพอ จะส่งผลให้เกิดอาการต่างๆ ของการเกิดพิษ ซึ่งมีอาการอยู่ 2 แบบ คือ อาการเฉียบพลัน (Acute Poisoning) และอาการเรื้อรัง (Chronic Poisoning) ดังนี้

1. อาการเฉียบพลัน เกิดจากการรับสารหนูในปริมาณมากๆ ในคราวเดียว ซึ่งจะพบอาการตามระบบต่างๆ เกือบทุกระบบ อาการที่เกิด ได้แก่ การสับสนในคอ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ไอ เจ็บหน้าอก และหายใจลำบาก ซึ่งजरต้นเบา มีความดันเลือดต่ำ แขนขาไม่มีแรง มีภาวะโลหิตจาง และเม็ดเลือดขาวต่ำ ชัก หหมดสติ และอาจถึงตายได้

2. อาการพิษเรื้อรัง เกิดเมื่อได้รับสารหนูสะสมจนมีปริมาณมากพอ อาการทั่วไปเกิดอาการอ่อนเพลีย ปวดเมื่อย ปวดท้อง และสีผิวเข้มขึ้น เป็นจุดสีน้ำตาลปนดำ หรือจุดสีขาวตามลำตัว มีตุ่มแข็งเล็กๆ เหมือนหูดตามฝ่ามือ ฝ่าเท้าหรือลำตัว และอาจกลายเป็นมะเร็งผิวหนังจนถึงมะเร็งในปอดได้ในที่สุด

## 3. วิธีการลดปริมาณสารหนูในน้ำ

การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสามารถทำได้หลายวิธี สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป ดังเช่น

### 3.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอนร่วม (Coagulation and Co- Precipitation)

กระบวนการนี้เป็นวิธีการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกัน เกิดการจับตัวเป็นก้อน และตกตะกอนจมลง โดยวิธีนี้สามารถกำจัดสารหนูซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ ด้วยการใช้เกลือของสารประกอบของอะลูมิเนียม หรือเหล็ก สารหนูจะสร้างแรงยึดเหนี่ยวกับอนุภาคของสารประกอบดังกล่าว แล้วเกิดการตกตะกอนร่วม โดยดูดซับประจุไว้ที่ผิว หรือเกิดการทำปฏิกิริยา และตกตะกอนโดยตรง (Jekel, 1994)

จากการศึกษาของ Hering, et al. (1997) ทำการลดปริมาณสารหนูในน้ำดื่ม ด้วย สารส้ม และเฟอริกคลอไรด์ โดยสามารถกำจัดสารหนูในน้ำดื่มจากความเข้มข้นที่ 20 ไมโครกรัม ต่อลิตร ให้ลดลงเหลือน้อยกว่า 2 ไมโครกรัมต่อลิตร ในสภาวะพีเอชเป็นกลาง และพบว่าสาร อินทรีย์ในธรรมชาติที่พีเอช 4 ถึง 9 รวมถึงอิออนของซัลเฟตที่ช่วงพีเอช 4 ถึง 5 จะลด ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูวาเลนซี 3

นิภา มหารัชพงษ์ (2540) ทำการศึกษาการลดความเข้มข้นของสารหนู ด้วยกระบวนการ โคแอกกูเลชัน และ กระบวนการดูดซับ สามารถลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำป๊อที่ 3.72 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้เฟอริกคลอไรด์ในกระบวนการโคแอกกูเลชันในอัตราส่วนระหว่างมวล โมเลกุลสารหนูและเหล็กที่ 1 ต่อ 4 ที่พีเอช 6.5-6.8 พบว่าเหลือปริมาณสารหนูในน้ำ 0.24 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นกรองผ่านถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็ก พบว่าให้ความเข้มข้นที่เหลือน้อยกว่าค่ามาตรฐานน้ำ ดื่มที่องค์การอนามัยโลกกำหนดได้ ( $< 0.01$  มิลลิกรัม ต่อลิตร)

### 3.2 กระบวนการดูดซับสารหนู

การกำจัดสารหนูด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งที่พีเอชระหว่าง 3-6 สารหนูจะอยู่ในรูป วาเลนซี 5 ( $H_2AsO_4^-$ ) มากที่สุด จึงถูกกำจัดได้ง่าย สำหรับสารหนูวาเลนซี 3 จะอยู่ในรูป  $H_3AsO_3$  ในช่วงพีเอช 0-9 ซึ่งสัมพันธ์กับการอธิบายของ Huang and Fu(1984) ว่า Monovalent Ions จะ สามารถจับกับ Oxo-Functional Groups บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ รวมไปถึง Nonionic, Divalent และ Trivalent Ions ด้วย ส่วนสารหนูวาเลนซี 5 จะถูกดูดซับด้วยโมเลกุลที่มีประจุบวกบนผิวของ ถ่านกัมมันต์ หรือที่มีประจุเป็นกลาง สำหรับสารหนูวาเลนซี 3 จะถูกดูดซับด้วยพื้นผิวที่มีประจุเป็น กลาง หรือที่มีประจุบวกหรือลบเล็กน้อย

โดยทั่วไปการเกาะติดที่ผิวในระบบประปาจะเป็นกระบวนการทางกายภาพ เพราะ โมเลกุลของสารถูกดูดให้เกาะบนผิวของของแข็งโดยแรงทางกายภาพ และอาจมีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ร่วมด้วย การดูดซับบนพื้นผิวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่งในการกำจัดคาร์บอนใน น้ำหลังจากมีการตกตะกอน และการกรองแบบธรรมดาแล้ว (Metcalf and Eddy, 1991)

Huang and Fu (1984) พบว่า การกำจัดสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยการดูดซับของถ่าน กัมมันต์ขึ้นกับ ค่าพีเอช ชนิดของถ่านกัมมันต์ และความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น ซึ่งการดูดซับ สารหนูวาเลนซี 5 จะเกิดได้ดีที่สุดที่พีเอช 4 ถึง 5 นอกจากนี้ยังพบว่าสารหนูวาเลนซี 5 สามารถ



ตาราง 4 แสดงการลดปริมาณสารหนู ด้วยวิธีการดูดซับ

สปีชีส์ สารหนู	Adsorbent	ปริมาณ สารหนู (mg/l)	ประสิทธิภาพ การบำบัด (%)	พีเอช	เอกสารอ้างอิง
As(III)	AC	100	0	8.0	Rajakovic and Mitrovic, 1992
	AC + Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		2.25	8.0	
	AC + CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O		3.83	8.0	
As(V)	AC	100	20.30	8.0	Rajakovic and Mitrovic, 1992
	AC + Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		2.25	8.0	
	AC + CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O		17.29	8.0	
As(V)	AC	0.96	96.5	3.1	Gupta and Chen, 1978
		1.90	92.4	3.1	
		2.60	83.5	3.2	
As(V)	AC + Cu(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	7.5	80	5.5-6.5	Huang and Vane, 1989
	AC + Ba(ClO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>		20	4.0-10.0	
	AC + Fe(ClO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		50	2.5-3.5	
	AC + FeSO <sub>4</sub>		>90	3.0-4.0	
As(III)	Coral + Fe(OH) <sub>3</sub>	1.0	>75	3.0-10.0	Maeda <i>et al.</i> , 1992
		5.0	40	4.0-10.0	
As(V)	Coral + Fe(OH) <sub>3</sub>	1.0	>80	2.0-10.0	Maeda <i>et al.</i> , 1992
As(III)	Sand + Fe(OH) <sub>3</sub>	1.0	75	7.5-7.8	Joshi and Chaudhuri, 1996
As(V)	Sand + Fe(OH) <sub>3</sub>	1.0	80	7.5-7.8	Joshi and Chaudhuri, 1996
As(V)	AC + Fe(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	7.5	>85	4.0	Huang and Fu, 1984
	AC + Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>		30		
	AC + MgSO <sub>4</sub>		10		
	AC + Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>		>80		

หมายเหตุ AC เท่ากับ Activated Carbon

ถูกดึงให้ออกจากถ่านกัมมันต์ได้ด้วยกรดแก่ สำหรับเบสแก่ สามารถดึงสารหนูออกจากถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของเหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) อยู่

Huang and Vane (1989) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Ba^{3+}$  พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ  $Fe^{2+}$  จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้มากกว่า 90 % ซึ่งสูงกว่าโลหะชนิดอื่น ๆ ที่พีเอช 4 โดยขึ้นกับความเข้มข้นของสารประกอบเหล็ก พีเอช และ ความเข้มข้นของสารหนู หลังจากนั้นได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยเปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ กับถ่านกัมมันต์ที่มีประจุของ  $Ag^+$  และ  $Cu^{2+}$  ปรากฏว่าที่พีเอช 8 ถ่านที่มีประจุ  $Cu^{2+}$  จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ดีกว่า  $Ag^+$  และถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีประจุ ตามลำดับ (Rajakovic and Mitrovic, 1992)

ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาเป็นตัวดูดซับ เพื่อใช้ในงานลดปริมาณสารหนู โดยมีการศึกษาวิจัย เพื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับ

Maeda, et al. (1992) ได้ใช้หินปะการังที่มี  $Fe(OH)_3$  ในการดูดซับสารหนู พบว่ามีประสิทธิภาพในการลดสารหนูวาเลนซี 5 มากกว่าสารหนูที่มีวาเลนซี 3 และเกิดได้ดีในช่วงพีเอช 3-10 ซึ่งสอดคล้องกับ Gupta and Chen (1978) รายงานจาก Inorganic Contaminants Research Committee (1993) ว่าสารประกอบของเหล็ก สามารถลดปริมาณสารหนูได้มากกว่า สารประกอบจากอะลูมิเนียม ในน้ำธรรมชาติจะอยู่ในรูป arsenic acid ( $H_2AsO_4^-$ ) และ arsenious acid ( $H_3AsO_3$ ) ซึ่งจะถูกลดดูดซับได้ดีที่พีเอช 4-7 แต่พบว่า การดูดซับของสารหนูวาเลนซี 5 จะมีประสิทธิภาพมากกว่าสารหนูวาเลนซี 3

Singh, et al. (1988) ศึกษาการดูดซับสารหนู ด้วยฮีมาไทต์(Haematite) พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น 13.34 ไมโครโมลต่อลิตร โดยใช้พีเอช 7 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

Joshi and Chaudhuri (1996) ศึกษาการลดปริมาณสารหนูในน้ำบาดาลด้วยทรายที่เคลือบผิวด้วยเหล็กออกไซด์ ซึ่งได้ทำเครื่องกรองไว้ใช้ในครัวเรือน และสามารถกำจัดสารหนูที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถลดสารหนูได้ในปริมาตรของน้ำประมาณ 600-700 ลิตรต่อ 1 ครั้งของตัวดูดซับ 6 กิโลกรัม โดยให้ความเข้มข้นที่เหลือเท่ากับมาตรฐานน้ำดื่มได้

Wilkie and Hering (1996) ศึกษาการดูดซับของสารหนู ด้วยเฟอริกออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีในธรรมชาติ โดยมีอิออนของแคลเซียม และซัลเฟตร่วมด้วย ปรากฏว่าอิออนของซัลเฟตมีอิทธิพลต่อการดูดซับสารหนู ในช่วงพีเอชที่เป็นกรด ทำให้การดูดซับมีค่าต่ำลง

Tokunaga, et al.(1997) ทำการบำบัดน้ำที่มีสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยสารประกอบของ แลนทานัม โดยใช้กลไกของการดูดซับ เพื่อแลกเปลี่ยนแอนไอออน (anion) โดยทำให้สารหนูที่อยู่ใน รูปของแลนทานัมอาร์ซีเนท ตกตะกอนในช่วงพีเอชที่เป็นกรด และทำการศึกษาค่าจลนศาสตร์ของ การดูดซับ ปรากฏว่าประสิทธิภาพของการใช้แลนทานัมไฮดรอกไซด์ มากกว่า แลนทานัม คาร์บอเนต และเบสิคแลนทานัมคาร์บอเนต ตามลำดับ การบำบัดนี้มีประสิทธิภาพในการลด ความเข้มข้นของสารหนูจาก 0.25 มิลลิโมล ให้ลดลงเหลือน้อยกว่า 0.001 มิลลิโมลในปริมาตร 100 มิลลิลิตร

### 3.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion - Exchange)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยผ่านเรซินซึ่งมีประจุสามารถจับไอออนของสารหนู ได้ แต่เป็นวิธีที่ต้องใช้ต้นทุนสูงในการบำบัด

Hathaway and Rubel (1987) ได้ ทำการทดลองบำบัดสารหนูที่ความเข้มข้น 0.080 ถึง 0.116 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งใช้สารคลอรีนเปลี่ยนวาเลนซีจาก 3 เป็น 5 ก่อนกำจัดด้วย แอ็คติเวตเต้ตอะลูมินา ที่พีเอช 5.5 ปรากฏว่าให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารหนูได้ดีที่ความ เข้มข้นเริ่มต้น 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ตรวจวัดปริมาณสารหนู ที่เหลืออยู่ได้น้อยกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

Kuhlmeier and Sherwood (1996) ทำการลดปริมาณสารหนูซึ่งปนเปื้อนจากยาฆ่าแมลง ลงในน้ำบาดาล โดยใช้การบำบัดหลายวิธี คือ การตกตะกอน การดูดซับ และ การเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันร่วมด้วย พบว่า วิธีการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ 4 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ แอ็คติเวตเต้ตอะลูมินา เฟอร์ริสซัลไฟด์ และการแลกเปลี่ยนไอออน จะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น หากตก ตะกอนโดยผ่านกระบวนการออกซิเดชันก่อน ซึ่งเปรียบเทียบกระบวนการระหว่างผ่าน และไม่ผ่าน การออกซิเดชันจะให้ความแตกต่างของสารหนูที่เหลือในน้ำถึง 150 ไมโครกรัมต่อลิตร

### 3.4 วิธีการอื่น ๆ

นอกเหนือจากวิธีที่กล่าวมา เช่น กระบวนการที่ใช้แผ่นเยื่อเมมเบรน (Membrane Processes) ซึ่งมีทั้งรีเวิร์ส ออสโมซิส(Reverse Osmosis) อิเล็กโทรไดอะไลซิส(Electrodialysis) โดย การแยกระหว่างตัวทำละลาย และตัวถูกละลายออกจากกัน โดยผ่านแผ่นเมมเบรน นั่นคือ สารหนูจะถูกแยกออกจากน้ำ วิธีการนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงในการบำบัด แต่มีต้นทุนที่สูงมาก เช่นกัน (Sorg and Logsdon, 1978)

สำหรับเทคโนโลยีแต่ละประเภทนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกัน ซึ่งการจะเลือกใช้เทคโนโลยีประเภทใด จะต้องพิจารณาต้นทุนที่ใช้ในการลงทุน การดำเนินงาน รวมไปถึงถึงความรู้ ความสามารถในการควบคุมดูแล เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุด (Inorganic Contaminants Research Committee, 1993) ดังนั้นการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ สามารถกำจัดสารหนูได้อย่างมีประสิทธิภาพ และประสิทธิผล โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และมีเหลือมากในท้องถิ่น คือ แกลบ และกะลามะพร้าว ซึ่งผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้เกลือแกง (NaCl) และเฟอริกคลอไรด์( $FeCl_3$ ) โดยมีเหตุผลในการเลือกเกลือแกงเป็นสารกระตุ้น เนื่องจากมีราคาถูก หาซื้อง่ายตามท้องตลาด และเหตุผลในการเลือกเฟอริกคลอไรด์ เนื่องจากการศึกษาจากเอกสารวิจัย พบว่า สารประกอบเหล็กจะมีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นของสารหนูได้สูงสุด และในขั้นตอนของการเผา เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ จะใช้สภาวะที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่เหมาะต่อการเกิดถ่านกัมมันต์ โดยให้ค่าไอโอดีนสูงสุด จากเอกสารการวิจัยเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนู โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุที่เหลือใช้ในท้องถิ่น
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งใช้ในกระบวนการลดปริมาณสารหนูในน้ำ

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้ในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารหนูให้ลดระดับลงเพื่อไม่ก่อให้เกิดอันตราย ในการอุปโภค บริโภค
2. เป็นการนำเอาวัสดุท้องถิ่นที่เหลือใช้ กลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ในด้านการลดปริมาณสารหนู
3. ทราบถึงประสิทธิภาพ หรือความสามารถของถ่านกัมมันต์ เพื่อใช้ในการลดปริมาณสารหนูในน้ำ

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

#### 1. วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย วัสดุดิบที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์ น้ำตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลอง และสารเคมีระดับคุณภาพวิเคราะห์ ดังนี้

##### 1.1 วัสดุดิบทำถ่านกัมมันต์

1.1.1 กะลามะพร้าว ขนาดประมาณ 1x1 เซนติเมตร

1.1.2 แกลบ

##### 1.2 น้ำตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดลอง

1.2.1 น้ำตัวอย่างที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการเคมี

1.2.2 น้ำตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของสารหนู ในเขตอำเภอร่อนพิบูลย์  
จังหวัดนครศรีธรรมราช

##### 1.3 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และการวิเคราะห์ทางเคมีอยู่ในระดับคุณภาพวิเคราะห์ ยกเว้นเฟอริกคลอไรด์ อยู่ในระดับเชิงพาณิชย์ (Commercial Grade)

#### 2. อุปกรณ์

##### 2.1 อุปกรณ์สำหรับการทำถ่านกัมมันต์

- ภาชนะดินเผา พร้อมฝาปิดซึ่งเจาะรูไว้
- เตาเผา (Furnace) ; NEY 2-1350A. The J.M. NEY COMPANY.
- ตู้อบความร้อน (Drying Oven) ; Memmert UE 400 Germany.
- เครื่องบดตัวอย่าง ; Fritsch Pulverisette Germany.
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช.

## 2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- ขวดพลาสติกขนาด 1 ลิตร
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) รุ่นมงคลสุข ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- เครื่องชั่งแบบละเอียด (Analytical Balance) ; Sartorius Model B 3100S Germany
- เครื่องเขย่าขวด (Shaker) ; DS LDB Rotator Model : USR 2800 A
- เครื่องเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge) ; RT 7 Sorvall : DUPONT
- อุปกรณ์เครื่องแก้วที่จำเป็นอื่น ๆ

## 2.3 อุปกรณ์ สำหรับใช้ในแบบทดลองแบบคอลัมน์

- ถังพลาสติกมีฝาปิด ขนาด 120 ลิตร
- คอลัมน์พีวีซี ขนาด  $\varnothing$  3.4 ซม. ยาว 40 ซม.
- เครื่องสูบน้ำ ; ProMinent Fluid Cout type. ALPA 1003 pp 1000 A2

## 2.4 อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ปริมาณสารหนู และเหล็ก

- เครื่องสตริปปีง โพลีโทเนอริโอเมเตอร์ (Stripping Potentiometer) ; TraceLab PSU 22 Radiometer Copenhagen.
- เครื่องอะตอมมิคแอบซอพชั่นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer) ; GBC 902 Australia.
- อุปกรณ์เครื่องแก้วที่จำเป็นอื่น ๆ

## 3. ขอบเขต และวิธีการวิจัย

### 3.1 ขอบเขตการวิจัย

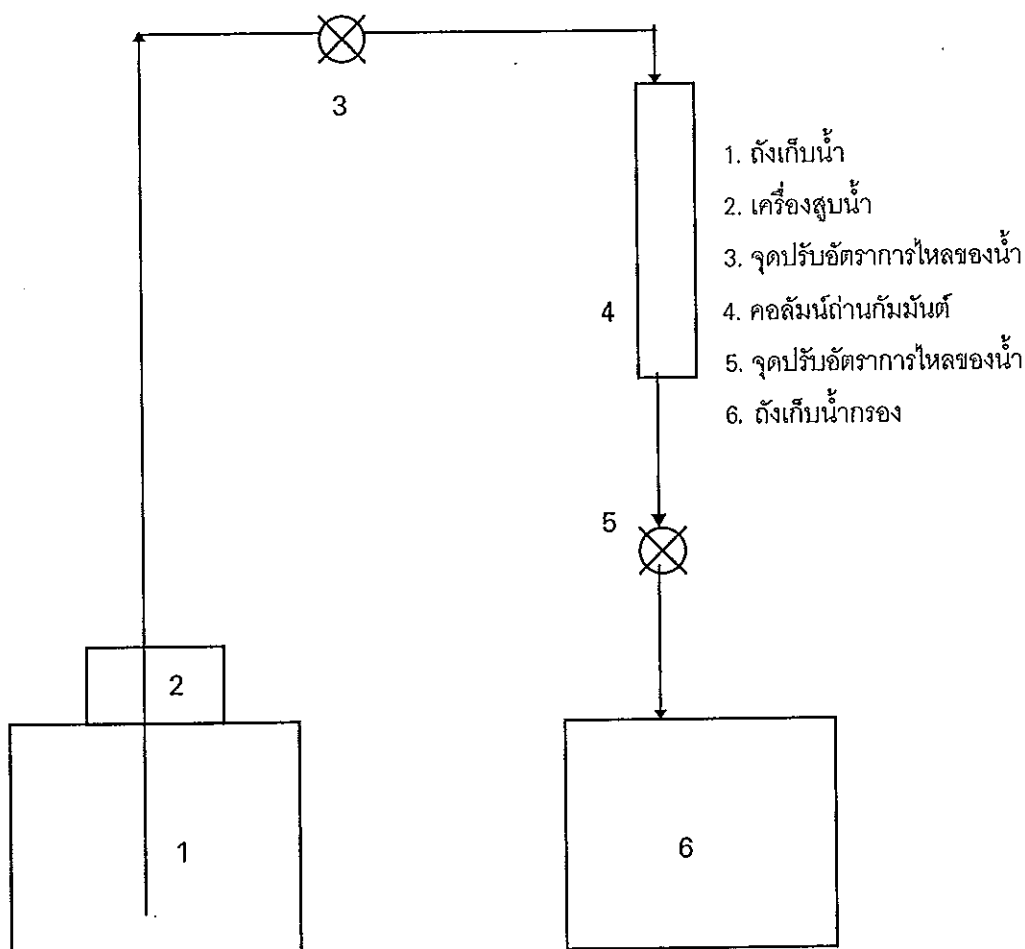
3.1.1 เตรียมถ่านกัมมันต์ จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น เช่น แกลบ และกะลามะพร้าว โดยใช้เกลือแกง (NaCl) และเฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) เป็นสารกระตุ้นในอัตราส่วนต่างๆ ที่เหมาะสม

3.1.2 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาจากค่าไอโอดีน เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบ ต่อสารกระตุ้น เพื่อทำการศึกษาการดูดซับต่อไป

3.1.3 ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูในน้ำ ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการคัดเลือกแล้ว โดยพิจารณาจากการทำไอโซเทอรั่มการดูดซับ(Adsorption Isotherm) และค่าคงที่ที่จำเป็นเพื่อทำการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับสารหนูในน้ำได้มากที่สุด

3.1.4 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่าน จากคอลัมน์เพื่อแสดง Breakthrough Curve โดยพิจารณาความเข้มข้นของสารหนูที่หลงเหลือในน้ำ

3.1.5 ศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ได้มาทดลองใช้กับน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากอำเภอ ร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารหนู



ภาพประกอบ 8 แบบจำลองในการลดปริมาณสารหนูที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

### 3.2 วิธีการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น และทำการคัดเลือกอัตราส่วนที่จะนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ขั้นตอน ที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อหาความสามารถในการดูดซับสารหนูของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ที่ได้จาก ขั้นตอนแรก โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) และการทดสอบแบบต่อเนื่อง (Column Test) สำหรับขั้นตอนที่ 3 เป็นการนำน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากพื้นที่ที่เกิดปัญหาจริง มาทำการ ทดสอบกับถ่านกัมมันต์ที่ได้ ซึ่งรายละเอียดของวิธีการศึกษามีดังนี้

#### 3.2.1 การเตรียม และการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม

3.2.1.1 นำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น คือ แกลบ และกะลามะพร้าว มาแช่ในสารละลายอิมิตัวของเกลือแกง และสารละลายอิมิตัวของเฟอร์ริกคลอไรด์ ประมาณ 1 คืน โดยแยกทำ ครั้งละสารละลาย สำหรับกะลามะพร้าวคั่วให้ได้ขนาดก่อนนำไปแช่สารละลายค้างคืนไว้

3.2.1.2 นำวัตถุดิบที่ได้จากข้อแรกเข้าสู่กระบวนการเผาและผ่านภาวะกระตุ้นที่ อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเผาที่อัตราส่วน 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกง หรือเฟอร์ริกคลอไรด์ ทั้งนี้เป็นการเผาโดยปราศจากก๊าซ ออกซิเจน

3.2.1.3 หลังจากการเผา นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำเดือดหลายๆ ครั้ง และ แช่น้ำค้างคืนไว้ เพื่อล้างสารกระตุ้นที่เหลือจากการเผา โดยสามารถวัดจากพีเอชของน้ำล้างถ่าน ซึ่งมีค่าคงที่จากการวัดในน้ำล้างหลายๆ ครั้ง หลังจากนั้นนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.2.1.4 นำถ่านที่อบแห้งแล้วไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีน เพื่อหาอัตราส่วนที่ เหมาะสม และศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope :SEM ) เพื่อใช้ในการทดลองหาคุณสมบัติของ การดูดซับสารหนูต่อไป

#### 3.2.2 การหาความสามารถในการดูดซับสารหนู

##### 3.2.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

เมื่อได้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว นำมาบดให้ละเอียด จน สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช ได้มากกว่า 95% จากนั้นจึงนำผงถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



### 3.2.2.2 การเตรียมน้ำที่มีการปนเปื้อนสารหนู

เตรียมน้ำตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของสารหนู 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเตรียมน้ำสารหนูวาเลนซี 5 จาก Sodium arsenate ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) และสารหนูวาเลนซี 3 จาก Sodium arsenite ( $\text{NaAsO}_2$ ) ในน้ำกลั่น

ก. เตรียมสารหนูวาเลนซี 3 ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่ง Sodium arsenite 0.173 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรครบ 1 ลิตร หลังจากนั้นลดความเข้มข้นโดยเจือจางสารละลายที่เตรียมได้ให้เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จนกระทั่งเจือจางจนเหลือความเข้มข้นที่ต้องการ

ข. เตรียมสารหนูวาเลนซี 5 ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่ง Sodium arsenate 0.416 กรัม ละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรครบ 1 ลิตร หลังจากนั้นเจือจางจนเหลือความเข้มข้นที่ต้องการ

### 3.2.2.3 อิทธิพลของเวลา ต่อการดูดซับสารหนู

ก. ชั่งผงถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้แล้ว 1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 5 ใบ เติมน้ำตัวอย่างลงใบละ 20 มิลลิลิตร วัดพีเอชของน้ำ แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าโดยจับเวลาที่ 1 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ

ข. แยกน้ำใส กับผงถ่านออกจากกันโดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยก (Centrifuge)

ค. วิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในน้ำที่แยกผงถ่านออกแล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำ กับเวลาในการดูดซับ

### 3.2.2.4 อิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ ต่อการดูดซับ

ก. ชั่งผงถ่านที่เตรียมไว้ให้มีปริมาณผงถ่านในขวดรูปชมพู่เป็น 0 0.1 0.2 0.5 1 และ 2 กรัม ตามลำดับ เติมน้ำตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ ใบละ 50 มิลลิลิตร วัดพีเอชของน้ำตัวอย่าง แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 1 ชั่วโมง

ข. แยกน้ำใส และผงถ่านออกจากกัน โดยใช้เครื่องเหวี่ยงแยก

ค. วิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในน้ำที่แยกผงถ่านออก เขียนกราฟ Adsorption Isotherm แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่เหลือ (C) กับปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (X/M)

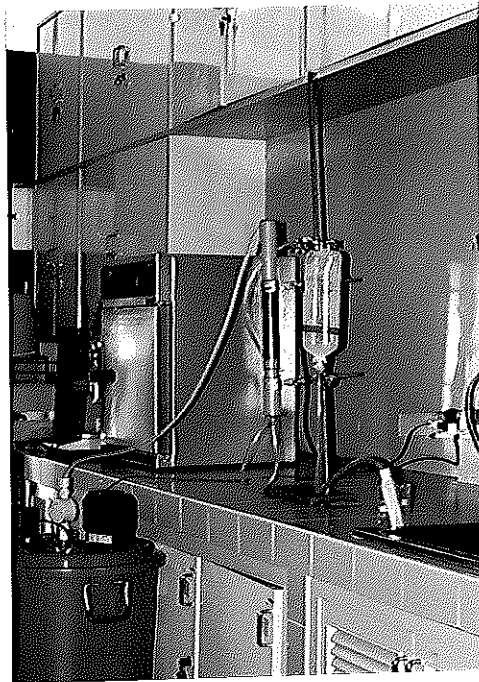
ง. พิจารณาหาความเหมาะสมในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ ซึ่งใช้ในการดูดซับปริมาณสารหนูที่ดีที่สุด เพื่อนำไปทดสอบแบบคอลัมน์ต่อไป

### 3.2.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่าน ด้วย Breakthrough Curve

ก. นำถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม สำหรับการดูดซับสารหนู มาบรรจุลงในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร

ข. ผ่านน้ำตัวอย่างที่มีสารหนูปนเปื้อนลงในคอลัมน์ ด้วยอัตราเร็ว 2 ลิตรต่อชั่วโมง นำน้ำที่ได้หลังจากผ่านกรรงไปวัดพีเอช ปริมาณเหล็ก และปริมาณสารหนู โดยทำการวัดปริมาณเหล็ก เพื่อหาเหล็กที่ถูกปล่อยออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเพอริกคลอไรด์ วิธีการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 9

ค. เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่เหลือ(C) ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น (C<sub>0</sub>) กับปริมาตรของตัวอย่างน้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับ



ภาพประกอบ 9 ชุดการทดลองที่ใช้ทดสอบแบบต่อเนื่อง

3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารหนู เมื่อใช้น้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน ในเขตอำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช

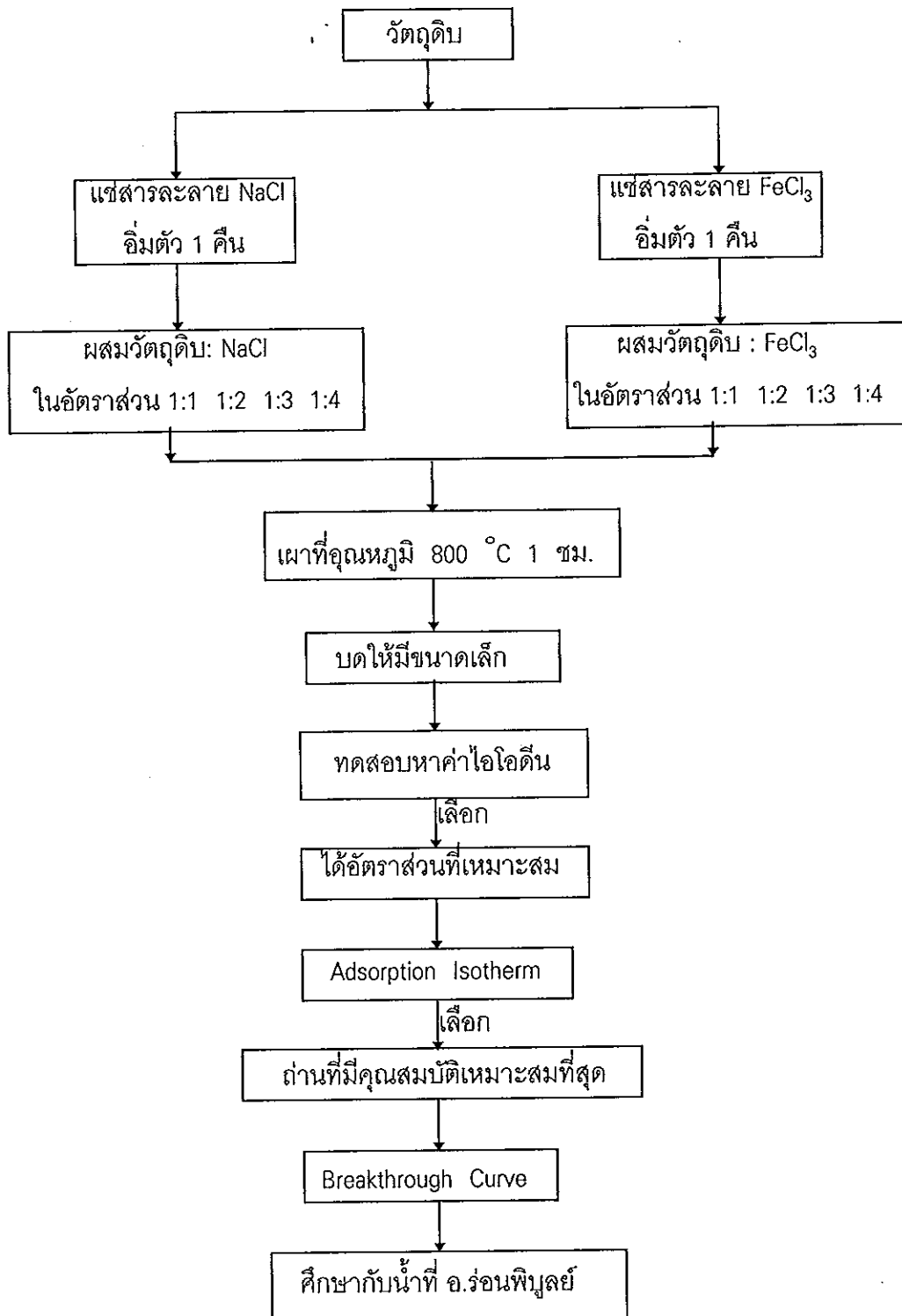
นำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดสอบข้างต้น ไปใช้กรองกับน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ตำบลรัตนพิบูลย์ อำเภอรัตนพิบูลย์ เนื่องจากการศึกษาของประกาย บริบูรณ์ (2539) พบว่าน้ำบ่อตื้นจากบ้านเลขที่ข้างต้น มีค่าความเข้มข้นของสารหนูสูงสุด เพื่อนำ มาศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารหนูของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติทาง กายภาพ และเคมีของน้ำ โดยทำการวัดปริมาณสารหนู เหล็ก ฟิเอช ความกระด้าง และสภาพ ความเป็นด่าง ซึ่งขั้นตอนการทดลอง แสดงไว้ดังภาพประกอบ 10

#### 4. วิธีการวิเคราะห์

ตาราง 5 วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีของน้ำตัวอย่าง

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณสารหนู	Stripping Potentiometry
ปริมาณเหล็ก	Atomic Absorption Spectrophotometry *
ฟิเอช	pH meter
ความกระด้าง	EDTA Titration *
ความเป็นด่าง	Direct Titration *

ที่มา \* APHA, AWWA and WEF (1992)



ภาพประกอบ 10 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อใช้ในกระบวนการลดปริมาณสารหนูในน้ำ

### บทที่ 3

#### ผล และการอภิปรายผล

การเสนอผลการวิจัยจะเสนอเรียงตามภาพประกอบ และแยกเป็นการทดลองย่อยๆ ตามลำดับ เพื่อสะดวกต่อการอ่าน และทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

#### การทดลองที่ 1 การเตรียม และศึกษาสมรรถนะของถ่านกัมมันต์

การศึกษาสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว และแกลบ ในอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นที่ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 โดยมีสารกระตุ้น 2 ชนิด คือ เกลือแกง และเฟอริกคลอไรด์ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งพิจารณาจากค่าไอโอดีน นั่นคือ จำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับได้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม โดยให้สารละลายไอโอดีนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.05 นอร์มอล เขย่าเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณไอโอดีนที่เหลืออยู่ ด้วยการไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 นอร์มอล

การพิจารณาสารละลายไอโอดีนที่เหลือจากการดูดซับ หากมีปริมาณของไอโอดีนลดลงหรือพบว่าใสขึ้นกว่าสารละลายไอโอดีนเริ่มต้น จะแสดงให้เห็นสมรรถนะในการดูดซับ ซึ่งขึ้นกับปริมาตรรูพรุน นั่นคือ ถ้าค่าไอโอดีนสูง จะมีสมรรถนะในการดูดซับได้ดีกว่า มีปริมาตรของรูพรุนมากกว่าที่มีค่าไอโอดีนต่ำ

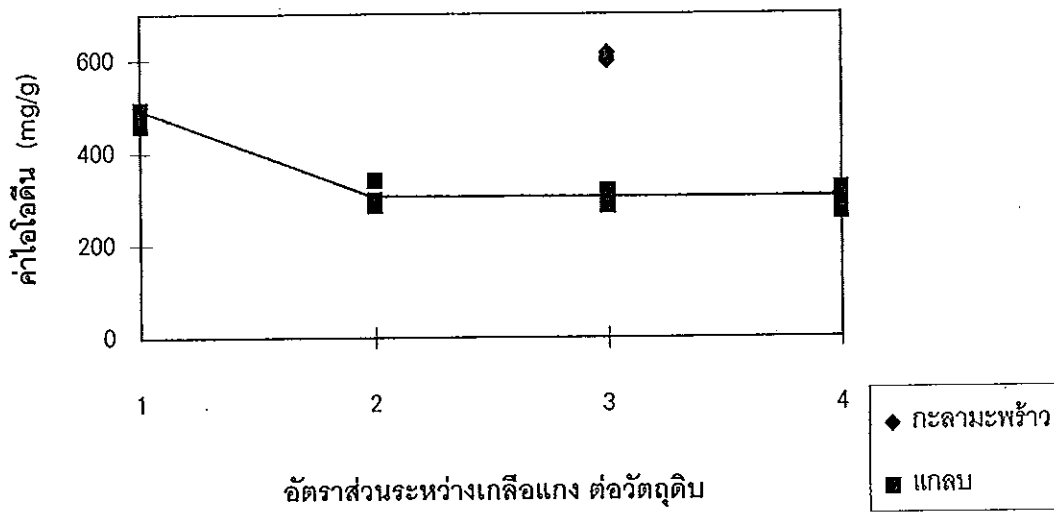
จากผลการทดลองในตาราง 6 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว โดยมีเกลือแกงเป็นสารกระตุ้นในอัตราส่วนที่ 1:3 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากที่เคยศึกษาไว้จะให้ค่าไอโอดีน คือ 606 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ส่วนสารกระตุ้นเฟอริกคลอไรด์ในอัตราส่วน 1:1 1:2 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าไอโอดีน เท่ากับ 287 390 500 และ 226 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ดังนั้น อัตราส่วนของกะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ จึงดีที่สุด ในอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบ ต่อสารกระตุ้นที่ 1:3 เช่นเดียวกัน

ตาราง 6 แสดงค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบต่างๆ ที่อุณหภูมิ  
800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

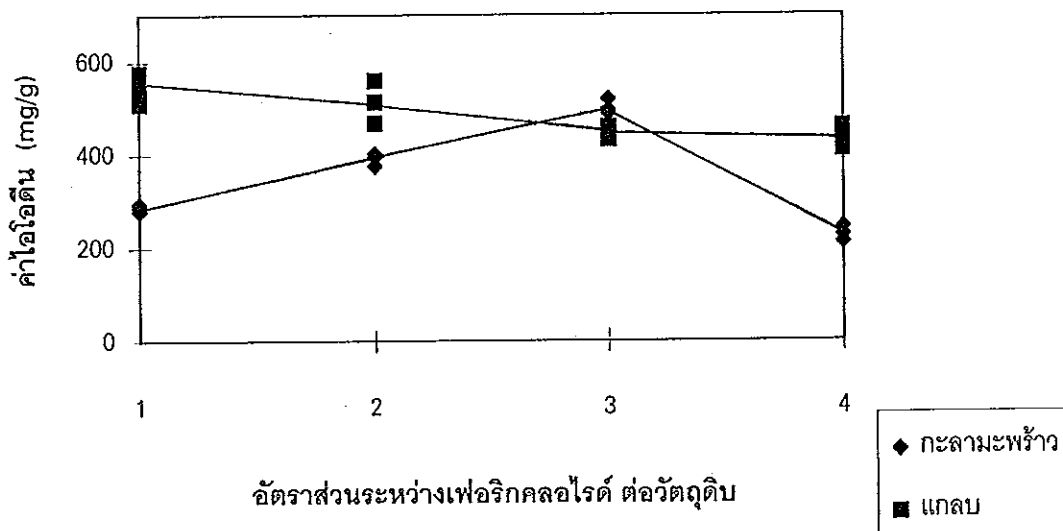
ถ่านกัมมันต์			ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์)				
วัตถุดิบ	ชนิดสารกระตุ้น	อัตราส่วน วัตถุดิบ:สารกระตุ้น					
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
กะลามะพร้าว	เกลือแกง (NaCl)	1:3	605	615	598	606	
		เฟอริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> )	1:1	279	294	287	287
			1:2	394	375	401	390
			1:3	487	505	508	500
			1:4	226	210	242	226
แกลบ	เกลือแกง (NaCl)	1:1	489	460	494	481	
		1:2	298	286	340	308	
		1:3	285	310	317	304	
		1:4	270	292	320	294	
	เฟอริกคลอไรด์ (FeCl <sub>3</sub> )	1:1	510	543	576	543	
		1:2	513	467	559	513	
		1:3	436	432	458	442	
		1:4	432	409	458	433	

สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ พบว่า สารกระตุ้นที่เป็นเฟอริกคลอไรด์จะให้ค่าไอโอดีนสูงกว่าสารกระตุ้นเกลือแกง ซึ่งในอัตราส่วน 1:1 ของแกลบต่อสารกระตุ้นเฟอริกคลอไรด์ จะให้ค่าเท่ากับ 543 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ขณะที่สารกระตุ้นเกลือแกงในอัตราส่วนเดียวกันให้ค่าไอโอดีน เท่ากับ 481 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ซึ่งในอัตราส่วนที่ 1:1 ของสารกระตุ้นทั้งสองชนิดนี้ มีค่าของการดูดซับไอโอดีนดีกว่าที่อัตราส่วน 1:2 1:3 และ 1:4 ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของเกลือแกงจาก 1 เป็น 2 เท่าของน้ำหนักแกลบ พบว่า ค่าของไอโอดีน มีค่าลดลงจากเดิม และจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณของเกลือแกงเป็น 3 และ 4 เท่า ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณเกลือแกงที่ 1 เท่า เป็นปริมาณที่เพียงพอแก่การกระตุ้นแกลบให้เป็นถ่านกัมมันต์แล้ว แต่ยังให้ค่าไอโอดีน ที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานของ



ภาพประกอบ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนกับอัตราส่วนระหว่างเกลือแกงต่อไอโอดีน



ภาพประกอบ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีน กับอัตราส่วนระหว่างเฟอริกคลอไรด์ต่อไอโอดีน

AWWA ซึ่งกำหนดที่ 500 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน แต่สำหรับวัตถุดิบกะลามะพร้าว ได้ทำการศึกษาเพียงอัตราส่วนที่ 1:3 ของเกลือแกง ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดจากงานวิจัยของ ดำรง ชุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล (2533) โดยให้ค่าไอโอดีน เท่ากับ 640 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าไอโอดีนที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ คือ 606 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ สำหรับการกระตุ้นกะลามะพร้าว ด้วยเกลือแกงในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะให้ค่าไอโอดีนที่สูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดมาตรฐานที่ 600 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการใช้เกลือแกงเป็นสารกระตุ้นจึงสามารถนำไปพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้

สำหรับภาพประกอบ 12 พบว่า เมื่อปริมาณของสารกระตุ้นเฟอริกคลอไรด์ เพิ่มจาก 1 เป็น 3 เท่าของน้ำหนักกะลามะพร้าว ทำให้ค่าไอโอดีนเพิ่มขึ้นเป็นเกือบเท่าตัว และจะลดลงเมื่อมีปริมาณเฟอริกคลอไรด์เพิ่มขึ้นมากกว่านี้ กรณีวัตถุดิบชนิดแกลบ จะให้ค่าไอโอดีนสูงสุด ในปริมาณเฟอริกคลอไรด์ 1 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบ และค่าไอโอดีนจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีปริมาณสารกระตุ้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณสารกระตุ้นต่ำ หรือสูงเกินไป จะมีผลต่อปริมาณรูพรุน ทำให้มีค่าค่อนข้างน้อย เนื่องจาก ถ้าปริมาณต่ำเกินไป รูพรุนที่ได้จะมีน้อย และเกิดรูพรุนไม่ทั่วถึงในเนื้อวัตถุดิบ หรือหากมีปริมาณมากเกินไป จะทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงตามไปด้วย

ตาราง 7 แสดงค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป

ชนิดถ่านกัมมันต์	ค่าไอโอดีน (มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์)
กะลามะพร้าว : NaCl 1:3	606
กะลามะพร้าว : FeCl <sub>3</sub> 1:3	500
แกลบ : NaCl 1:1	481
แกลบ : FeCl <sub>3</sub> 1:1	543

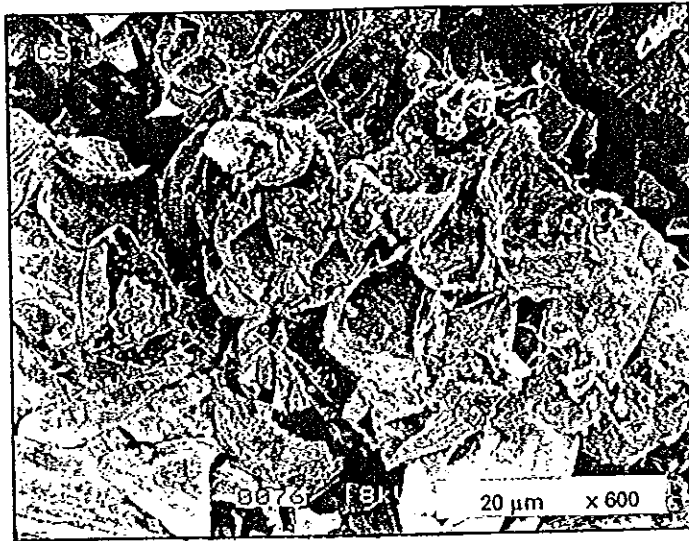
จากการทดลองที่ 1 จึงได้อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 1:3 ของกะลามะพร้าว ต่อเกลือแกง และกะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ สำหรับวัตถุดิบที่เป็นแกลบ ใช้อัตราส่วน 1:1 ของแกลบ ต่อ



เกลือแกง และเกลือ ต่อเฟอริกคลอไรด์ เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด ซึ่งถ่านทั้ง 4 ชนิดนี้จะนำไปศึกษา และทดลองในขั้นต่อไป

## การทดลองที่ 2 การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างพื้นผิว ความเป็นรูพรุน ของถ่านกัมมันต์

จากผลการศึกษาถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการทดลองที่ 1 นำถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ให้สมรรถนะในการดูดซับไอโอดีนที่ดีที่สุด มาศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope:SEM) เพื่อพิจารณาโครงสร้างพื้นผิว สภาพวัตุดิบที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างก่อนทำการเผา และหลังทำการเผา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งโครงสร้าง ลักษณะของกะลามะพร้าว และเกลือก่อนทำการเผา สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 13 และ 14 ตามลำดับ

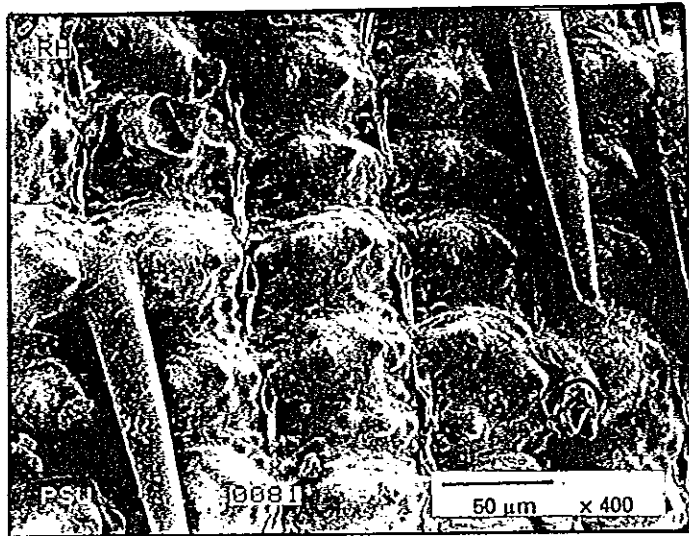


ก. แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ของเปลือกด้านในของกะลามะพร้าว

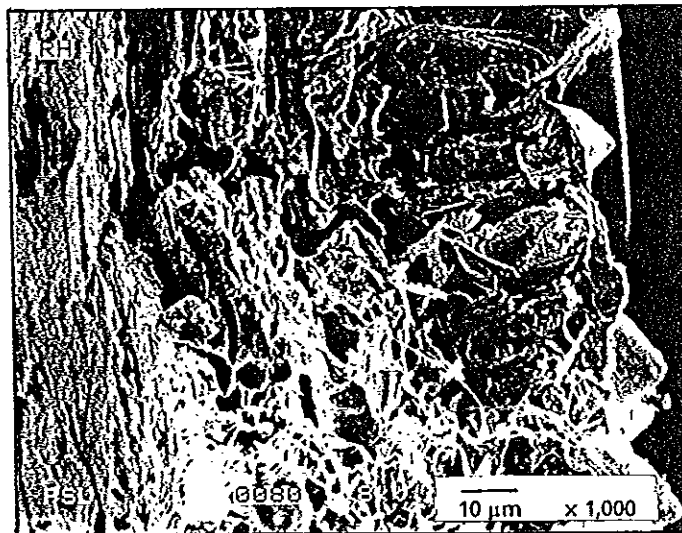


ข. แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ของเปลือกด้านข้างของกะลามะพร้าว

ภาพประกอบ 13 แสดงลักษณะโครงสร้าง ของกะลามะพร้าว ก่อนทำการเผา และ  
กระตุ่น ให้เป็นถ่านกัมมันต์

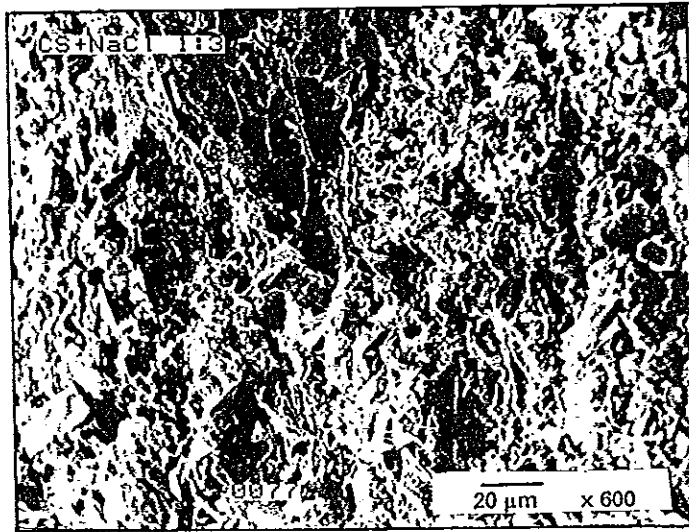


ก. แสดงลักษณะโครงสร้างเปลือกด้านนอก ของแกลบ

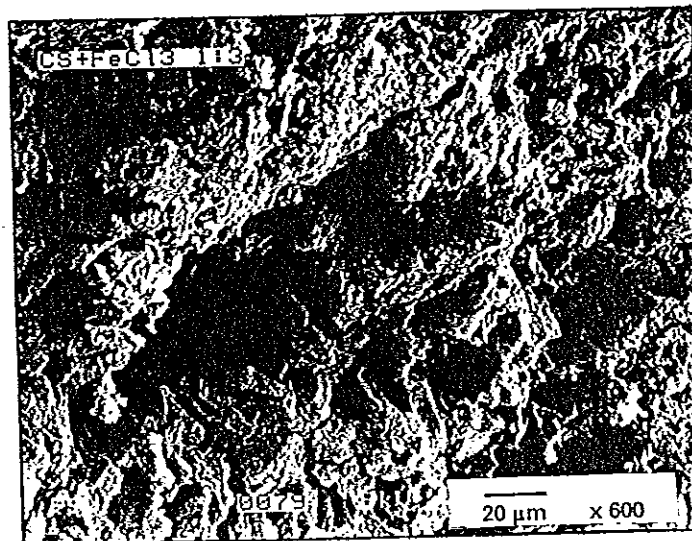


ข. แสดงลักษณะโครงสร้างเปลือกด้านข้าง ของแกลบ

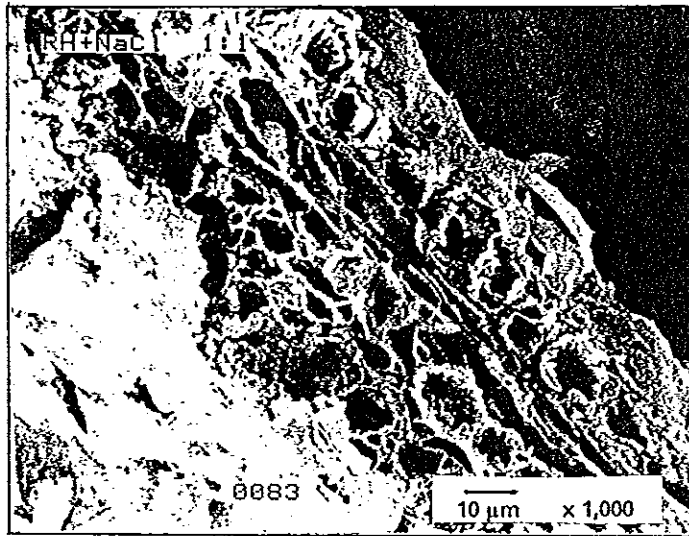
ภาพประกอบ 14 แสดงลักษณะโครงสร้าง ของแกลบ ก่อนทำการเผา และกระตุ้นให้  
เป็นถ่านกัมมันต์



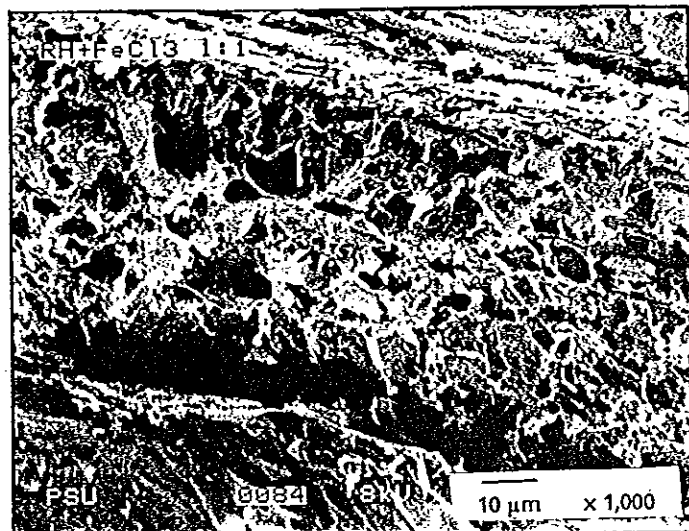
ภาพประกอบ 15 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุน ของถ่านกัมมันต์จาก  
กะลามะพร้าว ต่อเกลือแกง ที่อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 800 °C



ภาพประกอบ 16 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุน ของถ่านกัมมันต์จาก  
กะลามะพร้าว ต่อเฟอร์ริกคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:3 ที่อุณหภูมิ 800 °C



ภาพประกอบ 17 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุน ของถ่านกัมมันต์จาก  
 แกลบ ต่อเกลือแกง ที่อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C



ภาพประกอบ 18 แสดงลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุน ของถ่านกัมมันต์จาก  
 แกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 800 °C

จากการศึกษาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของกะลามะพร้าว แกลบ และถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดจากการกระตุ้นด้วยเกลือแกง และเพอริกคลอไรด์ ดังภาพประกอบ 13-18 และเทียบกับผลการวัดค่าไอโอดีน นั้นสรุปได้ดังในตาราง 8

ตาราง 8 ลักษณะความพรุนที่เห็นจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ของกะลามะพร้าว แกลบ และถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	สารกระตุ้น	ค่าไอโอดีน	ลักษณะความพรุนที่เห็นจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
กะลามะพร้าว	ก่อนเผา	-	มีรูพรุนขนาดเล็กมากเกิดตามธรรมชาติพอสมควร
	เกลือแกง (1:3)	606	มีรูพรุนมากขึ้น ขนาดรูพรุนค่อนข้างเล็ก และกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งตัวกะลา ทั้งนี้มีรูพรุนขนาดใหญ่บ้างเพียงบางส่วน
	FeCl <sub>3</sub> (1:3)	500	มีรูพรุนขนาดค่อนข้างใหญ่มาก จนเป็นโพรง คลุมพื้นที่ประมาณ 40% ของทั้งหมด ส่วนที่เหลือเป็นส่วนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก
แกลบ	ก่อนเผา	-	มีรูพรุนตามธรรมชาติ โดยที่ความพรุนค่อนข้างมากกว่าของกะลามะพร้าวเล็กน้อย
	เกลือแกง (1:1)	481	มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่พอสมควร กระจายอยู่ในบางพื้นที่ ในขณะที่ยังมีอีกประมาณ 50% ของพื้นที่ที่ไม่มีความพรุนปรากฏ
	FeCl <sub>3</sub> (1:1)	543	มีรูพรุนขนาดใหญ่ปานกลาง กระจายอยู่เกือบทั่วพื้นที่โดยมีโพรงขนาดใหญ่คลุมพื้นที่ประมาณ 10%

จากตาราง 8 พบว่าก่อนทำการเผาวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดจะมีรูพรุนขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยจะสังเกตเห็นได้ชัดในภาพประกอบ 13ข. ซึ่งเป็นชิ้นส่วนด้านข้างของกะลามะพร้าว จะมีรูพรุนที่มีขนาดเล็กมากกระจายอยู่ทั่วไปตามพื้นผิว และจากภาพประกอบ 14ข. แสดงโครงสร้างพื้นผิวด้านข้างของแกลบ ซึ่งเห็นเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป ถ่านที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง จะมีความพรุนที่มีค่าไอโอดีนสูงที่สุด ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบนั้น ต้องกระตุ้นด้วยเพอริกคลอไรด์ จึงจะได้ความพรุนที่ให้ค่าไอโอดีนสูง และยิ่งสูงกว่าถ่านที่ผลิตจาก

กะลามะพร้าวเล็กน้อย หลังจากทำการเผา และกระตุ้นจนเป็นถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านทั้ง 4 ชนิด จะมีโครงสร้างพื้นผิว ขนาดรูพรุนเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนทำการเผา และมีรูพรุนแบบเปิดเกิดขึ้นมากมายตามพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ สำหรับค่าไอโอดีนที่ได้จากการทดลองที่ 1 ซึ่งบ่งบอกถึง ปริมาตรของรูพรุนที่ใช้ในการดูดซับ พบว่ามีความสัมพันธ์กับภาพประกอบ 15-18 โดยที่ถ่าน กัมมันต์ชนิดกะลามะพร้าว ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกงในอัตราส่วน 1:3 จะให้ค่าไอโอดีน คือ 606 มิลลิกรัมไอโอดีน ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ซึ่งสูงกว่าถ่านชนิดอื่นๆ เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 15 พบว่า ถ่านชนิดนี้จะมีผิวที่ไม่เรียบ มีขนาดของรูพรุนค่อนข้างเล็ก และเกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว แต่สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดกะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3 จะเกิดรูพรุนที่มี ขนาดไม่สม่ำเสมอ ดังภาพประกอบ 16 ซึ่งรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มาก ย่อมเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับ ได้ จึงให้ค่าไอโอดีนน้อยกว่าชนิดกะลามะพร้าว กับเกลือแกง(1:3) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก แกลบในอัตราส่วน 1:1 ของเกลือแกง จะให้รูพรุนที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่กว่ารูพรุนที่ได้จากการ กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ในอัตราส่วนเดียวกัน ดังภาพประกอบ 17 และ 18 จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ จากแกลบ กับเฟอริกคลอไรด์มีค่าไอโอดีนสูงกว่าถ่านชนิดแกลบ กับเกลือแกงในอัตราส่วน 1:1 เช่นเดียวกัน สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่าชนิดแกลบให้ค่า ไอโอดีนใกล้เคียงกับชนิดที่ใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพประกอบ 16 และ 18 พบว่าชนิดแกลบจะให้ขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างเล็กกว่า และกระจายสม่ำเสมอกว่าชนิด กะลามะพร้าว จะเห็นว่าวัตถุดิบที่ต่างกัน คือแกลบ และกะลามะพร้าวมีความหนาบาง ความอ่อน แข็งของเนื้อวัตถุดิบ และปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ทำให้ โครงสร้าง ลักษณะความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด ดังกล่าว มีความ แตกต่างกันด้วย

### การทดลองที่ 3 การศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูแบบไม่ต่อเนื่อง

#### ตอนที่ 1 อิทธิพลของเวลา ต่อการดูดซับ

ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และวาเลนซี 5 ของถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่ได้คัดเลือกไว้แล้วจากการทดลองที่ 1 โดยการทดลองนี้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) ซึ่งใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมให้มีความเข้มข้นของสารหนูประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เขย่าจนครบเวลาที่ 1 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างน้ำไปแยกผงถ่านออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาฟิเอช และปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำ

ตาราง 9 ผลการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ที่เวลา 1 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง

ชนิดถ่านกัมมันต์	pH	ความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 ที่เหลือ (mg/L)					
		เวลา (ชั่วโมง)					
		0	1	2	4	8	16
กะลามะพร้าว: NaCl 1:3	8.3	2.17	1.61	1.52	1.41	1.71	1.79
กะลามะพร้าว: FeCl <sub>3</sub> 1:3	3.0	2.19	0.07	0.06	0.06	0.08	0.10
แกลบ: NaCl 1:1	8.9	2.04	1.90	1.67	1.46	1.51	1.48
แกลบ: FeCl <sub>3</sub> 1:1	3.7	2.11	0.028	0.014	0.010	0.006	0.004

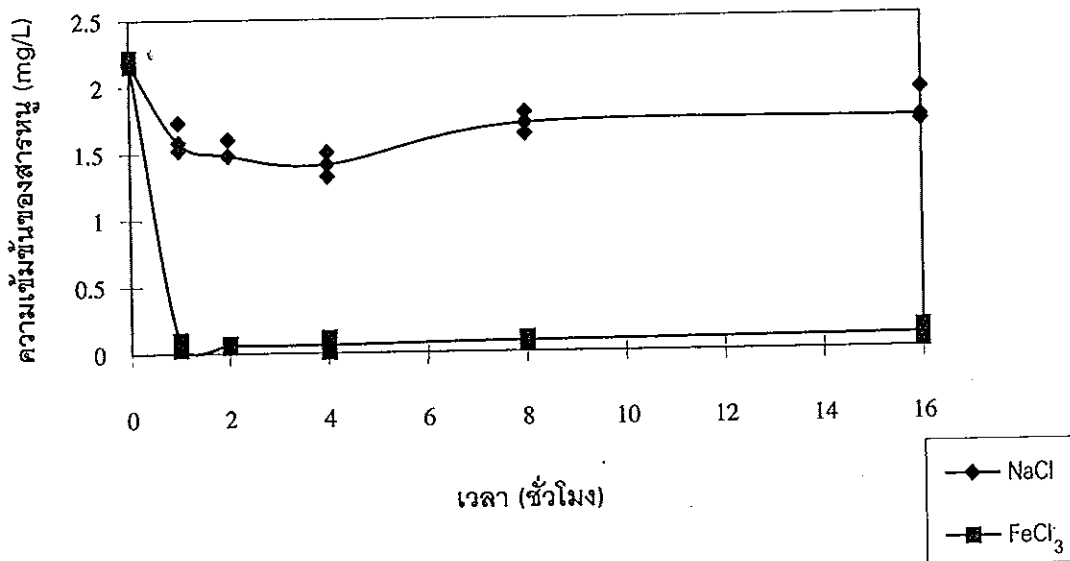


ตาราง 10 ผลการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5  
ที่เวลา 1 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง

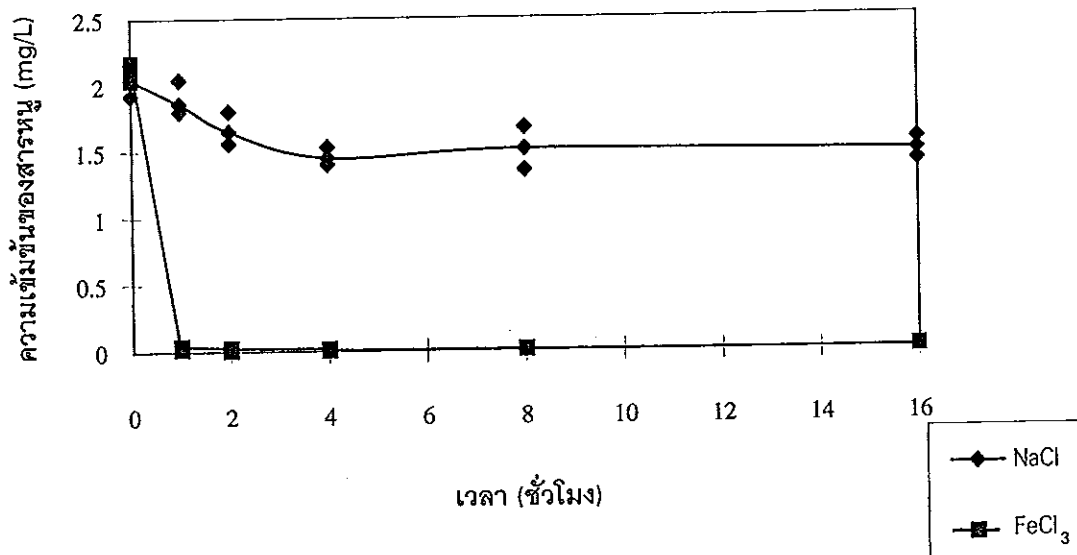
ชนิดถ่านกัมมันต์	pH	ความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 ที่เหลือ (mg/L)					
		เวลา (ชั่วโมง)					
		0	1	2	4	8	16
กะลามะพร้าว: NaCl 1:3	8.9	1.63	1.53	1.46	1.34	1.31	1.30
กะลามะพร้าว: FeCl <sub>3</sub> 1:3	2.6	1.84	0.011	0.014	0.020	0.015	0.017
แกลบ:NaCl 1:1	8.2	1.63	1.51	1.48	1.30	1.44	1.42
แกลบ: FeCl <sub>3</sub> 1:1	3.3	1.84	0.004	0.004	0.005	0.005	0.004

เมื่อแยกน้ำ และถ่านกัมมันต์ออกจากกัน จะได้น้ำใส ไม่มีสี ซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8.3 ถึง 8.9 ในถ่านกัมมันต์ที่ใช้เกลือแกงเป็นสารกระตุ้น สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นสารกระตุ้น มีค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2.6 ถึง 3.7

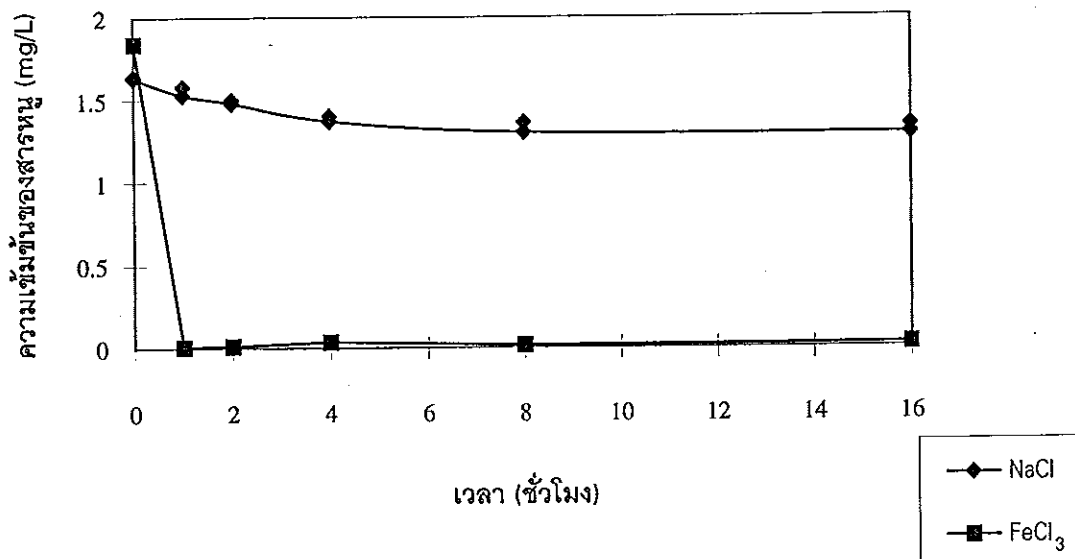
ผลการทดลอง พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง แม้จะมีความพรุนสูง ซึ่งกระจายอยู่สม่ำเสมอ และมีค่าไอโอดีนสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ แต่กลับดูดซับสารหนูได้น้อย ยังคงเหลือสารหนูในน้ำสูงมาก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว และกระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ สามารถดูดซับสารหนูได้ดีมาก (ดูตาราง 9-10) นั่นคือประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูมิได้ขึ้นกับความพรุน หรือค่าไอโอดีนเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับสารกระตุ้น ซึ่งจะไปช่วยให้เกิดการจับติดผิวของสารหนูด้วย โดยที่การกระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ ทำให้ผิวถ่านกัมมันต์มีประจุ Fe<sup>+++</sup> ผิงอยู่ซึ่งเป็นตัวช่วยให้เกิดการจับติดของสารหนูในลักษณะคล้ายๆ กับการตกตะกอนร่วม (Co-precipitation) และผลการทดลองในกรณีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบก็ออกมาในทำนองเดียวกัน ดังภาพประกอบ 19-22



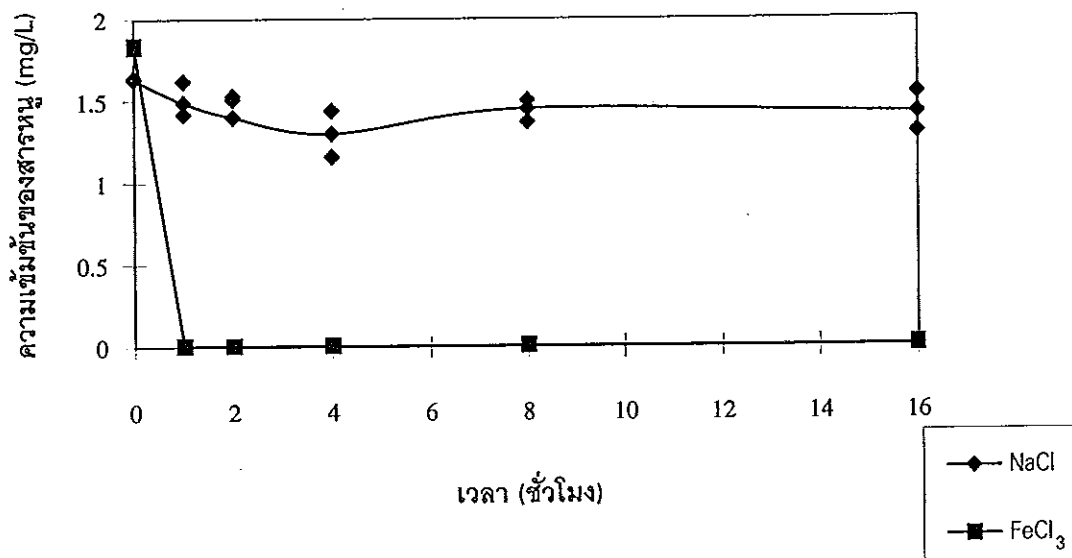
ภาพประกอบ 19 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:3



ภาพประกอบ 20 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1



ภาพประกอบ 21 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:3



ภาพประกอบ 22 แสดงค่าการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ ต่อสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:1

เวลาที่มีผลต่อการดูดซับโดยตรง ดังภาพประกอบ 19-22 ซึ่งในช่วงแรกจะมีปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำลดลงค่อนข้างเร็วกว่าในช่วงหลัง ขณะที่ถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเกลือแกงจะมีปริมาณสารหนูในน้ำค่อยๆ ลดลงจนมีค่าค่อนข้างคงที่หลังจากช่วงที่ 4 และอาจมีปริมาณสารหนูในน้ำสูงขึ้นในบางเวลา โดยอาจเกิดจากการผันกลับของการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้น ซึ่งถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีการดูดซับทางกายภาพที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Ford, 1981) ทำให้ง่ายต่อการผันกลับของการดูดซับ สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ มีปริมาณสารหนูลดลง และค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ช่วงแรกของการดูดซับ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วตอนต้นว่า ถ่านชนิดนี้จะเกิดการจับติดกับสารหนู ซึ่งเกิดขึ้นจากพันธะเคมีระหว่าง Fe-As ซึ่งยากต่อการผันกลับของการดูดซับ อย่างไรก็ตามย่อมมีการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นด้วย จึงอาจมีปริมาณสารหนูเพิ่มขึ้นบ้างเพียงเล็กน้อยในระยะหลัง

## ตอนที่ 2 อิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ ต่อการดูดซับ

ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และ 5 จากถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด โดยใช้น้ำตัวอย่างที่เตรียมให้มีความเข้มข้นประมาณ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ที่มีปริมาณถ่านกัมมันต์อยู่ 0 0.1 0.2 0.5 1.0 และ 2.0 กรัม เขย่าจนครบ 1 ชั่วโมง แยกน้ำตัวอย่างออกจากผงถ่าน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำ

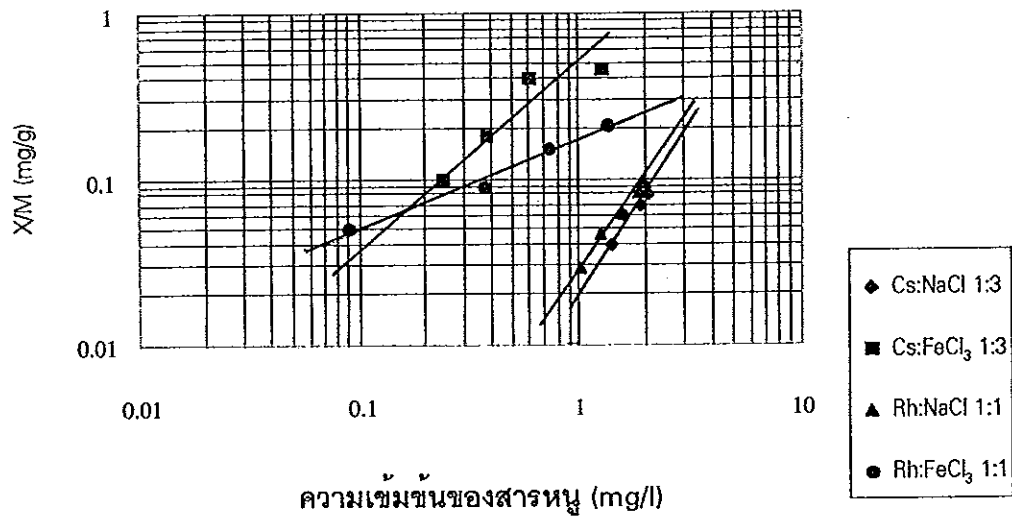
ผลจากการทดลองแสดงในตาราง 11-12 โดยพบว่า เมื่อปริมาณของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำลดลงตามไปด้วย สำหรับค่าพีเอช จากการทดลองตอนที่ 1 และ 2 พบว่าในถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง เมื่อมีปริมาณถ่านมากขึ้น น้ำตัวอย่างจะมีพีเอชสูงขึ้น กรณีถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ น้ำตัวอย่างจะมีพีเอชต่ำลง เมื่อมีปริมาณถ่านมากขึ้น ซึ่งก่อนทดสอบการดูดซับ จะทำการล้างถ่านกัมมันต์ และทำการวัดพีเอชในน้ำล้าง จนกระทั่งมีพีเอชไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 5.3-5.6 หลังจากนั้นได้นำถ่านไปอบให้แห้ง และบดให้ตัวอย่างผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ก่อนแล้วนำไปศึกษาหาไอโซเทอรั่มการดูดซับต่อไป

ตาราง 11 แสดงค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

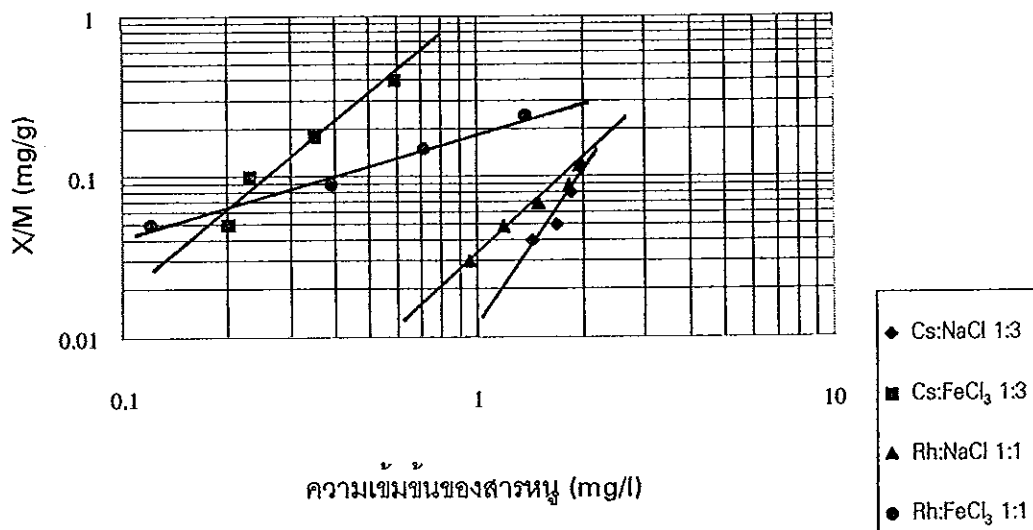
ชนิดถ่านกัมมันต์	น้ำหนัก (g)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/l)				% removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
กะลามะพร้าว:NaCl 1:3	0.0	7.1	2.18	2.19	2.20	2.19	0
	0.1	9.0	2.03	1.96	2.04	2.01	8.22
	0.2	9.6	1.88	1.86	1.90	1.88	14.16
	0.5	10.0	1.61	1.69	1.68	1.66	24.20
	1.0	10.3	1.40	1.44	1.48	1.44	34.25
	2.0	10.6	1.68	1.69	1.68	1.68	23.14
กะลามะพร้าว:FeCl <sub>3</sub> 1:3	0.0	7.1	2.18	2.18	2.19	2.18	0
	0.1	3.7	1.27	1.30	1.28	1.28	41.13
	0.2	3.4	0.60	0.59	0.62	0.60	72.32
	0.5	3.2	0.38	0.35	0.36	0.36	83.33
	1.0	3.0	0.24	0.23	0.26	0.24	88.84
	2.0	2.8	0.22	0.20	0.20	0.21	90.52
แกลบ:NaCl 1:1	0.0	7.0	2.17	2.17	2.17	2.17	0
	0.1	7.4	1.98	1.94	1.90	1.94	10.60
	0.2	8.3	1.84	1.82	1.80	1.82	16.13
	0.5	8.4	1.56	1.49	1.51	1.52	29.95
	1.0	8.5	1.25	1.20	1.15	1.20	44.70
	2.0	9.0	1.01	0.96	0.94	0.97	55.30
แกลบ:FeCl <sub>3</sub> 1:1	0.0	7.0	2.18	2.20	2.18	2.19	0
	0.1	4.5	1.46	1.53	1.48	1.49	31.96
	0.2	4.2	1.34	1.38	1.30	1.34	38.81
	0.5	3.8	0.73	0.71	0.73	0.72	66.97
	1.0	3.5	0.37	0.39	0.39	0.38	82.50
	2.0	3.4	0.09	0.12	0.15	0.12	94.52
แกลบ:FeCl <sub>3</sub> 1:0.5	0.0	7.0	2.18	2.20	2.18	2.19	0
	0.1	4.6	1.62	1.59	1.60	1.60	26.79
	0.2	4.3	1.54	1.48	1.52	1.51	30.90
	0.5	4.1	0.75	0.76	0.78	0.76	65.14
	1.0	4.0	0.43	0.37	0.41	0.40	81.58
	2.0	4.0	0.14	0.11	0.12	0.12	94.37

ตาราง 12 แสดงค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 เมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

ชนิดถ่านกัมมันต์	น้ำหนัก (g)	pH	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/l)				% removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
กะลามะพร้าว:NaCl 1:3	0.0	7.0	2.16	2.16	2.16	2.16	0
	0.1	7.8	1.87	1.78	1.99	1.88	12.96
	0.2	8.7	1.86	1.75	1.97	1.86	13.89
	0.5	9.8	1.71	1.73	1.72	1.72	20.37
	1.0	10.1	1.40	1.36	1.41	1.39	35.65
	2.0	10.9	1.17	1.20	1.18	1.18	45.22
กะลามะพร้าว:FeCl <sub>3</sub> 1:3	0.0	7.0	2.10	2.10	2.10	2.10	0
	0.1	3.7	0.32	0.30	0.28	0.30	85.71
	0.2	3.4	0.13	0.10	0.10	0.11	94.91
	0.5	3.2	0.09	0.09	0.09	0.09	95.83
	1.0	3.0	0.07	0.06	0.06	0.06	97.07
	2.0	2.8	0.05	0.05	0.05	0.05	97.69
แกลบ:NaCl 1:1	0.0	7.0	2.16	2.16	2.16	2.16	0
	0.1	7.6	2.10	2.01	2.14	2.08	3.55
	0.2	8.3	2.03	2.06	2.09	2.06	4.63
	0.5	8.8	1.98	1.95	1.89	1.94	10.19
	1.0	9.0	1.76	1.78	1.77	1.77	18.06
	2.0	9.1	1.73	1.72	1.72	1.72	20.22
แกลบ:FeCl <sub>3</sub> 1:1	0.0	7.0	2.16	2.16	2.16	2.16	0
	0.1	4.5	0.38	0.34	0.39	0.37	82.87
	0.2	4.2	0.07	0.07	0.06	0.07	96.91
	0.5	3.9	0.04	0.04	0.03	0.04	98.30
	1.0	3.7	0.03	0.02	0.02	0.02	98.92
	2.0	3.6	0.02	0.01	0.01	0.01	99.38
แกลบ:FeCl <sub>3</sub> 1:0.5	0.0	7.0	2.16	2.16	2.16	2.16	0
	0.1	4.6	1.18	1.21	1.21	1.20	44.44
	0.2	4.3	0.84	0.89	0.91	0.88	59.26
	0.5	4.0	0.73	0.69	0.74	0.72	66.67
	1.0	3.9	0.42	0.39	0.39	0.40	81.48
	2.0	3.8	0.09	0.13	0.11	0.11	94.91



ภาพประกอบ 23 แสดงไอโซเทอรัมการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 1

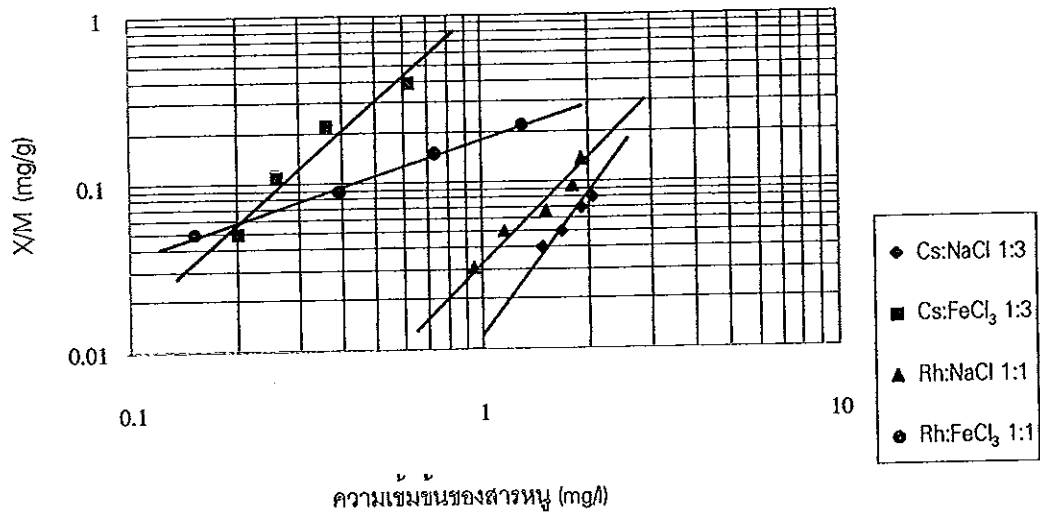


ภาพประกอบ 24 แสดงไอโซเทอรัมการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 2

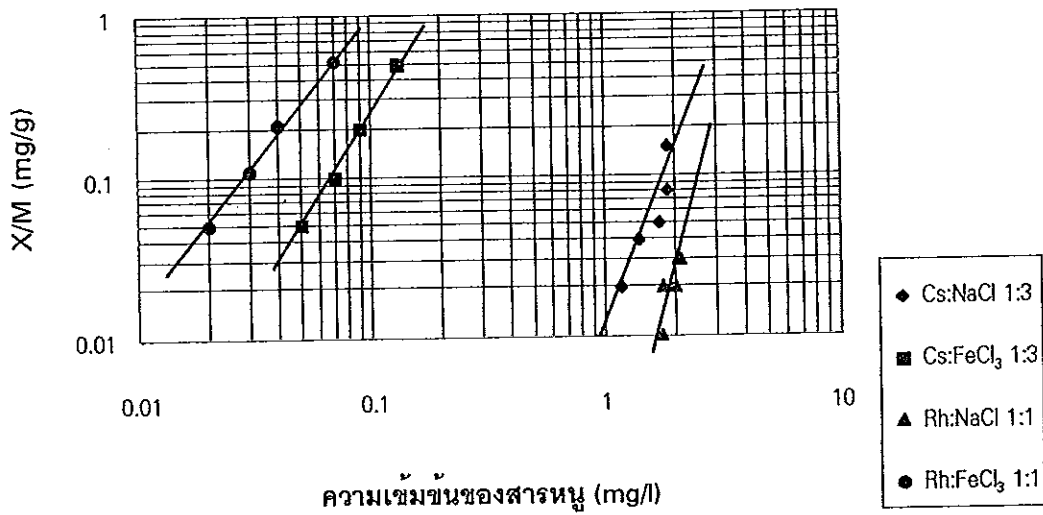
หมายเหตุ  $X/M$  เท่ากับ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์

Cs เท่ากับ กะลามะพร้าว

Rh เท่ากับ แกลบ



ภาพประกอบ 25 แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 3



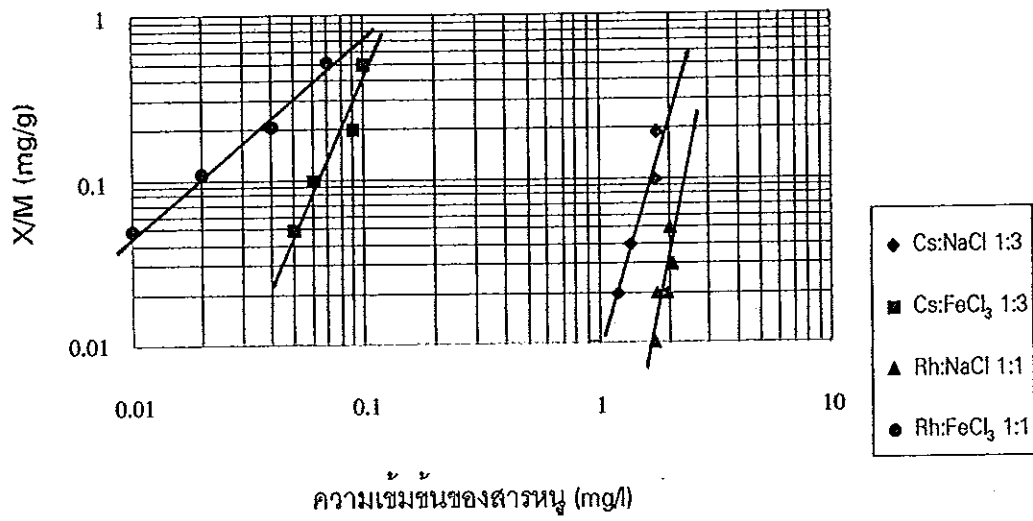
ภาพประกอบ 26 แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับ ของสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 1

หมายเหตุ X/M เท่ากับ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์

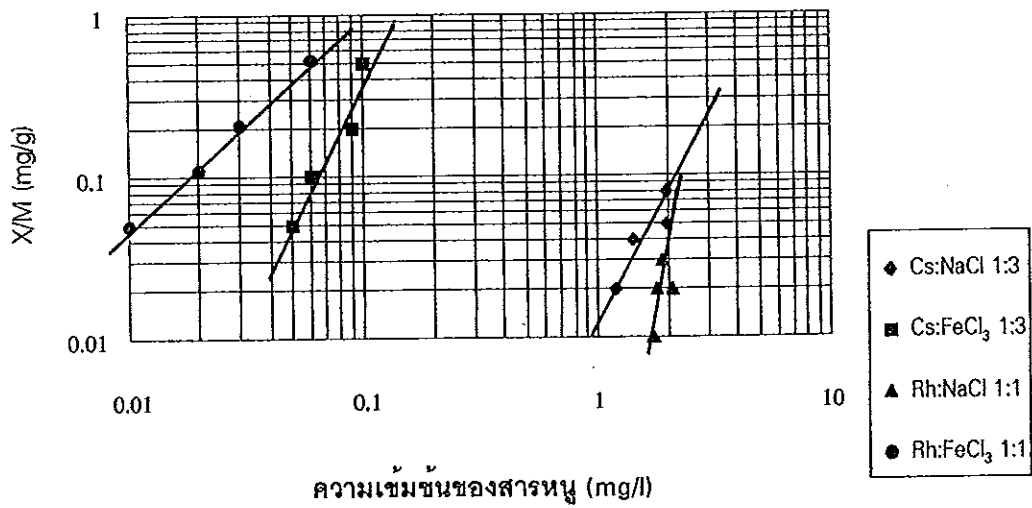
Cs เท่ากับ กะลามะพร้าว

Rh เท่ากับ แกลบ





ภาพประกอบ 27 แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับ ของสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 2



ภาพประกอบ 28 แสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับ ของสารหนูวาเลนซี 5 ครั้งที่ 3

หมายเหตุ X/M เท่ากับ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์

Cs เท่ากับ กะลามะพร้าว

Rh เท่ากับ แกลบ

จากภาพประกอบการแสดงเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ ซึ่งให้  
สัญลักษณ์แทนในการอธิบายได้ภาพตามความหมายดังนี้

Cs เท่ากับ Coconut Shell (กะลามะพร้าว)

Rh เท่ากับ Rice Husk (แกลบ)

สำหรับเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ แสดงดังภาพประกอบ 23-28  
สามารถอธิบายได้จากสมการ Freundlich คือ  $X/M = KC^{1/n}$  หรือ  $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$   
เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ความสามารถในการดูดซับสารหนูในถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด  
สามารถพิจารณาจากค่าของ  $X/M$  ซึ่งเป็นปริมาณของสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่  
ใช้ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับที่อยู่เหนือเส้นอื่นจะมีประสิทธิภาพการ  
ดูดซับได้มากกว่าเส้นที่ต่ำกว่า (เสริมพล รัตสุข, 2524) ดังนั้นสารหนูวาเลนซี 3 สามารถถูกดูดซับ  
ในถ่านกัมมันต์ชนิด กะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ (1:3) ดีที่สุด รองลงมาคือ แกลบ ต่อเฟอริก  
คลอไรด์ (1:1) สำหรับถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง จะมีปริมาณการดูดซับสารหนู  
วาเลนซี 3 ได้น้อยกว่า สำหรับการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ที่ดีที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นจาก  
เฟอริกคลอไรด์ โดยมีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกันในบางช่วงน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น  
ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถใช้ค่าคงที่  $K$  และ  $1/n$  ที่ได้จาก  
สมการของ Freundlich โดยพิจารณาที่  $\log C$  มีค่าเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่  $\log K$  เป็นจุด  
ตัดแกน  $Y$  และ  $1/n$  เป็นความชันของสมการเส้นตรง ค่าคงที่ดังกล่าวแสดงไว้ในตาราง 13

ตาราง 13 แสดงค่าคงที่ ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด จากสมการของ Freundlich

ชนิดถ่านกัมมันต์	Arsenic(III)		Arsenic(V)	
	K (mg/g)	1/n	K (mg/g)	1/n
Cs: NaCl 1:3	0.01	3.19	0.01	3.56
Cs: FeCl <sub>3</sub> 1:3	0.44	0.89	3.26	1.02
Rh: NaCl 1:1	0.03	1.77	0.01	4.45
Rh: FeCl <sub>3</sub> 1:1	0.21	0.72	2.92	0.87

จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่  $K$  และ  $1/n$  ที่ได้ สามารถอธิบายประสิทธิภาพของการ  
ดูดซับได้ โดยกรณีที่  $K$  และ  $1/n$  มีค่าต่ำ ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับนั้นจะต่ำในทุก  
ระดับค่าความเข้มข้น ( $C$ ) และในกรณีที่  $1/n$  มีค่าสูง เส้นกราฟจะมีความชันมาก ค่า  $C$  จะมี

อิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ  $X/M$  จะมีค่าสูงมาก เมื่อ  $C$  มีค่าสูง แต่เมื่อ  $C$  มีค่าต่ำลง  $X/M$  ก็จะมีค่าลดลง (Ford, 1978)

จากข้อมูลในตาราง 13 พบว่า ในสารหนูวาเลนซี 3 ถ่านกัมมันต์ชนิด Cs:NaCl (1:3) มีค่า  $1/n$  สูงกว่าชนิด Rh:NaCl (1:1) เส้นกราฟจึงมีความชันสูง ดังนั้น ค่า  $C$  จึงมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับ โดยพบว่าถ่านชนิด Cs:NaCl (1:3) มีความสามารถในการดูดซับเฉพาะช่วงที่มีค่า  $C$  สูงกว่าถ่านชนิด Rh:NaCl (1:1) ประกอบกับมีค่า  $K$  น้อยกว่าถ่านชนิด Rh:NaCl (1:1) เส้นกราฟของ Rh:NaCl(1:1) จึงอยู่เหนือเส้นกราฟของ Cs:NaCl (1:3) และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น พบว่า ถ่านชนิดที่ใช้เฟอริกคลอไรด์จะมีเส้นกราฟอยู่เหนือกว่าชนิดที่ใช้เกลือแกง เนื่องจากมีค่าคงที่  $K$  สูงกว่านั่นเอง ขณะเดียวกันถ่านกัมมันต์ชนิด Cs:FeCl<sub>3</sub> (1:3) จะมีค่า  $K$  และ  $1/n$  สูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด Rh:FeCl<sub>3</sub> (1:1) จึงทำให้เส้นกราฟของถ่าน Cs:FeCl<sub>3</sub> (1:3) มีความชันมากกว่า และอยู่เหนือเส้นกราฟของถ่านชนิด Rh:FeCl<sub>3</sub> (1:1) สำหรับสารหนูวาเลนซี 5 ถ่านกัมมันต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง มีค่า  $K$  เท่ากัน แต่ต่างกันที่  $1/n$  ซึ่งพบว่าชนิด Rh:NaCl (1:1) มีค่าความชันสูงกว่า จึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดี เฉพาะช่วงที่มีค่า  $C$  สูง ดังนั้นถ่านกัมมันต์ชนิด Cs:NaCl (1:3) จึงมีเส้นกราฟอยู่เหนือเส้นของ Rh:NaCl (1:1) สำหรับถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์จะมีค่า  $K$  สูงกว่าชนิดที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง ดังนั้น เส้นกราฟจึงอยู่เหนือกว่าถ่านชนิดที่ใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น ขณะเดียวกันถ่านชนิด Cs:FeCl<sub>3</sub> (1:3) มีค่า  $K$  สูงกว่า Rh:FeCl<sub>3</sub> (1:1) ไม่มากนัก ประกอบกับมีค่า  $1/n$  ที่สูงกว่าชนิดที่ผลิตจากเกลือบ จึงทำให้ เส้นกราฟของ Cs:FeCl<sub>3</sub> (1:3) มีค่าความชันมาก ทำให้ค่า  $X/M$  ขึ้นอยู่กับค่า  $C$  เมื่อค่า  $C$  สูง ทำให้  $X/M$  สูง แต่เมื่อมี  $C$  ต่ำ  $X/M$  ก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นถ่านชนิด Rh:FeCl<sub>3</sub> (1:1) จึงมีเส้นกราฟอยู่เหนือกว่าเส้นกราฟของ Cs:FeCl<sub>3</sub> (1:3) และจากค่า  $1/n$  พบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้เฟอริกคลอไรด์ จะมีความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับมากกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น เนื่องจากถ่านชนิดที่ใช้เฟอริกคลอไรด์จะมีค่า  $1/n$  ต่ำกว่า (Snoeyink, 1990) ทำให้ยากต่อการผันกลับของการดูดซับ(desorption)

สำหรับถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเกลือบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 มีความสามารถในการดูดซับได้ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ได้จาก กะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3 ดังนั้นเมื่อเทียบต้นทุนที่ใช้ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเกลือบมีอัตราส่วนเฟอริกคลอไรด์ ที่ใช้น้อยกว่าชนิดที่ผลิตจากกะลามะพร้าว จึงทำให้ลดต้นทุนได้มากกว่า อีกทั้งถ่านที่ได้จากเกลือบไม่จำเป็นต้องผ่านการอบ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวค่อนข้างมากเช่นเดียวกับถ่านที่ได้จากกะลามะพร้าว

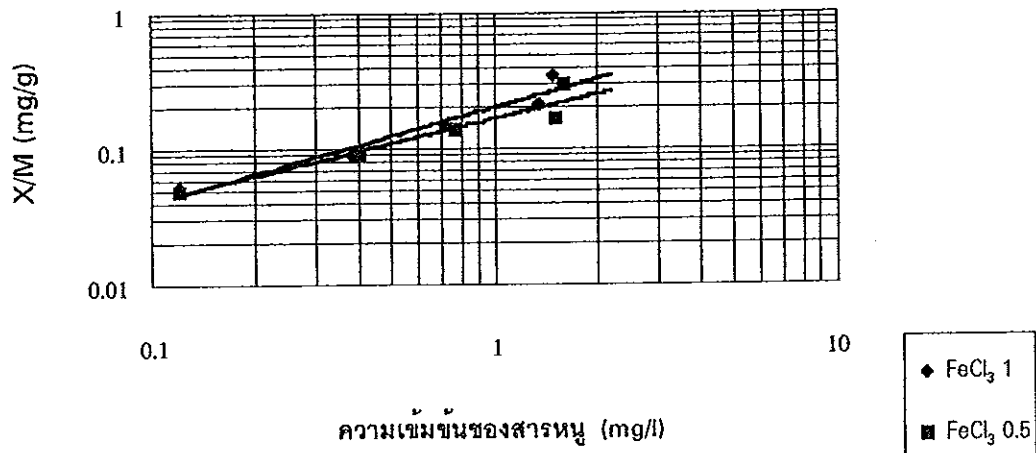
ซึ่งจำเป็นต้องบด ดังนั้นด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงเลือกถ่านกัมมันต์ชนิดเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 ใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

**ตอนที่ 3** เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารหนู ในอัตราส่วนของเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ที่ 1:1 และที่อัตราส่วน 1:0.5

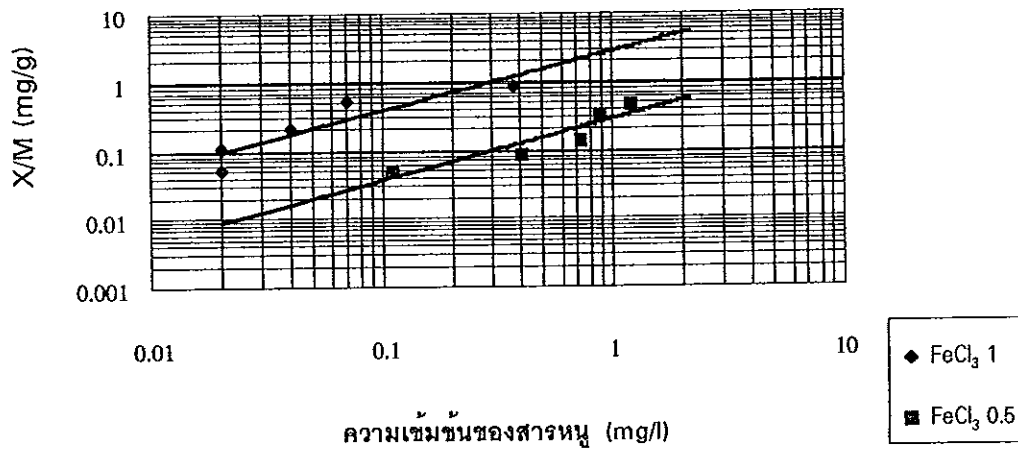
จากการทดลองขั้นต้น พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านที่มีอัตราส่วนมากกว่าในการดูดซับสารหนู การทดลองนี้จึงต้องการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดที่ใช้อัตราส่วนเฟอริกคลอไรด์น้อยลง โดยทำการเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:0.5

**ตาราง 14** เปรียบเทียบความเข้มข้นสารหนูที่เหลือในน้ำของถ่านเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5

ชนิดของสารหนู	น้ำหนัก (g)	ความเข้มข้นของสารหนู (mg/l)	
		เกลบ: FeCl <sub>3</sub> 1:1	เกลบ: FeCl <sub>3</sub> 1:0.5
Arsenic(III)	0.0	2.19	2.19
	0.1	1.49	1.60
	0.2	1.34	1.51
	0.5	0.72	0.76
	1.0	0.38	0.40
	2.0	0.12	0.12
Arsenic(V)	0.0	2.16	2.16
	0.1	0.37	1.20
	0.2	0.07	0.88
	0.5	0.04	0.72
	1.0	0.02	0.40
	2.0	0.01	0.11

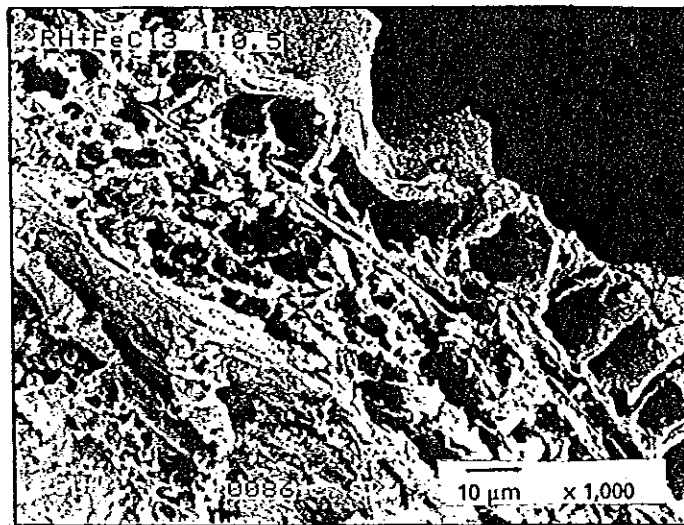


ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบไอโซเทอรัมการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 ของถ่าน  
กัมมันต์ชนิดเกลบ ต่อ  $\text{FeCl}_3$  ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5



ภาพประกอบ 30 เปรียบเทียบไอโซเทอรัมการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ของถ่าน  
กัมมันต์ชนิดเกลบ ต่อ  $\text{FeCl}_3$  ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:0.5

หมายเหตุ X/M เท่ากับ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบ 31 : แสดงโครงสร้าง พื้นผิวถ่านกัมมันต์ชนิด เกลบ: FeCl<sub>3</sub> 1:0.5

จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารหนูของถ่านกัมมันต์ จากเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วนที่ 1:1 และ 1:0.5 ปรากฏว่าสารหนูวาเลนที่ 3 ที่เหลืออยู่ในน้ำมีค่าลดลงในปริมาณใกล้เคียงกัน แต่จะเห็นได้ชัดเจนในสารหนูวาเลนที่ 5 ซึ่งในอัตราส่วน 1:1 จะเหลือความเข้มข้นของสารหนูในน้ำน้อยกว่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในอัตราส่วน 1:0.5 ดังแสดงในตาราง 14 และจากภาพประกอบ 29 และ 30 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเกลบ และเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่า สำหรับถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 1:0.5 จะให้ค่า K เท่ากับ 0.17 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1/n เท่ากับ 0.60 ในสารหนูวาเลนที่ 3 และสารหนูวาเลนที่ 5 จะให้ค่า K เท่ากับ 0.29 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่า 1/n เท่ากับ 0.89 ซึ่งเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิด 1:1 พบว่าถ่านชนิด 1:1 จะมีค่า K สูงกว่าในทั้ง 2 วาเลนที่ของสารหนู เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 31 จะเห็นว่าโครงสร้าง ขนาดรูพรุนของถ่านชนิด 1:0.5 จะมีขนาดใหญ่กว่าชนิด 1:1 (ภาพประกอบ 18) และมีบางส่วนไม่เกิดรูพรุนขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของถ่านชนิด 1:1 มีมากกว่า ดังนั้นถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 1:1 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาการดูดซับสารหนูแบบคอลัมน์ต่อไป สำหรับการใช้เฟอริกคลอไรด์เป็นสารกระตุ้น เพื่อให้เกิดรูพรุนขึ้นในเนื้อถ่านกัมมันต์แล้ว ยังพบว่าเฟอริกคลอไรด์จะเข้าไปจับติดอยู่กับพื้นผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์ในรูป hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)(ดูภาคผนวก จ.) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยา และเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับสารหนูได้ดี

#### การทดลองที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ แบบต่อเนื่อง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ หรือความสามารถในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ ชนิดที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนูจากการทดลองข้างต้น ซึ่งพบว่าเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยเป็นการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column Test) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์หนัก 35 กรัม มีความสูงของชั้นถ่านในคอลัมน์ 30 เซนติเมตร และมีทิศทางการไหลของน้ำแบบ down flow มีอัตราการไหลของน้ำ 2 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านคอลัมน์แล้วทุกๆ ช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู และเหล็กที่อาจถูกชะออกจากถ่านกัมมันต์ โดยแทนความเข้มข้นของสารหนูที่เหลือในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์แล้ว เท่ากับ C และความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น เท่ากับ  $C_0$  หลังจากนั้นสร้าง Breakthrough Curve ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของ C ต่อ  $C_0$  กับปริมาตรของน้ำหลังผ่านคอลัมน์ และกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ของ C ต่อ  $C_0$  กับปริมาตรของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (Bed Volume : BV) ซึ่งในการทดลองนี้ 1 BV เท่ากับ 0.272 ลิตร (ดูภาคผนวก ค.)

ตาราง 15 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ 35 กรัม

เวลา (ชม.)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (Bed Volume)	pH	Arsenic(III) (mg/l)			C/Co (%)
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	เฉลี่ย	
0.2	0.3	1.1	3.2	0.03	0.03	0.03	1.3
0.5	1.0	3.7	3.5	0.15	0.16	0.16	7.7
1.0	2.0	7.4	3.5	0.19	0.19	0.19	9.1
1.5	3.0	11.0	3.7	0.32	0.31	0.32	15.4
2.0	4.0	14.7	3.8	0.40	0.39	0.40	19.2
2.3	4.7	17.2	3.8	0.42	0.42	0.42	20.2
2.7	5.3	19.6	3.8	0.53	0.53	0.53	25.5
3.0	6.0	22.1	3.8	0.61	0.62	0.62	29.8
3.3	6.7	24.5	3.8	0.63	0.63	0.63	30.3
3.8	7.7	28.2	3.8	0.73	0.74	0.74	35.6
4.2	8.3	30.6	3.8	0.77	0.78	0.78	37.5
5.2	10.3	38.0	3.8	0.81	0.80	0.80	38.5
5.5	11.0	40.4	3.9	0.98	0.98	0.98	47.1
5.8	11.7	42.9	4.2	1.01	1.00	1.00	48.1
6.8	13.7	50.3	4.2	1.19	1.19	1.19	57.2
8.0	16.0	58.8	4.4	1.30	1.31	1.31	63.0
9.0	18.0	66.2	4.5	1.58	1.57	1.58	76.0
9.5	19.0	69.9	4.6	1.87	1.87	1.87	89.9
10.0	20.0	73.5	4.8	2.02	2.01	2.02	97.1

หมายเหตุ ความเข้มข้นเริ่มต้น (Co) = 2.08 mg/l

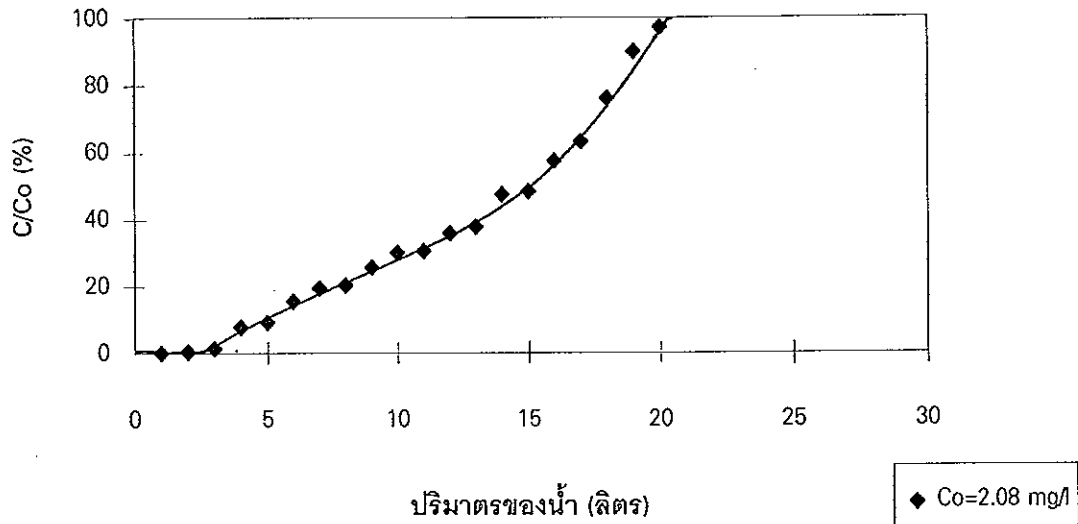


ตาราง 16 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ 35 กรัม  
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (Co) = 1.81 mg/l

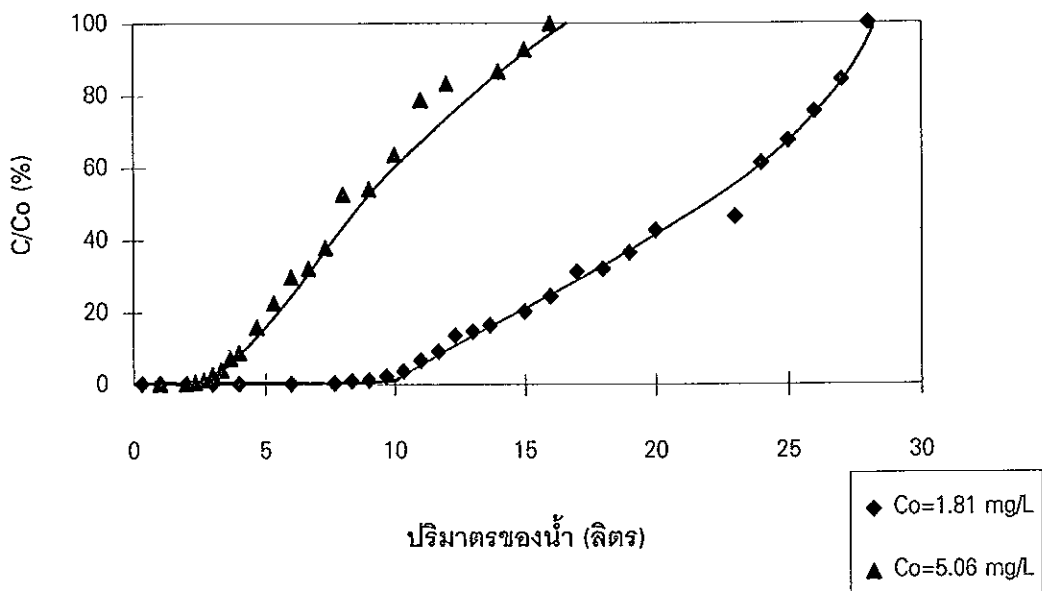
เวลา (ชม.)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (Bed Volume)	pH	As(V) (mg/l)			C/Co (%)
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	เฉลี่ย	
0.5	1.0	3.7	4.1	0.002	0.003	0.003	0.2
1.0	2.0	7.4	4.1	0.003	0.003	0.003	0.2
3.0	6.0	22.1	4.9	0.003	0.003	0.003	0.2
3.8	7.7	28.2	4.9	0.01	0.01	0.01	0.3
4.2	8.3	30.6	4.9	0.02	0.01	0.02	0.9
4.8	9.7	35.6	4.9	0.04	0.04	0.04	2.2
5.2	10.3	38.0	5.0	0.07	0.07	0.07	3.6
5.5	11.0	40.4	5.0	0.12	0.11	0.12	6.6
5.8	11.7	42.9	5.1	0.16	0.16	0.16	9.1
6.2	12.3	45.3	5.2	0.23	0.24	0.24	13.5
6.5	13.0	47.8	5.2	0.27	0.27	0.27	14.6
6.8	13.7	50.3	5.3	0.30	0.29	0.30	16.4
7.5	15.0	55.1	5.3	0.36	0.37	0.37	20.2
8.0	16.0	58.8	5.3	0.44	0.44	0.44	24.4
8.5	17.0	62.5	5.3	0.55	0.56	0.56	31.2
9.0	18.0	66.2	5.3	0.58	0.58	0.58	31.9
9.5	19.0	69.9	5.3	0.66	0.65	0.66	36.4
11.5	23.0	84.6	5.3	0.83	0.84	0.84	46.4
12.0	24.0	88.2	5.3	1.10	1.11	1.11	61.2
12.5	25.0	91.9	5.3	1.22	1.22	1.22	67.4
13.0	26.0	95.6	5.3	1.37	1.37	1.37	75.5
13.5	27.0	99.3	5.3	1.53	1.53	1.53	84.3
14.0	28.0	102.9	5.3	1.80	1.81	1.81	100.0

ตาราง 17 ค่าความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 5 ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ 35 กรัม  
ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (Co) = 5.06 mg/l

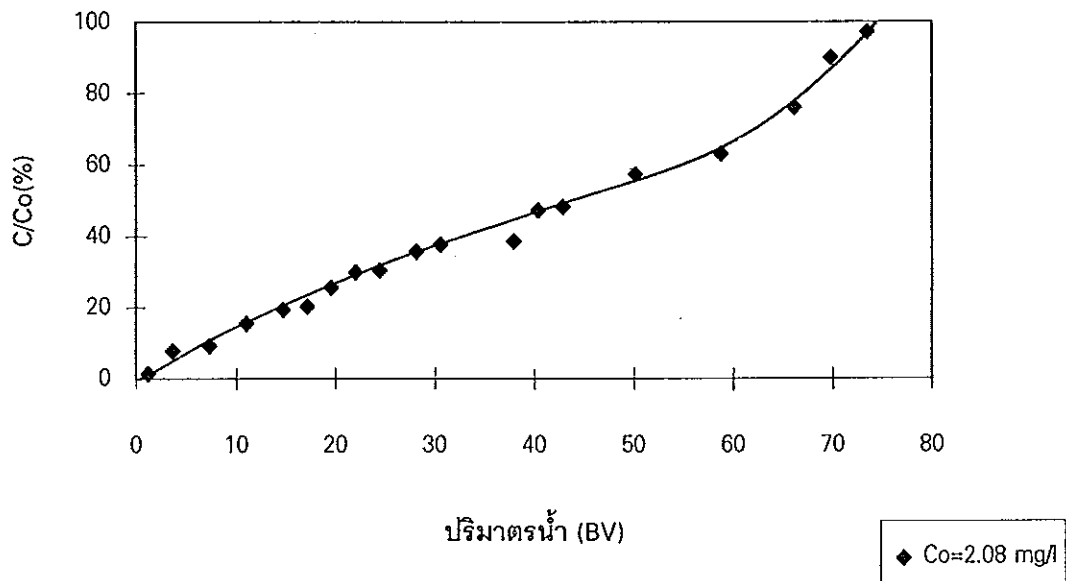
เวลา (ชม.)	ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (Bed Volume)	pH	Arsenic(III) (mg/l)			C/Co (%)
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	เฉลี่ย	
0.5	1.0	3.7	3.9	0.005	0.006	0.006	0.1
1.0	2.0	7.4	4.0	0.01	0.01	0.01	0.2
1.2	2.3	8.6	4.0	0.03	0.03	0.03	0.6
1.3	2.7	9.8	4.2	0.06	0.06	0.06	1.2
1.5	3.0	11.0	4.2	0.13	0.14	0.14	2.8
1.7	3.3	12.2	4.2	0.20	0.21	0.20	4.0
1.8	3.7	13.5	4.2	0.36	0.36	0.36	7.1
2.0	4.0	14.7	4.4	0.45	0.44	0.44	8.7
2.3	4.7	17.2	4.4	0.79	0.80	0.80	15.8
2.7	5.3	19.6	4.4	1.13	1.14	1.14	22.5
3.0	6.0	22.1	4.4	1.49	1.50	1.50	29.6
3.3	6.7	24.5	4.4	1.62	1.62	1.62	32.0
3.7	7.3	26.9	4.6	1.91	1.91	1.91	37.7
4.0	8.0	29.4	4.8	2.66	2.65	2.66	52.6
4.5	9.0	33.1	4.8	2.75	2.71	2.73	54.0
5.0	10.0	36.8	4.8	3.20	3.21	3.21	63.4
5.5	11.0	40.4	5.0	3.97	3.98	3.98	78.7
6.0	12.0	44.1	5.1	4.21	4.21	4.21	83.2
7.0	14.0	51.5	5.2	4.37	4.38	4.38	86.6
7.5	15.0	55.1	5.2	4.69	4.69	4.69	92.7
8.0	16.0	58.8	5.3	5.05	5.04	5.05	99.8



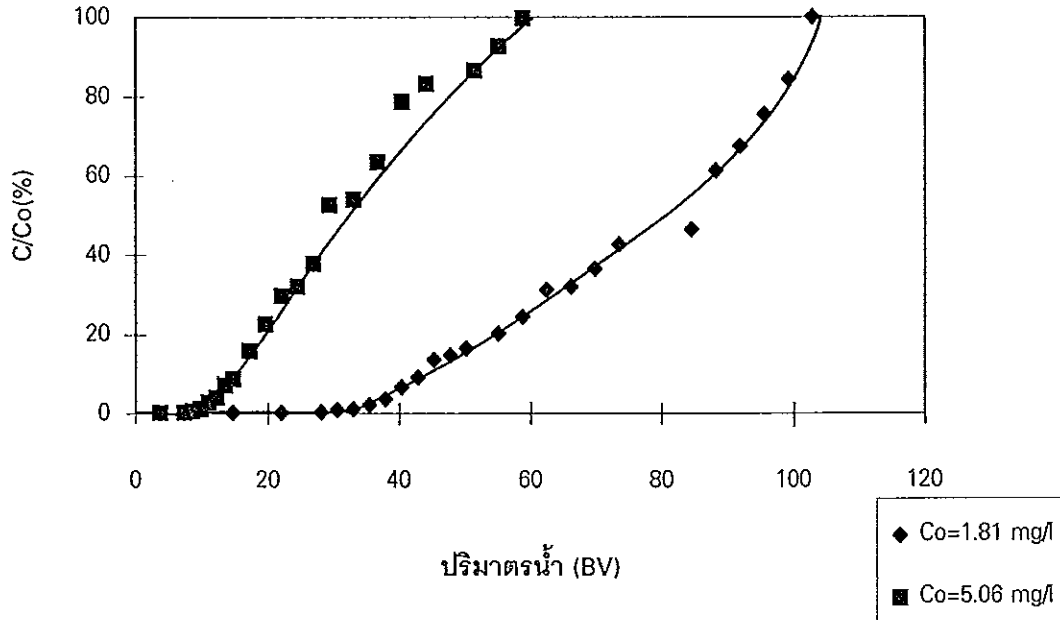
ภาพประกอบ 32 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3



ภาพประกอบ 33 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5



ภาพประกอบ 34 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3



ภาพประกอบ 35 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5

หมายเหตุ BV เท่ากับ ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์

จากผลการทดลองในตาราง 15-17 พบว่า น้ำด่างอย่างทีผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีพีเอชในช่วง 3.2-5.5 นั่นคือในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกจะมีพีเอชต่ำ แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 5.5 เมื่อเวลาผ่านไป โดยมีพีเอชในน้ำเริ่มต้นเป็น 6.7 ซึ่งจาก Eh-pH ไดอะแกรมในภาพประกอบ 5 พบว่าสารหนูวาเลนซี 5 จะอยู่ในรูปของ arsenic acid( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ) และสารหนูวาเลนซี 3 อยู่ในรูป arsenious acid( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) ในพีเอชช่วงที่ได้ ซึ่งสปีชีส์ของสารหนูดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการถูกดูดซับได้ดีในช่วงพีเอชตั้งแต่ 4-7 (Gupta and Chen, 1978) ดังนั้นช่วงพีเอชที่ได้จากการทดลอง จึงเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนู สำหรับความเข้มข้นของสารหนูพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการกรองน้ำผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์นานขึ้น จนกระทั่งเวลา ณ จุดหนึ่ง ความเข้มข้นของสารหนูจะมีค่าเท่ากับ ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้นที่ผ่านเข้าสู่ระบบการกรอง โดยในระยะแรก ปริมาณสารหนูลดลง เนื่องจากถ่านที่มีประจุของเหล็กอยู่ จะมีประจุเป็นบวกที่พื้นผิว ทำให้สามารถจับกับสารหนูที่มีประจุลบในรูปของ  $\text{HAsO}_4^{2-}$  ได้ดีกว่า ดังนั้นสารหนูวาเลนซี 5 จึงมีแนวโน้มการเพิ่มความเข้มข้นขึ้นช้ากว่าสารหนูวาเลนซี 3 ซึ่งไม่มีประจุ จนถึงเป็นบวก แสดงว่าสารหนูวาเลนซี 5 ถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ดีกว่าสารหนูวาเลนซี 3 ดังภาพประกอบ 32-35 และเมื่อประจุเหล็กบนถ่านกัมมันต์จับกับสารหนูหมดแล้ว ถ่านกัมมันต์นั้น จะไม่สามารถดูดซับสารหนูที่เข้ามาใหม่ได้ จึงทำให้น้ำที่ออกจากคอลัมน์ในระยะหลังมีปริมาณสารหนูสูงขึ้น เนื่องจากไม่สามารถถูกดูดซับได้อีกนั่นเอง

จากภาพประกอบ 32 และ 33 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และวาเลนซี 5 ตามลำดับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ (1:1) ดังนั้นจะได้ว่า ถ่านกัมมันต์ 1 กรัมสามารถดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 เท่ากับ 0.48 มิลลิกรัม สำหรับสารหนูวาเลนซี 5 ในความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถคำนวณการดูดซับได้เท่ากับ 0.82 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และในความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5.06 มิลลิกรัมต่อลิตร จะคำนวณการดูดซับได้เท่ากับ 1.02 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในคอลัมน์ ไม่ได้มีการกำหนดขนาดที่แน่นอน หรือไม่ได้มีการคัดขนาดก่อน ประกอบกับถ่านชนิดที่ทำมาจากเกลบ ค่อนข้างมีความเปราะ แตกหัก เป็นผงเล็ก ๆ ได้ง่าย จึงเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ที่คำนวณได้จากความเข้มข้นต่าง ๆ มีค่าต่างกันออกไป อย่างไรก็ตาม หากถ่านกัมมันต์มีขนาดเล็ก หรือแตกหักเป็นผง ย่อมทำให้ความสามารถในการดูดซับดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มากขึ้น เช่นกัน และจากงานวิจัยของ Maeda, et al.(1992) ได้ใช้หินปะการังที่มีเฟอริกไฮดรอกไซด์ดูดซับสารหนู พบว่า ความจุของการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 เท่ากับ 13 ไมโครกรัมต่อกรัม และสารหนูวาเลนซี 5 เท่ากับ 15 ไมโครกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าถ่าน

กัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ (1:1) มีคุณสมบัติใช้ในการดูดซับสารหนูได้ดีกว่า ตัวดูดซับที่ได้จากปะการังที่มีเฟอริกไฮดรอกไซด์อยู่ และจากภาพประกอบ 34-35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ กับปริมาตรของน้ำในหน่วย Bed Volume ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้ปฏิบัติต่อไป

สำหรับปริมาณเหล็กที่ถูกชะออกจากถ่านกัมมันต์ในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ ตรวจไม่พบ(ND) เนื่องจากมีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลก ยอมรับได้ในน้ำดื่ม

### การทดลองที่ 5 การลดปริมาณสารหนู โดยใช้น้ำจากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

จุดประสงค์ของการทดลองนี้ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ชนิด แกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 โดยทดลองใช้น้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจากพื้นที่จริง ซึ่งทำการเก็บตัวอย่างน้ำในเดือน พฤษภาคม พบว่า น้ำตัวอย่างที่ได้มีสีเหลืองค่อนข้างขุ่น มีตะกอนขนาดเล็กแขวนลอยในน้ำ และมีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 2.48 มิลลิกรัมต่อลิตร และตั้งทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้น้ำตกตะกอนตามธรรมชาติ ปรากฏว่า น้ำหลังผ่านการตกตะกอนมีความเข้มข้นของสารหนูคงเหลือ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากสารหนูวาเลนซี 5 สามารถเกิดการตกตะกอนร่วมกับสารแขวนลอยในน้ำ และติดกับผิวภาชนะเก็บตัวอย่าง ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูลดต่ำลง หลังจากนั้นจึงนำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนตามธรรมชาติแล้ว มาผ่านกระบวนการดูดซับ ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้

#### ตอนที่ 1 การทดสอบแบบคอลัมน์ (Column Test)

นำน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน หลังจากตกตะกอน ผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมไว้ ด้วยอัตราเร็ว 2 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้น้ำหนักถ่านกัมมันต์ 35 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำหลังผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ทุก ๆ ช่วงเวลา เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำต่อไป

ตาราง 18 ผลการวิเคราะห์น้ำตัวอย่าง จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 อ.ร้อนพิบูลย์  
หลังผ่านการตกตะกอนตามธรรมชาติ

Parameter	ผลการวิเคราะห์	
	น้ำผ่านการตกตะกอน	น้ำหลังผ่านการกรอง
pH	7.0	7.0
Alkalinity	289 mg/L as CaCO <sub>3</sub>	244 mg/L as CaCO <sub>3</sub>
Hardness	261 mg/L as CaCO <sub>3</sub>	222 mg/L as CaCO <sub>3</sub>
ปริมาณสารหนู	0.40 mg/L	*
ปริมาณเหล็ก	-	nd
ปริมาณฟอสเฟต	4.07 mg/L	-
ปริมาณซัลเฟต	8.56 mg/L	-

หมายเหตุ \* เป็นความเข้มข้นของสารหนู โดยขึ้นกับปริมาตร หรือเวลาที่ใช้ในการกรอง  
nd เท่ากับ Not detect (< 0.3 mg/L)

ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำก่อน และหลังผ่านการกรอง แสดงในตาราง 18 ซึ่งพบว่าน้ำตัวอย่างก่อน และหลังผ่านการกรอง จะมีพีเอชคงที่ และมีค่าความเป็นด่างที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสภาวะที่มีค่าความเป็นด่างสูง แสดงถึงความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของพีเอช(มันส์ิน ตันซุลเวคม์, 2538) ดังนั้นน้ำตัวอย่างจึงคงสภาวะพีเอชของน้ำตามธรรมชาติ หลังผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ สำหรับค่าความเป็นด่าง และความกระด้างจะลดลงเล็กน้อยหลังผ่านการกรอง เนื่องจากมีอิออนต่างๆ อยู่ในน้ำธรรมชาติ เมื่อผ่านการกรองก็จะมีอิออนบางส่วนที่ติดไปกับพื้นผิวของตัวกรอง จึงทำให้ความเป็นด่าง และความกระด้างลดลงเพียงเล็กน้อย ขณะเดียวกันสารหนูในน้ำสามารถถูกดูดซับในรูปแบบทางกายภาพ และเคมี ซึ่งผลจากการลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำตัวอย่าง จากตำบลร้อนพิบูลย์แสดงในตาราง 19 นอกจากนี้สามารถแสดงความแตกต่างได้ชัดเจนระหว่างสีของน้ำดิบ น้ำผ่านการตกตะกอน และน้ำที่ผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ได้ดังภาพประกอบ 36 ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปสร้าง Breakthrough Curve ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 37-38

ตาราง 19 ค่าความเข้มข้นของสารหนูในน้ำหลังผ่านคอลัมน์ จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12  
อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

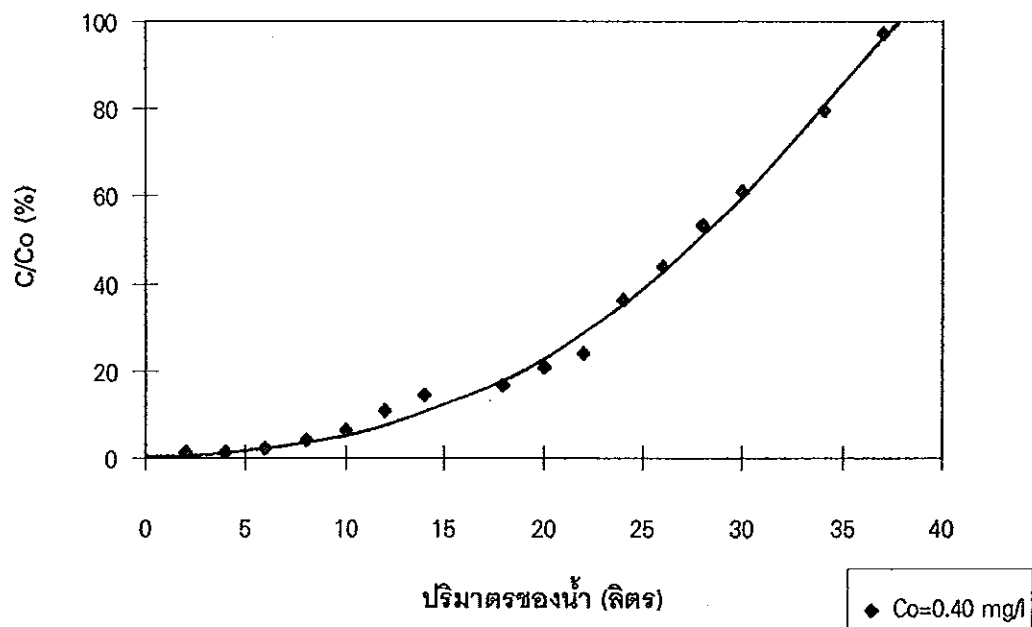
เวลา (ชม.)	ปริมาตร (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (Bed Volume)	pH	Arsenic (mg/l)			C/Co(%)
				ซ้ำ 1	ซ้ำ 2	เฉลี่ย	
1.0	2.0	7.4	6.8	0.004	0.006	0.005	1.3
2.0	4.0	14.7	7.0	0.004	0.006	0.005	1.3
3.0	6.0	22.1	7.0	0.009	0.009	0.009	2.3
4.0	8.0	29.4	7.0	0.02	0.03	0.02	4.0
5.0	10.0	36.8	7.0	0.03	0.03	0.03	6.5
6.0	12.0	44.1	7.0	0.03	0.04	0.04	11.0
7.0	14.0	51.5	7.0	0.05	0.06	0.06	14.5
9.0	18.0	66.2	7.0	0.06	0.07	0.07	16.8
10.0	20.0	73.5	7.0	0.08	0.08	0.08	21.0
11.0	22.0	80.9	7.0	0.09	0.10	0.10	24.0
12.0	24.0	88.2	7.0	0.14	0.14	0.14	36.0
13.0	26.0	95.6	7.0	0.17	0.18	0.18	44.0
14.0	28.0	102.9	7.0	0.21	0.21	0.21	53.5
15.0	30.0	110.3	7.0	0.25	0.24	0.25	61.3
17.0	34.0	125.0	7.0	0.32	0.33	0.32	79.8
18.5	37.0	136.0	7.0	0.39	0.39	0.39	97.3

หมายเหตุ ความเข้มข้นเริ่มต้น (Co) = 0.40 mg/l



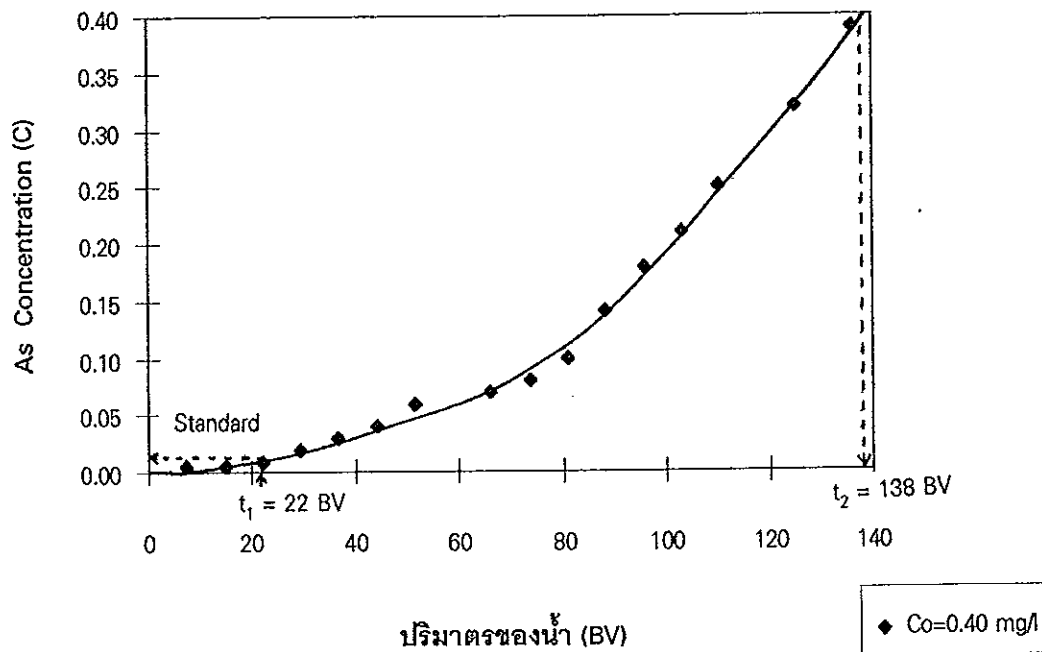


ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะสีของน้ำดิบก่อน และ หลังผ่านการกรอง  
ด้วยถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบ 37 แสดง Breakthrough Curve ระหว่าง C/Co(%) กับ ปริมาตรของน้ำ(ลิตร)  
จาก อ.ว่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

หรือ เมื่อคิดแทน X เป็นปริมาณน้ำในหน่วย Bed Volume ได้ดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 แสดง Breakthrough Curve ระหว่างความเข้มข้นของสารหนู กับปริมาณน้ำ (Bed Volume) จาก อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

จากภาพประกอบ 37 เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ปริมาตรของน้ำที่ผ่านการกรองย่อมมากขึ้น ปริมาณสารหนูก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ในช่วงระยะเวลาช่วงแรก น้ำที่ผ่านการกรองจะมีปริมาณสารหนู ต่ำกว่าค่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลกที่ตั้งไว้ (0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร) และจากการคำนวณถ่านกัมมันต์ 1 กรัมสามารถดูดซับสารหนูได้ 0.23 มิลลิกรัม จากภาพประกอบ 38 น้ำที่ผ่านการกรอง และมีปริมาณสารหนู ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด สามารถพิจารณาได้จากค่า  $t_1$  ซึ่งแทนอายุของถ่านกัมมันต์ได้ เท่ากับ 22 BV และ  $t_2$  แทนอายุของถ่านกัมมันต์ที่ใช้จนหมดประสิทธิภาพการดูดซับ เท่ากับ 138 BV (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ค.) ซึ่งอายุของถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบการกรองเป็นแบบระบบ 2 หรือ 3 คอลัมน์ต่อไป สำหรับน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว ตรวจไม่พบปริมาณเหล็กที่ถูกชะออกจากถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

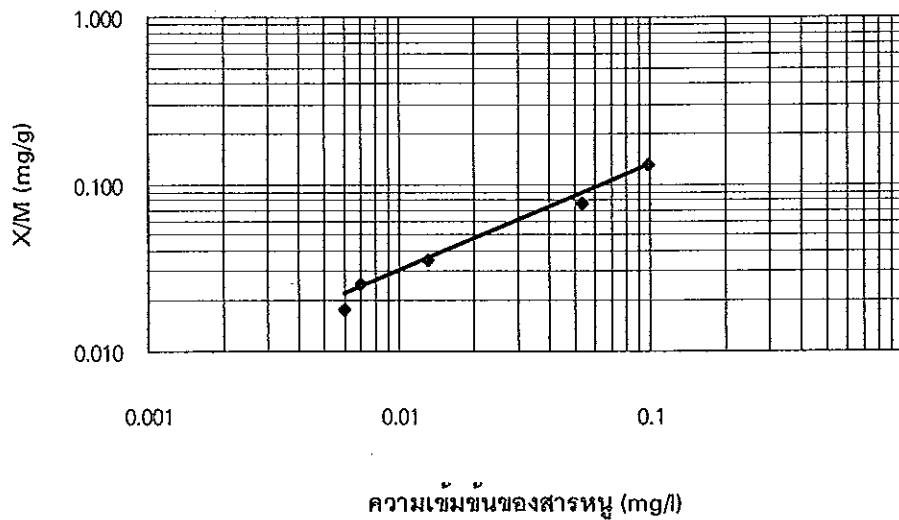
## ตอนที่ 2 การทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test)

จุดประสงค์การทดสอบนี้ เพื่อยืนยันความสามารถในการดูดซับสารหนูของถ่านกัมมันต์แบบคอลัมน์ โดยใช้น้ำที่ปนเปื้อนสารหนูจากพื้นที่จริง ด้วยการเตรียมน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ 0 0.1 0.2 0.5 0.7 และ 1 กรัม ในน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตร แยกน้ำใส เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำ

ตาราง 20 แสดงความเข้มข้นของสารหนูในน้ำแบบไม่ต่อเนื่อง จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 อ. ร่อนพิบูลย์ จ. นครศรีธรรมราช

น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g)	pH	ความเข้มข้นสารหนู (mg/L)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย
0	7.0	0.365	0.359	0.362
0.1	7.0	0.109	0.088	0.098
0.2	7.0	0.051	0.056	0.054
0.5	7.0	0.011	0.015	0.013
0.7	7.0	0.008	0.006	0.007
1.0	7.0	0.007	0.005	0.006

จากการทดลองในตาราง 20 พบว่า เมื่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณสารหนูในน้ำมีค่าลดลงจากความเข้มข้นเริ่มต้น โดยมีความเข้มข้นสารหนู เท่ากับ 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำตัวอย่างมีค่าความเป็นด่างสูง ทำให้มีความสามารถทนทานต่อกรดได้ดี พีเอชของน้ำตัวอย่างจึงมีค่าคงที่ที่ 7.0 และผลการทดลองที่ได้นำไปแสดง Adsorption Isotherm ดังภาพประกอบ 39 ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณการดูดซับสารหนูแบบไม่ต่อเนื่องได้จาก ค่า K ในสมการของ Freundlich ซึ่งได้เท่ากับ 0.56 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบ 39 แสดงไอโซเทิร์มการดูดซับสารหนูออกจากตัวอย่างน้ำของ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช

หมายเหตุ X/M เท่ากับ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อปริมาณถ่านกัมมันต์

จากการทดลองที่ 4 และ 5 เป็นการใช้น้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจากการสังเคราะห์ขึ้นเอง และน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจากพื้นที่จริง โดยพบว่า น้ำจากพื้นที่จริง จะมีปริมาณการดูดซับได้น้อยกว่า น้ำที่ได้จากการสังเคราะห์ เนื่องจากน้ำในสภาพจริงมีอิออนต่าง ๆ มากมายรวมอยู่ในน้ำ ซึ่งจากงานวิจัยของ Maeda, et al.(1992) พบว่า อิออนของฟอสเฟต ซึ่งมีอยู่ในน้ำตามธรรมชาติ มีผลรบกวนต่อการดูดซับสารหนู โดยสามารถตรวจพบ ปริมาณฟอสเฟตในน้ำ เท่ากับ 4.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้สามารถรบกวนการดูดซับสารหนูประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณซิลเฟต เท่ากับ 8.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจากงานวิจัยของ Hering, et al.(1997) พบว่า อิออนของซิลเฟตมีผลต่อการดูดซับสารหนูได้เช่นกัน ซึ่งอิออนต่างๆ เหล่านี้ มีขนาดใกล้เคียงกับอิออนของสารหนูในน้ำ (Ferguson and Gavis, 1972) อีกทั้งยังเป็นอิออนที่มีประจุลบ จึงมีความไวในการจับกับพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่มีประจุบวกของเหล็กได้ดีเช่นกัน

## บทที่ 4

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

#### บทสรุป

การศึกษาการลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นเองจากแกลบ และกะลามะพร้าว ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารกระตุ้น 2 ชนิด คือ กลีโกลแกง และเพอริกคลอไรด์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 3 และสารหนูวาเลนซี 5 ในถ่านกัมมันต์ที่เตรียมขึ้นจากการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งการทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมถ่านกัมมันต์ และคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาหาความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง และไม่ต่อเนื่อง ด้วยน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนจากการสังเคราะห์ในห้องทดลอง และการนำน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อนในน้ำป่อ จากอำเภอรัตนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช มาทำการทดสอบกับถ่านกัมมันต์ที่ได้คัดเลือกแล้ว เป็นแบบต่อเนื่อง

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการทดลองที่ 1 ถึงการทดลองที่ 2 ซึ่งศึกษาสมรรถนะของถ่านกัมมันต์เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบ ต่อสารกระตุ้น โดยใช้ค่าไอโอดีนเป็นตัวตัดสินพบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตจากกะลามะพร้าว จะให้ค่าไอโอดีนสูงสุดที่อัตราส่วน 1:3 ของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นทั้ง 2 ชนิด และถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตจากแกลบ จะให้ค่าไอโอดีนสูงสุดที่อัตราส่วน 1:1 ของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นทั้ง 2 ชนิด หลังจากนั้นในการทดลองที่ 2 นำถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่ถูกคัดเลือกแล้วไปศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นผิว ความเป็นรูพรุน ด้วยกล้อง Scanning Electron Microscope(SEM) เปรียบเทียบกับวัตถุดิบก่อนทำการเผา พบว่า หลังจากเผาแล้ว จะมีรูพรุน เกิดขึ้นมากมายในพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ดังในภาพประกอบ 13-18 และลักษณะโครงสร้าง ความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เห็น จะมีความสัมพันธ์กับค่าไอโอดีนที่ได้จากการทดลองที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดลองที่ 3 ถึงการทดลองที่ 4 จากการทดลองที่ 3 พบว่า การดูดซับระยะเวลาในชั่วโมงแรกจะเกิดมาก และเร็วกว่า ในชั่วโมงหลังจะมีความสามารถในการดูดซับได้น้อยลง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย เพอริกคลอไรด์ กับกลีโกลแกง

จากไอโซเทอริมการดูดซับ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย เฟอริกคลอไรด์ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูได้ดีกว่าชนิดที่ใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น จากการศึกษาแบบไม่ต่อเนื่องนี้ สามารถคัดเลือกถ่านกัมมันต์ชนิดที่เหมาะสมต่อการดูดซับสารหนู โดยพิจารณาจากค่า K และ X/M ในสมการ Freundlich ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดที่ผลิตจากแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ต่อเฟอริกคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:3 แต่ถ่านที่ผลิตจากแกลบจะมีต้นทุนต่ำกว่าถ่านที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ดังนั้นในการทดลองที่ 4 จึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์ ที่อัตราส่วน 1:1 โดยการทดลองนี้เป็นการทดสอบความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง จากการคำนวณความสามารถในการดูดซับ พบว่า สารหนูวาเลนซี 3 สามารถถูกดูดซับได้เท่ากับ 0.48 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และสารหนูวาเลนซี 5 ถูกดูดซับได้ในช่วง 0.82-1.02 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ซึ่งเห็นได้ว่าสารหนูวาเลนซี 5 สามารถถูกดูดซับได้มากกว่าสารหนูวาเลนซี 3

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดลอง โดยใช้น้ำบ่อ จากบ้านเลขที่ 28/5 หมู่ 12 ต.ร่อนพิบูลย์ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช เป็นน้ำตัวอย่างในการลดปริมาณสารหนู ซึ่งในน้ำดิบมีความเข้มข้นของสารหนู เท่ากับ 2.48 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำตัวอย่างมีตะกอนแขวนลอยอยู่ในน้ำ มีสีเหลืองขุ่น จึงตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนตามธรรมชาติ ประมาณ 1 คืน พบว่า มีความเข้มข้นของสารหนูในน้ำลดลงเหลือ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นนำน้ำตัวอย่างกรองผ่านถ่านกัมมันต์ชนิดแกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์(1:1) คำนวณความสามารถในการดูดซับสารหนูแบบต่อเนื่อง เท่ากับ 0.23 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และจากการวิเคราะห์ ปริมาณเหล็กที่ถูกชะออกจากถ่านกัมมันต์ พบว่า มีค่าต่ำกว่า 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งองค์การอนามัยโลกยอมให้ปริมาณเหล็กมีได้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำดื่ม (WHO, 1996)

การทดลองลดความเข้มข้นของสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเฟอริกคลอไรด์ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ถ่านที่กระตุ้นด้วยเกลือแกง เนื่องจากในกระบวนการดูดซับ เหล็กที่อยู่บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จะทำปฏิกิริยา เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่ค่อนข้างเสถียรระหว่าง Fe-As ได้ดีในช่วงพีเอช 4-8 (Vircikova, 1995) จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูได้ดี ซึ่งสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูจากงานวิจัยนี้ กับงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 21

ตาราง 21 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนู

สปีชีส์ สารหนู	Adsorbent	ปริมาณสารหนูเริ่มต้น (mg/l)	ประสิทธิภาพการ บำบัด	พีเอช	เอกสารอ้างอิง	หมายเหตุ
As(III)	AC (แกลบ + FeCl <sub>3</sub> (1+1))	2.08	0.48 mg As/g	3.2-4.8	วิทยานิพนธ์ฉบับนี้	น้ำสังเคราะห์
As(V)	"	1.81	0.82 mg As/g	4.1-5.3	"	"
*	"	5.06	1.02 mg As/g	3.9-5.3	"	"
	"	0.40	0.23 mg As/g	6.8-7.0	"	น้ำป่อ
As(III)	Chitin/Chitosan mixture	0.10	0.13 µg As/g	7.5	Elson, et al., 1980	"
As(III)	Hematite	1.0	0.20 mg As/g	7.0	Singh, et al., 1988	น้ำสังเคราะห์
As(III)	Coral + Fe(OH) <sub>3</sub>	5.0	13.0 µg As/g	4.0-10.0	Maeda, et al., 1992	"
As(V)	Coral + Fe(OH) <sub>3</sub>	1.0	15.0 µg As/g	2.0-10.0	Maeda, et al., 1992	"
As(V)	Coconut Coir + amine	0.05	6.44 mg As/g	4.0-6.0	Baes, et al., 1997	น้ำบาดาล+ Add

หมายเหตุ AC เท่ากับ Activated Carbon (ถ่านกัมมันต์)

\* หมายถึง ไม่ได้ระบุสปีชีส์ของสารหนู

## ข้อเสนอแนะ

1. การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยการกรองผ่านถ่านกัมมันต์ มักมีข้อจำกัดทางการใช้ คือ ความเข้มข้นของสารหนูเริ่มต้น และอัตราเร็วในการกรองน้ำผ่าน ซึ่งการดูดซับมักได้ผลดีเมื่อมีปริมาณสารหนูเริ่มต้นไม่สูงนัก จากงานวิจัยที่ศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนูจะเกิดขึ้นได้ดีมาก เมื่อมีปริมาณสารหนูเริ่มต้นไม่มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร หากมีปริมาณสารหนูมากกว่านี้ มักนิยมใช้วิธีการอื่นๆ เช่น การใช้สารเคมีตกตะกอนร่วม เพื่อลดปริมาณสารหนูให้น้อยลงก่อนบำบัดด้วยวิธีการดูดซับ และควรทำการศึกษาอัตราเร็วในการกรองที่ทำให้การลดปริมาณสารหนูมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ผลจากการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 เกิดขึ้นได้ดีกว่าสารหนูวาเลนซี 3 ดังนั้น หากนำไปใช้จริง ควรทำการศึกษาการออกซิไดซ์สารหนูวาเลนซี 3 ให้เป็นสารหนูวาเลนซี 5 ก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในการดูดซับถ่านกัมมันต์ โดยในขั้นตอนการออกซิไดซ์ อาจใช้คลอรีน ซึ่งสามารถทำการฆ่าเชื้อโรคได้ด้วย แต่ต้องพิจารณาความปลอดภัยจากสารคลอรีนที่สามารถตกค้างในน้ำ โดยมีปริมาณคลอรีนตกค้างไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามที่องค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ (WHO, 1981)

3. ควรศึกษาการนำสารกระตุ้นเฟอริกคลอไรด์ ที่ได้หลังผ่านการเผาใช้งานมาแล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยไม่ก่อให้เกิดของเสียเกิดขึ้น

4. ควรศึกษาถึงสภาวะต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสารหนูออกจากถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกรองแล้ว โดยอาจทำให้กลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ หากเกิดสภาวะที่เหมาะสมขึ้น

5. ศึกษาอิทธิพลของอิออนต่างๆ ที่มีผลรบกวนต่อการดูดซับสารหนูในน้ำตามธรรมชาติ

6. ควรทำการกำจัดอิออนต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสารหนูในน้ำตามธรรมชาติออกก่อนทำการกำจัดสารหนู เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด



## บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ กองจัดการคุณภาพน้ำ. 2538. เกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำ และมาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย. กรุงเทพฯ : กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

กรมทรัพยากรธรณี กองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี. 2541. การพัฒนาคุณภาพรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อม สำหรับโครงการเหมืองแร่: การสัมมนาวันที่ 14 สิงหาคม 2541 โดยกระทรวงอุตสาหกรรม

กรมอนามัย กองอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 2531. “รายงานผลการศึกษาเรื่อง สารหนูเป็นพิษที่ร้อนพิบูลย์”, การอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 11 (มกราคม - เมษายน 2531), 7-30.

กรรณิการ์ สิริสิงห์. 2525. เคมีของน้ำ น้ำใสโครก และการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยมหิดล

กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 2530. สารหนู. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ : กรุงเทพฯ (สำเนา)

คณิต กฤษณังกูร และ จงจิตร หิรัญลาภ. 2527. “การทำถ่านกัมมันต์ จากแกลบ”, วารสารวิทยาศาสตร์. 38 (พฤษภาคม - มิถุนายน 2527), 276-284.

จันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2535. ปัญหาพิษสารหนูที่ อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข

ณรงค์ ณ เชียงใหม่. 2534. “ปริมาณสารหนูในแหล่งน้ำ พิษ ผัก ผลไม้ และผมของชาวบ้านตำบลร้อนพิบูลย์ อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช”, วารสารสงขลานครินทร์ 13 (มกราคม - มิถุนายน 2534), 59-67.

คำารง ชุมมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล. 2533. "การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น",  
วิศวกรรมสาร 43 (พฤศจิกายน - ธันวาคม 2533), 96-99.

ตรีรัตน์ ทองบริบูรณ์. 2540. "การปนเปื้อนของสารหนูในพีชน้ำและสัตว์น้ำ บริเวณตำบลร้อนพิบูลย์  
ถึงลุ่มน้ำปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

นิภา มหารัชพงศ์. 2540. "การบำบัดน้ำที่มีสารหนูปนเปื้อน จากอำเภอร้อนพิบูลย์  
จังหวัดนครศรีธรรมราช", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

นราพร หาญจนวนศ์ สุทธิ ตันสุวรรณ และสงวนเกียรติ ล้วนรัตนากร. 2529. "การทำถ่านกัมมันต์  
จากขังข้าวโพด", วารสารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และวิทยาศาสตร์  
5 (ตุลาคม 2529) 291-303.

ประกาย บริบูรณ์. 2539. "การศึกษาการได้รับสารหนูจากการบริโภคอาหารประจำวัน", ความ  
ก้าวหน้าของการศึกษาวิจัย และแนวทางป้องกันโรคพิษสารหนูเรื้อรัง ตำบลร้อน  
พิบูลย์ อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช: รายงานการประชุม วันที่ 11  
มิถุนายน 2539 กองระบาดวิทยา. หน้า 31. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข

มงคล ณ สงขลา และจันทร์เพ็ญ ชูประภาวรรณ. 2539. "สถานการณ์ปัจจุบัน และแนวทาง  
การจัดการปัญหาพิษสารหนูที่อำเภอร้อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช", ความก้าว  
หน้าของการศึกษาวิจัยและแนวทางป้องกันโรคพิษสารหนูเรื้อรัง ตำบลร้อน-  
พิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช : รายงานการประชุม วันที่ 11 มิถุนายน 2539  
กองระบาดวิทยา หน้า 1-6. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข

สุโขทัยธรรมมาริราช,มหาวิทยาลัย. 2538. พิษวิทยาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อม และอาชีวอนามัย  
พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ มสธ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม,สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่าน  
กัมมันต์ มอก. 900-2532. กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

มันสิน ตันทุลเทศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

..... 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไมตรี สุทธิจิตต์. 2531. สารพิษรอบตัว. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. หน้า 93-95.

วรพิน วิทยวราวัฒน์. 2537. "การปนเปื้อนของสารหนู แคดเมียมและตะกั่ว ในลุ่มแม่น้ำปากพ่อง  
จังหวัดนครศรีธรรมราช", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

วิชัย เอกพลากร และ อมรา ทองหงษ์. 2539. "ระบาดวิทยาโรคพิษสารหนู ต.ร่อนพิบูลย์  
อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช", ความก้าวหน้าของการศึกษาวิจัย และแนวทาง  
ป้องกันโรคพิษสารหนูเรื้อรัง ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรี  
ธรรมราช รายงานการประชุม วันที่ 11 มิถุนายน 2539 กองระบาดวิทยา  
หน้า 15-19. กรุงเทพฯ : กระทรวงสาธารณสุข

วิไลพร วณิชย์โรดม. 2536. "การบำบัดสีของน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ โดย  
กระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอน", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (สำเนา)

สมพร ภวการคำดี และ อุดมลักษณ์ ศรีทัศน์ย์. 2531. "สารหนูในสิ่งแวดล้อม",  
วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อม. 11 (มกราคม - เมษายน 2531), 79-90.

เสริมพล รัตสุข. 2524. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และแหล่งชุมชน. พิมพ์  
ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

สำนักวิจัยและพัฒนาฝ่ายข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติและจัดการสิ่งแวดล้อมลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลา.

2539. โครงการจัดสร้างระบบข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการวางแผน  
สุขภาพสิ่งแวดล้อม:เรื่องการแพร่กระจายของสารหนูในแหล่งน้ำอุบิโกคบริโกค  
บริเวณ อ.ร่อนพิบูลย์ จ.นครศรีธรรมราช : รายงานฉบับสมบูรณ์ โดย มหาวิทยาลัย  
สงขลานครินทร์ เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจ และ  
สังคมแห่งชาติ.(สำเนา)

สุรพล อารีย์กุล. 2534. “การแพร่กระจายของสารหนูในสิ่งแวดล้อม” ในเอกสารการประชุม  
ทางวิชาการผลกระทบจากการทำเหมืองแร่ต่อสิ่งแวดล้อม. ณ โรงแรมเชียงใหม่  
ภูคำ. จังหวัดเชียงใหม่ 12-13 พฤษภาคม 2531

อรรถรงค์ เมธาติลกกุล และคณะ. 2531. “โรคพิษอาร์เซนิกในคนงานร่อนแร่ จังหวัดนครศรีธรรมราช  
พ.ศ.2530”, การอนามัยและสิ่งแวดล้อม. 12 (มกราคม - เมษายน 2531), 83-98.

อารี สุวรรณมณี. 2533. “การแพร่กระจายของสารหนูในสภาพแวดล้อม อำเภอร่อนพิบูลย์  
จังหวัดนครศรีธรรมราช”, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ  
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา)

APHA, AWWA and WEF. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and  
Wastewater. 18th ed. New York : American Public Health Association.

AWWA. 1991. AWWA Standard for Granular Activated Carbon. Approved by American  
National Standards Institute, Inc.,Nov. 1990 : American Water Works Association.

Arrykul, S., Kooptarnon, K. and Wittayawarawat, W. 1996. “Contamination of Arsenic,  
Cadmium and Lead in Pakphanang River Basin,NaKhon Si Thammarat, Thailand”, In  
International Symposium on Geology and Environment. (31 Jan-2 Feb).  
pp. 309-318. Chiangmai.

- Azcue, J.M. and Nriagu, J.O. 1994. "Arsenic : Historical Perspectives", In *Arsenic in Environmental Part 1 : Cycling and Characterization*, pp 1-16. Nriagu, Jerome O.,ed. Wiley, New York.
- Baes, A.U., Okuda, T., Nishijima, W., Shoto, E. and Okuda, M. 1997. "Adsorption and Ion Exchange of Some Groundwater Anion Contaminants in an Amine Modified Coconut Coir", *Water Science and Technology*. 35(1997), 89-95.
- Bhattacharya, S.C. and Shrestha, R.M. 1990. *Biocoal Technology and Economics*. RERIC, AIT, Bangkok.
- Boyle, R.W., and Jonasson, I.R. 1973. "The Geochemistry of Arsenic and Its Use as Indicator Element in Geochemistry Prospecting", *Journal of Geochemical Exploration*. 2(1973), 272-279.
- Broughton, C.W. 1981. "Principle of Liquid-Phase Adsorption", In *Application of Adsorption to Wastewater Treatment*. pp. 29-66. Eckenfelder, Wealey W.Jr.,eds. T.N. Enviro Press, Inc.
- Dandy, A.J. 1977. "Production and Characterisation of Activated Carbons from Agricultural Waste Products and Wood Charcoals", *Zealand Journal of Science*. 20(1977), 291-295.
- Darland, J.E. and Inskeep, W.P. 1997. "Effect of Pore Water Velocity on the Transport of Arsenate", *Environmental Science & Technology*. 31(1997), 704-709.
- Dickerson, O.B. 1980. "Arsenic", In *Metals in the Environment*. pp. 1-22. H.A. Waldron Academic Press, Inc.(London) Ltd.

- Eisler Ronald. 1994. "A Review of Arsenic Hazards to Plants and Animals with Emphasis on Fishery and Wildlife Resources", In *Arsenic in the Environment, Part II : Human Health and Ecosystem Effects.*, pp. 185-259. Nriagu, Jerome O., ed. Wiley, New York.
- Elson, C.M., Davies, D.H., and Hayes, E.R. 1980. "Removal of Arsenic from Contaminated Drinking Water by a Chitosan/Chitin mixture", *Water Research*. 14(1980), 1307-1311.
- Ferguson, J.F. and Gavis, J. 1972. "A Review of the Arsenic Cycle in Natural Water", *Water Research Pergamon Press*. 6(1972), 1259-1274.
- Ford, D.L. 1981. "Wastewater Characteristic and Treatment", In *Activated Carbon Adsorption for Wastewater Treatment*. pp. 1-27. Perrich J.R., eds. Fla.:CRC Press, Inc.
- Gil, E.P. and O.stapczuk, P. 1994. "Potentiometric Stripping Determination of Mercury(II), Selenium(IV), Copper(II) and Lead(II) at a Gold Film Electrode in Water Samples", *Analytica Chimica Acta*. 293(1994), 55-65.
- Gulledge, J.H. and O'Connor, J.T. 1973. "Removal of Arsenic(V) from Water by Adsorption on Aluminum and Ferric Hydroxides", *Journal American Water Work Association*. 65(1973), 548-552.
- Gupta, S.K. and Chen, K.Y. 1978. "Arsenic Removal by Adsorption", *Journal of Water Pollution Control and Federation*. 50(1978), 493-506.
- Hassler, J.W. 1963. *Activated Carbon*. N.Y. : Chemical Publishing Company, Inc.
- Hassler, J.W. 1974. *Purification with Activated Carbon*. N.Y. : Chemical Publishing Company, Inc.

- Hathaway, S.W. and Rubel, F.J. 1987. "Removing Arsenic from Drinking Water", *Journal American Water Work Association*. 79(1987), 61-65.
- Hering, J.G., Chen, P.Y., Wilkie, J.A. and Elimelech, M. 1997. "Arsenic Removal From Drinking Water During Coagulation", *Journal of Environmental Engineering* 123(1997), 800-807.
- Huang, C.P. and Fu, P.L.K. 1984. "Treatment of Arsenic(V) Containing Water by Activated Carbon Process", *Journal of Water Pollution Control and Federation*. 56(1984), 233-242.
- Huang, C.P. and Vane, L.M. 1989. "Enhancing As<sup>5+</sup> Removal by Fe<sup>2+</sup>-treated Activated Carbon", *Journal of Water Pollution Control and Federation*. 61(1989), 1596-1603.
- Inorganic Contaminants Research Committee. 1993. "Committee Report : Research Needs for Inorganic Contaminants", *Journal American Water Work Association*. 85(1993), 106-113.
- Jagner, D. 1994. "Determination of Arsenic by Stripping Potentiometry on Gold Electrodes Using Partial Least-Square(PLS) Regression Calibration", *Electroanalysis* 6(1994), 201-208.
- Jekel, R.M. 1994. "Removal of Arsenic in Drinking Water Treatment", In *Arsenic in Environmental Part 1: Cycling and Characterization*, pp. 119-132. Nriagu, Jerome O.,ed. Wiley, New York.
- Joshi, A. and Chaudhuri, M. 1996 "Removal of Arsenic from Ground Water by Iron Oxide-Coated Sand", *Journal of Environmental Engineering*. 122(1996), 769-771.
- Kinoshita, K. 1978. *Carbon Electrochemical and Physicochemical Properties*. N.Y: John Wiley & Sons, Inc.

- Krause, E. and Ettl, V.A. 1989. "Solubilities and Stabilities of Ferric Arsenate Compounds", *Hydrometallurgy*. 22(1989), 311-337.
- Kuhlmeier, P.D. and Sherwood, S.P. 1996. "Treatability of Arsenic and Organoarsenicals in Groundwater", *Water Environment Research*. 68(1996), 946-951.
- Liebscher, K. and Smith, H. 1968. "Arsenic in Tissue", *Arch Environmental Health*. 20(1968), 50-54.
- Maeda, S., Ohki, A., Shunsuke, S. and Naka, K. 1992. "Iron (III) Hydroxide-Loaded Coral Limestone as an Adsorbent for Arsenic(III) and Arsenic(V)", *Separation Science and Technology*. 25(1992), 681-689.
- Metcalf and Eddy. 1991. *Wastewater Engineering Treatment Disposal and Reuse*. 3<sup>rd</sup> ed. Tchobanoglous, G. ed. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 314-317.
- Mok, M.W. and Wai, C.M. 1994. "Mobilization of Arsenic in Contaminated River Water" In *Arsenic in Environmental, Part 1 : Cycling and Characterization*. pp. 99-117. Nriagu, Jerome O., ed. Wiley, New York.
- Moore, J.N., Ficklin, W.H., Johns, C. 1988. "Partitioning of Arsenic and Metals in Reducing Sulfidic Sediments", *Environmental Science and Technology*. 22(1988), 432-437.
- Ostapczuk, P. 1993. "Present Potentials and Limitations in the Determination of Trace Elements by Potentiometric Stripping Analysis", *Analytica Chimica Acta*. 273(1993), 35-40.
- Papassiopi, N., Vircikova, E., Nenov, V., Kontopoulos, A and Molnar, L. 1996. "Removal and Fixation of Arsenic in form of Arsenate : Three Parallel Experimental Studies", *Hydrometallurgy*. 41(1996), 243-253.



- Pierce, M.L. and Moor, C.B. 1980. "Adsorption of Arsenite on Amorphous Iron Hydroxide from Dilute Aqueous Solution", *Environmental Science and Technology*. 14(1980), 214-216.
- Pontius, F.W., Brown, K.G. and Chen, C.J. 1994. "Health Implications of Arsenic in Drinking Water", *Journal American Water Work Association*. 86(1994), 52-63.
- Rajakovic, L.V. and Mitrovic, M.M. 1992. "Arsenic Removal from Water by Chemisorption Filter", *Environmental Pollution*. 75(1992), 279-287.
- Schuliger, W.G. 1978. "Purification of Industrial Liquids with Granular Activated Carbon : Techniques for Obtaining and Interpreting Data and Electing the Type of Commercial System", In *Carbon Adsorptions*. pp. 56-58. Cheremisinoff P.N., eds. Mich : Ann Arbor Science, Publisher, Inc.
- Sheng, L.T.S., Chuang, K.Y. 1942. "Coconut Shell Charcoal : Effect of Concentration of Zinc Chloride and Hydrochloric Acid on Activity", *Industrial And Engineering Chemistry*. 34(1942), 812-813.
- Singh, D.B., Prasad, G., Rupainwar, D.C. and Singh, V.N. 1988. "As<sup>3+</sup> Removal from Aqueous Solution by Adsorption", *Water, Air and Soil Pollution*. 42(1988), 373-386.
- Snoeyink, V.L. 1990. "Adsorption of Organic Compound", In *Water Quality and Treatment*. pp. 781-875. Vernon, L.S. eds. Conn: AVI Publish Company, Inc.
- Sorg, T.J. and Logsdon, G.S. 1978. "Treatment Technology to Meet the Interim Primary Drinking Water Regulations for Inorganics : Part 2", *Journal American Water Work Association*. 70(1978), 379-393.

- Tokunaka, S., Wasay, S.A. and Park, S.W. 1997. "Removal of Arsenic(V) Ion From Aqueous Solutions by Lanthanum Compounds", *Water Science and Technology*. 35(1997), 71-78.
- Vermeulen, T., Klein, G., Hiester, N.K. 1973. "Adsorption and Ion Exchange:Section 16", In *Chemical Engineers' Handbook*. pp.1-15. Perry, Robert H.,ed. McGraw-Hill ,Inc.
- Vircikova, E. Molnar, L., Lech, P. and Reitznerova, E. 1995. "Solubilities of amorphous Fe-As precipitates", *Hydrometallurgy*. 38(1995), 111-123.
- Wagner, N.J. and Jula, R.J. 1987. "Activated Carbon Adsorption", In *Activated Carbon Adsorption for Wastewater Treatment*. pp. 41-60. Perrich, Jerry R.,ed. CRC Press, Inc.
- Weaver, E.E. 1987. *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*. 6<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, Inc, 62-66.
- Weber, Walter J.Jr. 1981. "Concept and Principles of Carbon Application in Wastewater Treatment", In *Application of Adsorption to Wastewater Treatment*. pp. 5-28. Eckenfelder, W.W.Jr.,eds. T.N. : Enviro Press, Inc.
- Wilkie, J.A. and Hering, J.G. 1996. "Adsorption of Arsenic onto Hydrous Ferric Oxide : Effects of Adsorbate/Adsorbent Ratios and Co-Occurring Solutes", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 107(1996), 97-110.
- Wilson, F.H. and Hawkins, D.B. 1987. "Arsenic in Stream Sediments and Groundwater (Fairbank Area Alaska)", *Environment Geology*. 2(1987), 195-202.
- World Health Organization. 1981. *Arsenic : Environmental Health Criteria 18*. WHO, Geneva.
- \_\_\_\_\_ 1996. *Guideline for Drinking-Water Quality* 2<sup>nd</sup> ed. WHO, Geneva.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

## การเตรียมอุปกรณ์ และวิธีการวิเคราะห์

## 1. การเตรียมอุปกรณ์ และภาชนะบรรจุ

อุปกรณ์ และภาชนะบรรจุทุกชนิด ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ต้องล้างให้สะอาดก่อน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) 50% ประมาณ 1 คืน แล้วจึงล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ก่อนนำไปอบจนแห้ง

## 2. การวัดค่าไอโอดีนของคาร์บอน

สารละลายที่ใช้

1. สารละลายกรดเกลือ ( $\text{HCl}$ ) เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  25 กรัม ในน้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ ปรับปริมาตรจนได้ 1 ลิตร
3. สารละลายโพแทสเซียมโบโรไฮไดรด์ ( $\text{KBH}_4$ ) 0.1 นอร์มอล เตรียมโดยละลาย  $\text{KBH}_4$  0.975 กรัม ในน้ำที่ต้มเย็นแล้วปรับปริมาตรจนได้ 250 มิลลิลิตร
4. น้ำแข็ง
5. สารละลายไอโอดีน 0.05 นอร์มอล เตรียมโดยละลายผงไอโอดีน 6.35 กรัม ในสารละลายที่มีโพแทสเซียมไอโอไดด์ 10 กรัม ปรับปริมาตรจนครบ 1 ลิตร
6. ทำ standardization 0.1 นอร์มอล  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  โดยใช้ 0.1 นอร์มอล  $\text{KBH}_4$  20 มิลลิลิตร ผงโพแทสเซียมไอโอไดด์ 2 กรัม และ 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรจนได้ 200 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปไตเตรตกับ 0.1 นอร์มอล  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  โดยใช้ น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์

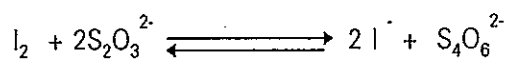
วิธีการ

1. บดคาร์บอนในเครื่องบด จนกระทั่งประมาณ 90% สามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมชได้
2. อบคาร์บอนที่บดแล้วที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. ชั่งคาร์บอน 1 กรัม ใส่ในขวดแก้วคอกว้าง จากนั้นเติมสารละลายกรดเกลือ 5% จำนวน 10 มิลลิลิตร แก้วจนคาร์บอนเปียกชุ่มทั้งหมด

4. เติมสารละลายไอโอดีน 0.05 นอร์มอล จำนวน 100 มิลลิลิตร ปิดจุก เขย่าเป็นเวลา 30 นาที

5. กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 ทิ้งน้ำที่กรองได้ในครั้งแรกประมาณ 20-30 มิลลิลิตร และเก็บน้ำกรองที่เหลือทั้งหมด

6. ใช้ปิเปตดูดน้ำที่กรอง 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วคอกว้าง ไตเตรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต จนกระทั่งเป็นสีเหลืองจาง เติมน้ำแบ่ง 3 หยด ไตเตรตต่อไป จนกระทั่งเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเข้ม เป็นไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ แสดงสมการเคมีดังนี้



#### การคำนวณ

ค่าไอโอดีน (Iodine Number) = (X/m)D

$$\text{เมื่อ } X/m = \frac{A - (2.2B \times \text{ปริมาตรไทโอซัลเฟตที่ใช้ (มล.)})}{\text{น้ำหนักของคาร์บอน (กรัม)}}$$

$$A = 12,693 N_1$$

$$B = 126.93 N_2$$

$$N_1 = \text{นอร์มอลของสารละลายไอโอดีน}$$

$$N_2 = \text{นอร์มอลของสารละลายไทโอซัลเฟต}$$

$$D = \text{CORRECTION FACTOR (ตาราง 22)}$$

$$C = (N_2/50) * (\text{ปริมาตรของสารละลายไทโอซัลเฟตที่ใช้})$$

ตาราง 22 แสดงค่า IODINE CORRECTION FACTOR (D)

Residual Filtrate Normality (C)	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009
0.0080	1.1625	1.1613	1.1600	1.1575	1.1550	1.1538	1.1513	1.1500	1.1475	1.1463
0.0090	1.1438	1.1425	1.1400	1.1375	1.1363	1.1350	1.1325	1.1300	1.1288	1.1275
0.0100	1.1250	1.1238	1.1225	1.1213	1.1200	1.1175	1.1163	1.1150	1.1138	1.1113
0.0110	1.1100	1.1088	1.1075	1.1063	1.1038	1.1025	1.1000	1.0988	1.0975	1.0963
0.0120	1.0950	1.0938	1.0925	1.0900	1.0888	1.0875	1.0863	1.0850	1.0838	1.0825
0.0130	1.0800	1.0788	1.0775	1.0763	1.0750	1.0738	1.0725	1.0713	1.0700	1.0688
0.0140	1.0675	1.0663	1.0650	1.0625	1.0613	1.0600	1.0588	1.0575	1.0563	1.0550
0.0150	1.0538	1.0525	1.0513	1.0500	1.0488	1.0475	1.0463	1.0450	1.0438	1.0425
0.0160	1.0413	1.0400	1.0388	1.0375	1.0375	1.0363	1.0350	1.0333	1.0325	1.0313
0.0170	1.0300	1.0288	1.0275	1.0263	1.0250	1.0245	1.0238	1.0225	1.0208	1.0200
0.0180	1.0200	1.0188	1.0175	1.0163	1.0150	1.0144	1.0138	1.0125	1.0125	1.0113
0.0190	1.0100	1.0088	1.0075	1.0075	1.0063	1.0050	1.0050	1.0038	1.0025	1.0025
0.0200	1.0013	1.0000	1.0000	0.9988	0.9975	0.9975	0.9963	0.9950	0.9950	0.9938
0.0210	0.9938	0.9925	0.9925	0.9913	0.9900	0.9900	0.9888	0.9875	0.9875	0.9863
0.0220	0.9863	0.9850	0.9850	0.9838	0.9825	0.9825	0.9813	0.9813	0.9800	0.9788
0.0230	0.9788	0.9775	0.9775	0.9763	0.9763	0.9750	0.9750	0.9738	0.9738	0.9725
0.0240	0.9725	0.9708	0.9700	0.9700	0.9688	0.9688	0.9675	0.9675	0.9663	0.9663
0.0250	0.9650	0.9650	0.9638	0.9638	0.9625	0.9625	0.9613	0.9613	0.9606	0.9600
0.0260	0.9600	0.9588	0.9588	0.9575	0.9575	0.9563	0.9563	0.9550	0.9550	0.9538
0.0270	0.9538	0.9525	0.9525	0.9519	0.9513	0.9513	0.9506	0.9500	0.9500	0.9488
0.0280	0.9488	0.9475	0.9475	0.9463	0.9463	0.9463	0.9450	0.9450	0.9438	0.9438
0.0290	0.9425	0.9425	0.9425	0.9413	0.9413	0.9400	0.9400	0.9394	0.9388	0.9388
0.0300	0.9375	0.9375	0.9375	0.9363	0.9363	0.9363	0.9363	0.9350	0.9350	0.9346
0.0310	0.9333	0.9333	0.9325	0.9325	0.9325	0.9319	0.9313	0.9313	0.9300	0.9300
0.0320	0.9300	0.9294	0.9288	0.9288	0.9280	0.9275	0.9275	0.9275	0.9270	0.9270
0.0330	0.9263	0.9263	0.9257	0.9250	0.9250					

ที่มา มั่นสิน ดัชนีอุตสาหกรรม, 2538

### 3. วิธีการวิเคราะห์น้ำทางเคมี

#### 3.1 พีเอช (pH)

การวัดค่าพีเอชของน้ำโดยใช้เครื่องวัดพีเอช ทำได้โดยใช้ Combination Electrode ซึ่งมีความสามารถในการวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) การอ่านค่าพีเอช สามารถอ่านได้โดยตรง การวัดพีเอชทุกครั้งต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน ที่ทราบค่าพีเอชแน่นอนเพื่อทำการ standardize เครื่องก่อนเสมอทุกครั้งที่ใช้งาน

#### 3.2 ความเป็นด่าง (Alkalinity) โดยวิธี Direct Titration Method (APHA, AWWA and WEF, 1992)

##### สารละลายที่ใช้

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้เตรียมสารต่างๆ
2. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์
3. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ หาค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก โดยไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต 0.01 โมลาร์ ซึ่งเตรียมได้โดยละลายโซเดียมคาร์บอเนต (อบแห้งที่  $110^\circ C$ ) 1.06 กรัม ในน้ำกลั่นและเติมให้เป็น 1 ลิตร โดยใช้ขวดวัดปริมาตร (Volumetric Flask) สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร จะมีค่าเท่ากับ 1.00 มิลลิกรัม
4. สารละลายเมทิลลอรเรนจ์ อินดิเคเตอร์
5. สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 โมลาร์ ละลาย  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเติมจนได้ปริมาตร 1 ลิตร

##### วิธีการ

เลือกใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำที่จะหาให้เหมาะสม เพื่อที่จะใช้สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกไม่เกิน 25 มิลลิลิตร ในการไตเตรทโดยทั่วไปจะใช้ 50 มิลลิลิตร หรือ 100 มิลลิลิตร ใส่คลอรีนอิสระที่อาจมีอยู่ในตัวอย่างน้ำโดยหยดสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 โมลาร์ ลงไป 1 หยด (0.05 มิลลิลิตร)

1. ดูดตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต ใส่ลงในเออเลนเมเยอร์ฟลาส (Erlenmeyer Flask) และดูน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในเออเลนเมเยอร์ฟลาสอีกใบหนึ่ง
2. หยดฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์ ลงไปฟลาสละ 3 หยด

3. ถ้าตัวอย่างน้ำมีสีชมพู ให้ไตเตรทด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งสีชมพูหายไป (=P)
4. หยดเมทิลลอรเรนจ์ อินดิเคเตอร์ 3 หยด ลงในแต่ละฟลาส
5. ถ้าตัวอย่างมีสีเหลืองเรื่อย ๆ ให้ไตเตรทต่อไปด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกระทั่งเห็นสีเริ่มเปลี่ยนไปเป็นสีส้ม โดยเปรียบเทียบกับสีในขวดที่มีน้ำกลั่น แสดงว่าถึงจุดสมมูล
6. จดปริมาตรกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ทั้งหมดที่ใช้ (=T)

### การคำนวณ

ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) = ปริมาตรกรดที่ใช้ทั้งหมด  $\times 10$

ให้ P = ปริมาณมิลลิลิตร กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ใช้ในการไตเตรท สำหรับ ฟีนอล์ฟทาลีน อินดิเคเตอร์

T = ปริมาตรมิลลิลิตร กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ใช้ในการไตเตรททั้งหมด สำหรับเมทิลลอรเรนจ์ อินดิเคเตอร์

- |                   |             |                        |
|-------------------|-------------|------------------------|
| 1. ถ้า $P = T$    | ไฮดรอกไซด์  | = $P \times 10$        |
| 2. ถ้า $P > 0.5T$ | ไฮดรอกไซด์  | = $(2P - T) \times 10$ |
|                   | คาร์บอเนต   | = $2(T - P) \times 10$ |
| 3. $P = 0.5T$     | คาร์บอเนต   | = $T \times 10$        |
| 4. $P < 0.5T$     | คาร์บอเนต   | = $2T \times 10$       |
|                   | ไบคาร์บอเนต | = $(T - P) \times 10$  |
| 5. $P = 0$        | ไบคาร์บอเนต | = $T \times 10$        |

หมายเหตุ หน่วยความเข้มข้นเป็น มิลลิกรัม/ ลิตร as  $\text{CaCO}_3$



### 3.3 ความกระด้าง (Hardness) โดยวิธี EDTA Titration Method (APHA, AWWA and WEF, 1992)

#### สารละลายที่ใช้

1. สารละลายบัฟเฟอร์ เตรียมโดยละลาย 16.9 กรัม  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ใน 143 มิลลิลิตร Conc.  $\text{NH}_4\text{OH}$  เติม 1.25 กรัมเกลือ Mg ของ EDTA เติมน้ำกลั่นจนครบ 250 มิลลิลิตร
2. อินดิเคเตอร์ เตรียมโดย ผสม 0.5 กรัม Eriochrome Black T และ 100 กรัม NaCl จะได้เป็นผงแห้งของอินดิเคเตอร์
3. สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยละลาย 3.723 กรัม ของผง EDTA disodium salt ละลายในน้ำจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 2-3 วัน และทำความสะอาดชั้นมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานแคลเซียม ที่ทราบความเข้มข้น ปรับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน EDTA ให้ 1.00 มล. = 1.00 มก.แคลเซียมคาร์บอเนต
4. สารละลายมาตรฐานแคลเซียม ซึ่ง 1.00 กรัมผง  $\text{CaCO}_3$  ใส่ใน Erlenmeyer Flask ขนาด 500 มิลลิลิตร เติม 50% HCl จน ผง  $\text{CaCO}_3$  ละลายหมดแล้วเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดประมาณ 2-3 นาที เพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ทิ้งให้เย็น เติม 2-3 หยดของเมทิลเรด อินดิเคเตอร์ ปรับให้เป็นสีส้ม ด้วย 3 โมลาร์  $\text{NH}_4\text{OH}$  หรือ 50% HCl ปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร

#### วิธีการ

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำ 25 มิลลิลิตร ใส่ใน Erlenmeyer Flask เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1-2 มิลลิลิตร
3. เติมผงอินดิเคเตอร์ลงไปพอประมาณ สารละลายจะกลายเป็นสีม่วงแดง
4. ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนสารละลายกลายเป็นสีน้ำเงิน

#### การคำนวณ

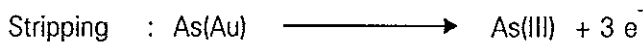
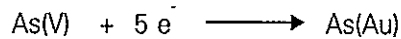
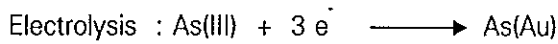
$$\text{Hardness (EDTA) as mg/l CaCO}_3 = \frac{(A \times B \times 1000)}{\text{ml sample}}$$

A = มิลลิลิตรของ EDTA ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง

B = มิลลิกรัม  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งสมมูลกับ 1.00 มิลลิลิตร EDTA

### 3.4 ความเข้มข้นของสารหนู โดยวิธี Stripping Potentiometry (Jagner, 1994)

การวิเคราะห์ปริมาณสารหนู ด้วยวิธี Stripping Potentiometry โดยใช้อิเล็กโทรดที่ชุบด้วยทองคำ เกิดศักย์ไฟฟ้าเคมี 2 ขั้นตอน คือ



โดยมีสภาวะการเกิดอิเล็กโทรไลซิส ดังนี้

Electrolysis Potential : -900 mv และ -400 mv

Electrolysis time : 20 sec ที่ -900 mv + คนสารละลาย

2 sec ที่ -400 mv + คนสารละลาย

5 sec ที่ -400 mv โดยปราศจากการคนสารละลาย

กระแสคงที่ : +20  $\mu$ A.

ในขั้นตอนการเกิดอิเล็กโทรไลซิส จะเกิดก๊าซไฮโดรเจนบนฟิล์มทอง การคนสารละลายจะเป็นการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนออกไป

#### สารละลายที่ใช้

1. Plating Solution 1,000 ppm Au(III)

2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 4 โมลาร์

ใช้ 37% กรดไฮโดรคลอริก 330 มิลลิลิตร เจือจางในน้ำกลั่น จนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3. สารละลายมาตรฐานสารหนู

#### วิธีการ

1. ทำการชุบ Glassy Carbon Electrode ด้วยสารละลายทองที่เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 20 มิลลิลิตร

2. บีบน้ำตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร และ 4 โมลาร์ของกรดไฮโดรคลอริก 10 มิลลิลิตร ผสมกันในถ้วยโพลีเอทิลีน เพื่อนำไปวัดปริมาณสารหนู ด้วยชุดเครื่อง Stripping Potentiometer

3. การเตรียม Calibration Curve โดยใช้สารละลายมาตรฐานสารหนูที่ความเข้มข้น 10

50 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการวัดปริมาณสารหนู ซึ่งได้จากศักย์ไฟฟ้า แล้วแปลงสัญญาณเป็นพื้นที่ใต้กราฟ พล็อตกราฟระหว่างพื้นที่ใต้กราฟ กับความเข้มข้นของสารหนู จะได้กราฟเป็นเส้นตรงผ่านจุดเริ่มต้น

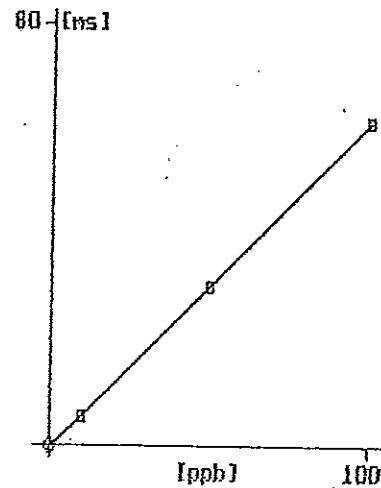
#### Arsenic Calibration

98-05-25 08.58.12

CORR DATA SET  
Filters : 8, 9  
Baseline: 0

Int. pot: +150  
Width : 202

IDNO	Standard [ppb]	Peak [mV]	Area [ms]
	0.0000	default	0.0000
0	10.0000	+130	6.244
0	50.0000	+140	30.656
0	100.0000	+138	61.667



ภาพประกอบ 40 ตัวอย่างกราฟคาลิเบรชันการวิเคราะห์สารหนู

### 3.5 ความเข้มข้นของเหล็ก โดยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (APHA, AWWA and WEF, 1992)

#### สารละลายที่ใช้

1. สารละลายเหล็กมาตรฐาน
2. สารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 0.5 โมลาร์

#### วิธีการ

1. เตรียมสารละลายเหล็กมาตรฐาน ที่มีความเข้มข้น 0.05 0.1 0.2 0.3 0.5 0.7 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ 0.5 โมลาร์ของกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) เป็นตัวทำละลาย
2. นำสารละลายเหล็กมาตรฐานมาวัดค่าแอมป์สเปกโตรเมทรี ที่ความยาวคลื่น 248.3 นาโนเมตร
3. นำค่าแอมป์สเปกโตรเมทรี ของสารละลายมาตรฐานมาสร้างกราฟเส้นตรง โดยใช้แกน Y เป็นค่าแอมป์สเปกโตรเมทรี และแกน X เป็นความเข้มข้นของสารละลาย
4. นำตัวอย่างที่ต้องการทราบความเข้มข้นมาหาค่าแอมป์สเปกโตรเมทรี แล้วคำนวณหาปริมาณเหล็กในน้ำ เทียบกับกราฟเส้นตรงที่ได้จากการวัดสารละลายมาตรฐาน

## ภาคผนวก ข.

## ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่ใน Adsorption Isotherm

ตาราง 23 แสดงผลการคำนวณค่า X/M ของสารหนูวาเลนซี 3 ครั้งที่ 1 ในถ่านชนิด Rh:FeCl<sub>3</sub> 1:1

น้ำหนักถ่าน (g)	C (mg/L)	C(mg)	X (mg)	X/M (mg/g)
0	2.18	0.109	-	-
0.1	1.46	0.073	0.036	0.36
0.2	1.34	0.067	0.042	0.21
0.5	0.73	0.036	0.073	0.15
1.0	0.37	0.018	0.091	0.09
2.0	0.09	0.004	0.105	0.05

หมายเหตุ C เท่ากับ ความเข้มข้นของสารหนู

ตาราง 24 แสดงข้อมูลการหา Linear Regression ระหว่าง log(C) กับ log(X/M)

จุดที่	C (mg/l)	log(C)	X/M (mg/g)	log (X/M)
1	1.46	0.1644	0.36	-0.4437
2	1.34	0.1271	0.21	-0.6778
3	0.73	-0.1367	0.15	-0.8239
4	0.37	-0.4318	0.09	-1.0458
5	0.09	-1.0458	0.05	-1.3010

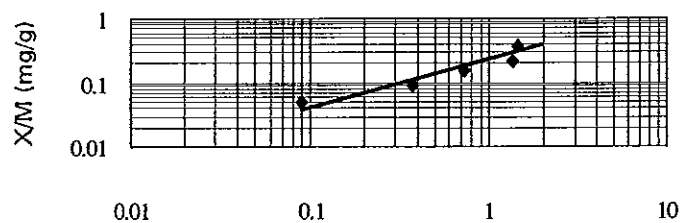
สมการเส้นตรง คือ  $Y = A + BX$  จะได้  $A = -0.690$   $B = 0.635$

จากสมการ Freundlich คือ  $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$

เมื่อ  $\log C = 1$  mg/L จะได้  $A = \log K$  ดังนั้น  $K = 10^A$

$K = 0.204$  mg/g และ  $B = 1/n = 0.635$

ที่มา Ford (1981)



ความเข้มข้นของสารหนูวาเลนซี 3 (mg/L)

ภาพประกอบ 41 แสดงตัวอย่างไอโซเทอริมการดูดซับจากการคำนวณ

## ภาคผนวก ค.

## การคำนวณปริมาตรของถ่านในคอลัมน์ และการนำไปใช้

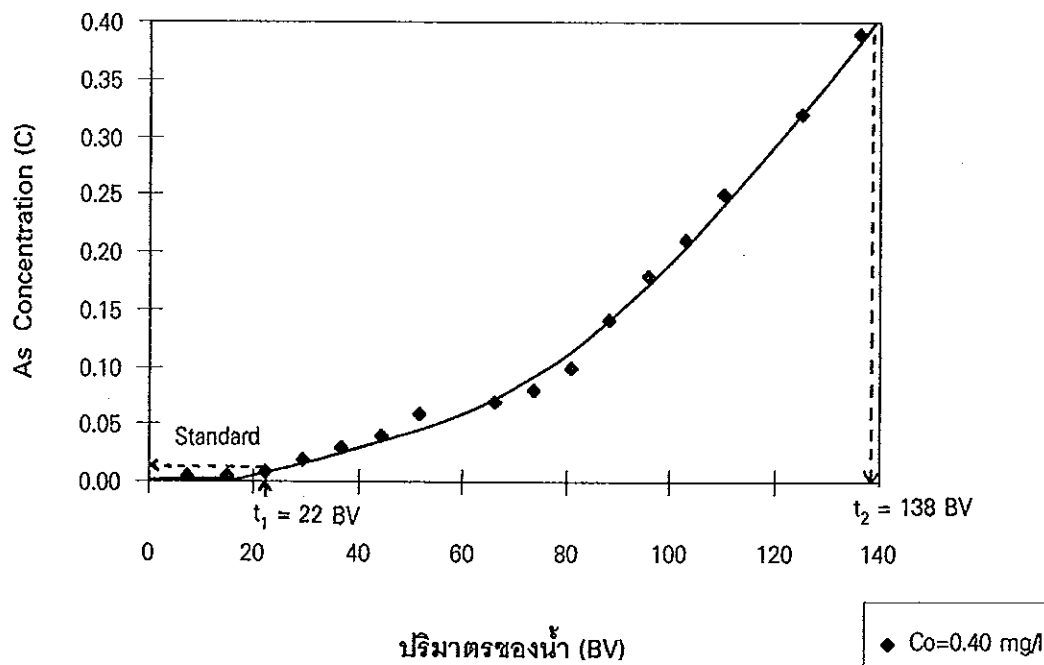
การนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น และปริมาตรของถ่านในคอลัมน์ ไปสร้างเป็น Breakthrough Curve จะใช้ประโยชน์ได้ดี ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้งานได้ทันที โดยอาจเปลี่ยนแปลงขนาดของคอลัมน์

Bed Volume (BV) = ปริมาตรของถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์

$$BV = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (\text{Cm}^3)$$

เมื่อ  $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอลัมน์ (เซนติเมตร)

$h$  = ความสูงของถ่านในคอลัมน์ (เซนติเมตร)



ภาพประกอบ 42 ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรถ่านในคอลัมน์ และการนำไปใช้

### การคำนวณ

จากการทดลอง เส้นผ่านศูนย์กลางภายในคอลัมน์ (d) เท่ากับ 3.4 เซนติเมตร

ความสูงของด่างกัมมันต์ในคอลัมน์ (h) เท่ากับ 30 เซนติเมตร

$$\text{ดังนั้น } BV = \frac{\pi \times 3.4^2 \times 30}{4} \times \frac{1}{1,000} \quad \text{ลิตร}$$

เพราะฉะนั้น  $1 \text{ BV} = 0.272 \text{ ลิตร}$

จากค่ามาตรฐานของสารหนูที่ยอมรับ เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม ต่อลิตร นั่นคือที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 0.40 มิลลิกรัม ต่อลิตร ในภาพประกอบ 42

เพราะฉะนั้น น้ำกรองที่ผ่านค่ามาตรฐานสารหนู จึงมีอายุการใช้งานของด่างกัมมันต์ ( $t_1$ ) ซึ่งได้เท่ากับ 22 BV คิดเป็นปริมาตรของน้ำกรอง เท่ากับ 6 ลิตร และอายุของด่างกัมมันต์ที่ใช้จนหมดประสิทธิภาพการดูดซับ ( $t_2$ ) เท่ากับ 138 BV คิดเป็นปริมาตรน้ำ เท่ากับ 37.5 ลิตร

จากอัตราการไหลของน้ำ เท่ากับ 2 ลิตรต่อชั่วโมง

$$\text{ดังนั้น } t_1 = 3 \text{ ชั่วโมง}$$

$$t_2 = 18.8 \text{ ชั่วโมง}$$

ตัวอย่าง สมมุติว่า ชาวบ้านต้องการใช้คอลัมน์ที่มีปริมาตรด่างกัมมันต์  $1 \text{ BV} = 20 \text{ ลิตร}$  ในการลดปริมาณสารหนูในน้ำ ดังนั้น

ปริมาตรของน้ำที่ผ่านค่ามาตรฐานจากคอลัมน์นี้ เท่ากับ  $20 \times 22 = 440 \text{ ลิตร}$

หากชาวบ้านใช้อัตราการไหลของน้ำ เท่ากับ 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

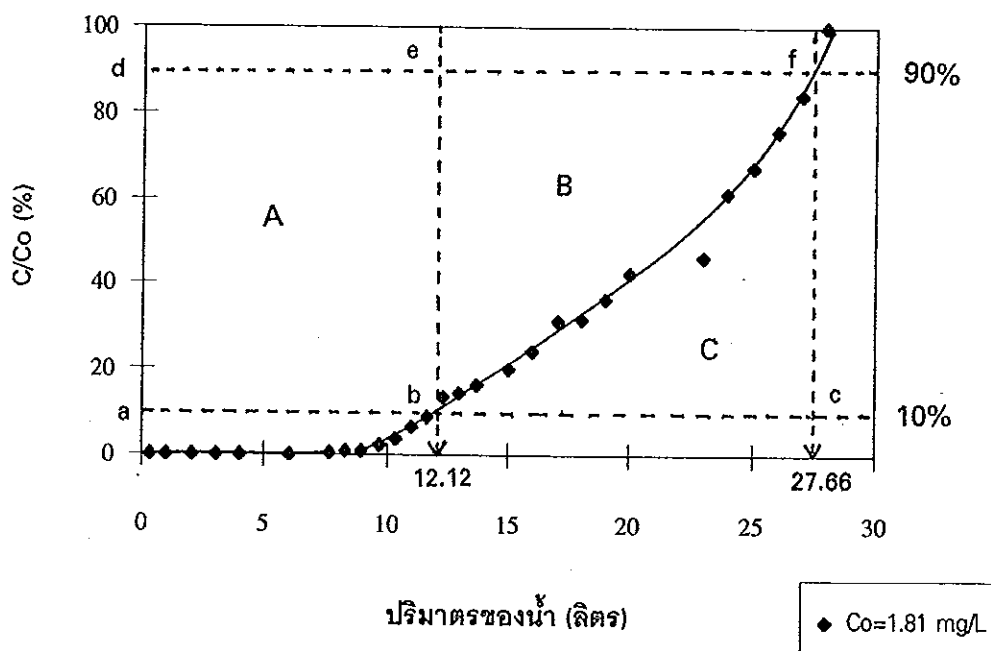
$$\text{เพราะฉะนั้น ใช้เวลาเป็น } \frac{440 \text{ ลิตร}}{1.5 \text{ ลิตร ต่อชั่วโมง}} = 293 \text{ ชั่วโมง}$$

นั่นคือ อายุการใช้งานของด่างกัมมันต์ ประมาณ 293 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5 ลิตรต่อชั่วโมง

## ภาคผนวก ง.

## ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับ แบบต่อเนื่อง

คำนวณความสามารถในการดูดซับสารหนูวาเลนซี 5 ของถ่านจาก แกลบ:FeCl<sub>3</sub> (1:1) ที่บรรจุในคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ 35 กรัม โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 1.81 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราการไหล 2 ลิตรต่อชั่วโมง



ภาพประกอบ 43 แสดงตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับแบบต่อเนื่อง  
การคำนวณ (Vermeulen *et al.*, 1973)

$$\text{Adsorption Capacity} = \text{Area (A+B)}$$

$$\begin{aligned} \text{Area A} &= ab \times be = 12.12 \text{ ลิตร} \times (80/100) = 9.70 \text{ ลิตร} \\ &= 9.70 \text{ ลิตร} \times 1.81 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} = 17.55 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Area B} &= (bc \times cf) / 2 = \{(27.66-12.12) \text{ ลิตร} \times (80/100)\} / 2 = 6.22 \text{ ลิตร} \\ &= 6.22 \text{ ลิตร} \times 1.81 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} = 11.25 \text{ มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น Adsorption Capacity} = 17.55 + 11.25 = 28.80 \text{ มิลลิกรัม}$$

ถ่านกัมมันต์ 35 กรัม มีความสามารถดูดซับได้ เท่ากับ 28.80 มิลลิกรัม

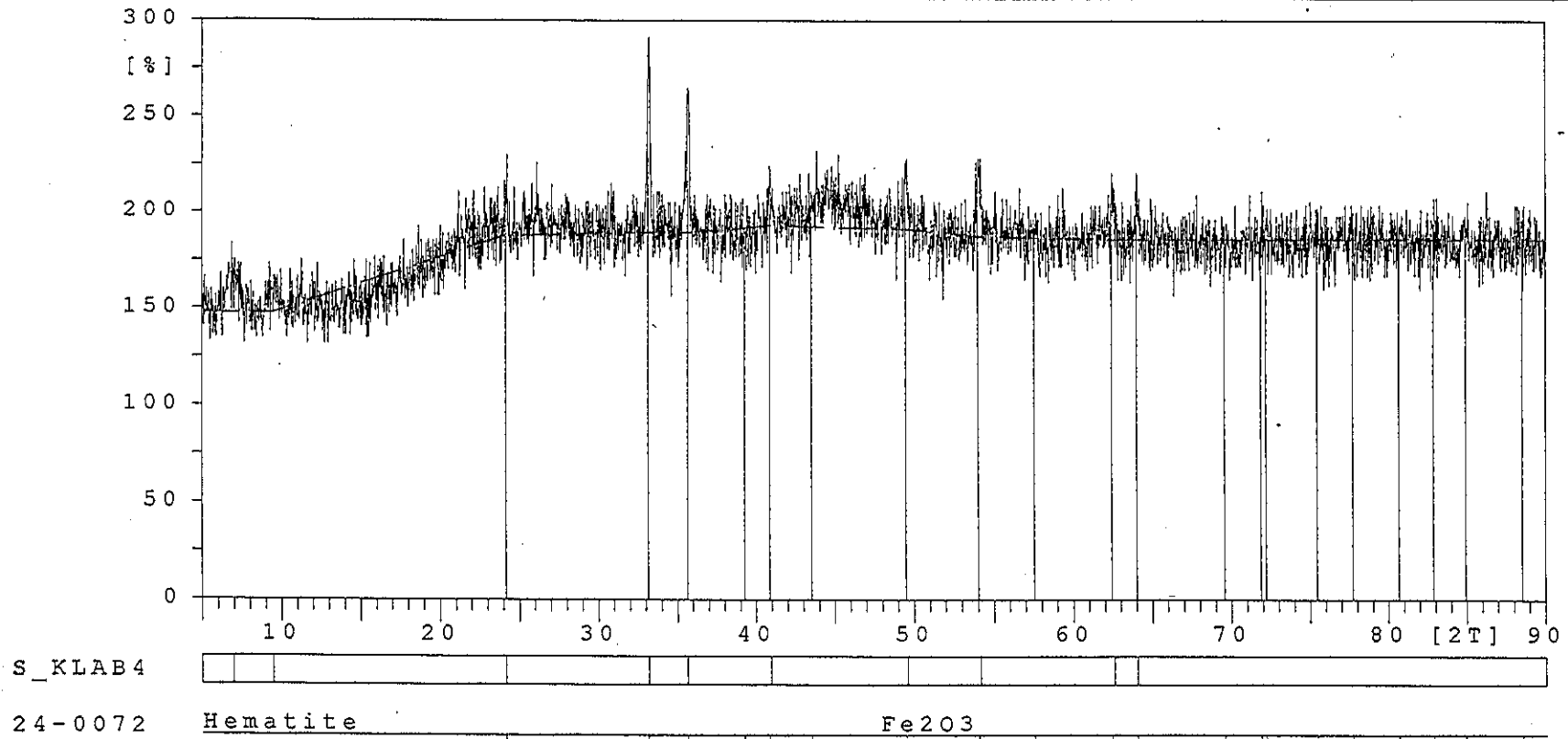
ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม จึงมีความสามารถดูดซับได้ เท่ากับ 0.82 มิลลิกรัม

ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์สารประกอบในพื้นผิวถ่านกัมมันต์

Sample ident.: s klab4

22-dec-1998 16:32



ภาพประกอบ 44 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในตัวอย่างถ่านกัมมันต์ชนิด แกลบ ต่อเฟอริกคลอไรด์(1:1) ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)



File: C:\APDW\DATA\S\_KLAB4.DI

22-dec-1998 16:35

Philips Analytical

PC-APD, Diffraction software

## D I F F I L E :

Sample identification: s\_klab4

DI file name: S\_KLAB4.D

Input file name: s\_klab4

Start angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 5.012End angle [ $^{\circ}2\theta$ ]: 89.988Start d-value [ $\text{\AA}$ ]: 17.61557End d-value [ $\text{\AA}$ ]: 1.08949

Maximum number of counts: 237

Anode material: Cu

a1 Wavelength [ $\text{\AA}$ ]: 1.54060a2 Wavelength [ $\text{\AA}$ ]: 1.54439

Intensities for FIXED slit

Peak positions defined by: Minimum of 2nd derivative of peak

Minimum peak tip width: 0.00

Maximum peak tip width: 1.00

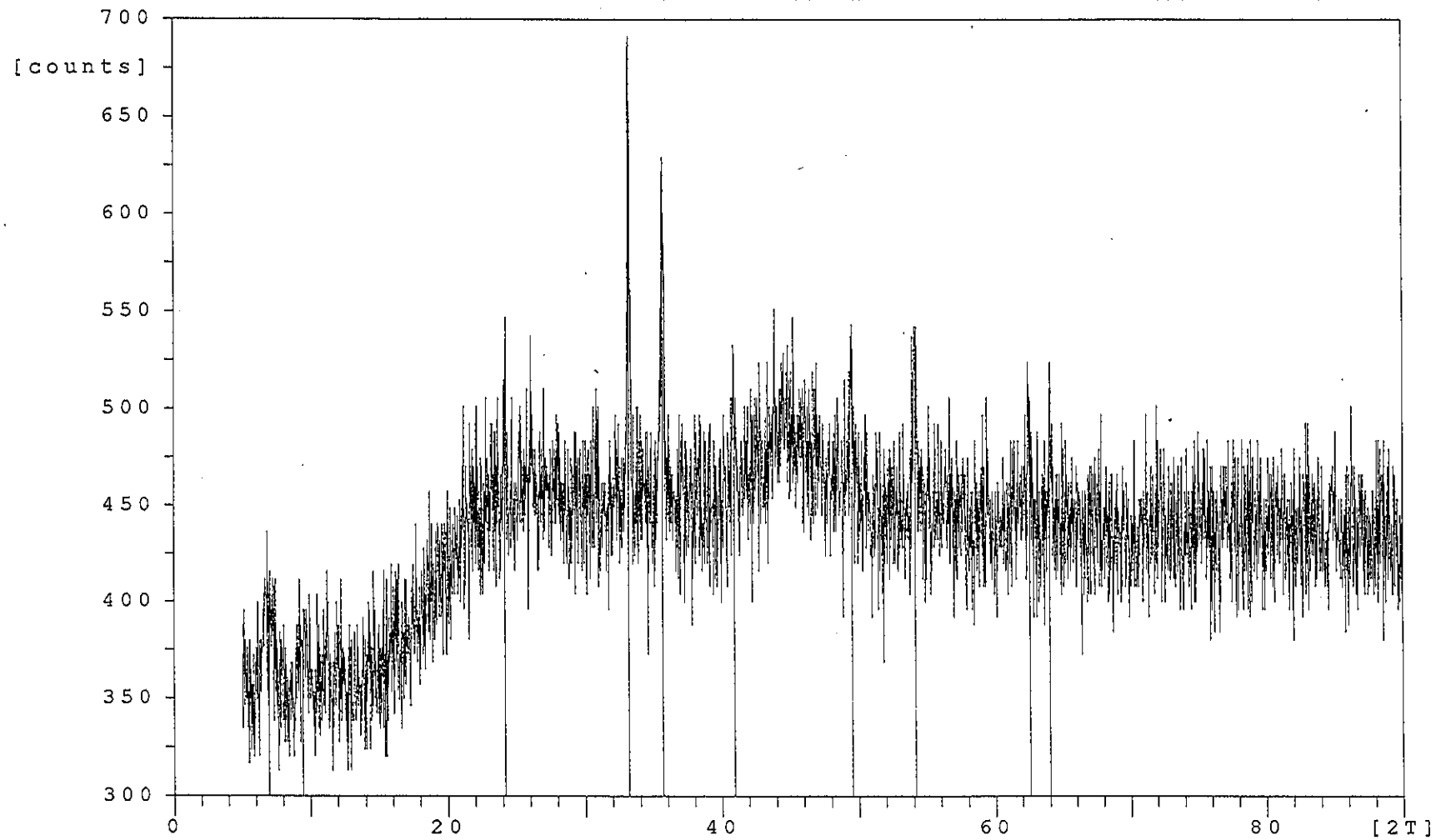
Maximum peak base width: 2.00

Minimum significance: 0.75

Number of peaks: 10

## D I F F R A C T I O N L I N E S :

Angle [ $^{\circ}2\theta$ ]	d-value a1 [ $\text{\AA}$ ]	d-value a2 [ $\text{\AA}$ ]	T.width [ $^{\circ}2\theta$ ]	Height [counts]	Backgr. [counts]	Rel.int. [%]	Signific
6.925	12.75431	12.78569	0.800	41	350	17.3	1.39
9.420	9.38104	9.40412	0.800	29	350	12.3	1.24
24.125	3.68602	3.69509	0.200	42	445	17.8	0.81
33.140	2.70104	2.70768	0.100	237	449	100.0	1.08
35.605	2.51949	2.52569	0.100	180	449	75.7	1.02
40.900	2.20470	2.21012	0.300	40	458	16.7	1.41
49.510	1.83957	1.84410	0.175	90	454	38.1	1.27
54.110	1.69354	1.69771	0.200	72	445	30.5	1.09
62.525	1.48432	1.48797	0.300	46	441	19.5	0.94
63.985	1.45392	1.45750	0.250	58	441	24.4	0.97



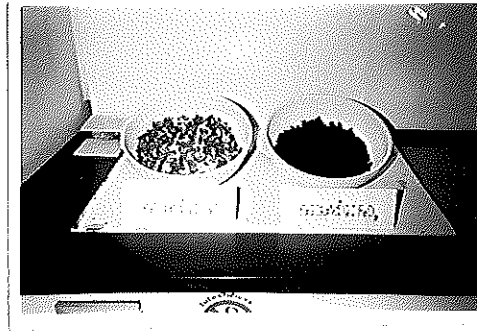
S\_KLAB4.SD

S\_KLAB4.DI

ภาพประกอบ 45 กราฟมาตรฐานเปรียบเทียบเพื่อหาชนิดของสารประกอบ ด้วยวิธี X-ray diffraction (XRD)

## ภาคผนวก จ.

ลักษณะของวัตถุดิบผสมสารกระตุ้น ก่อน และหลังผ่านการเผาแล้ว



ภาพประกอบ 46 ของผสมระหว่างกะลามะพร้าว กับ สารกระตุ้น ก่อนเผา



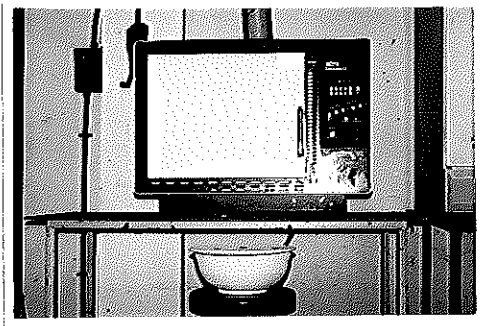
ภาพประกอบ 47 ของผสมระหว่างแกลบ กับ สารกระตุ้น ก่อนเผา



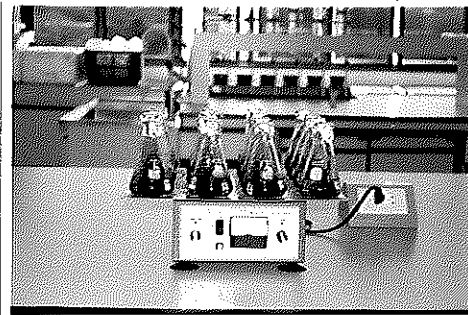
ภาพประกอบ 48 ตัวอย่างด้านจากแกลบ และกะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาแล้ว

## ภาคผนวก ช.

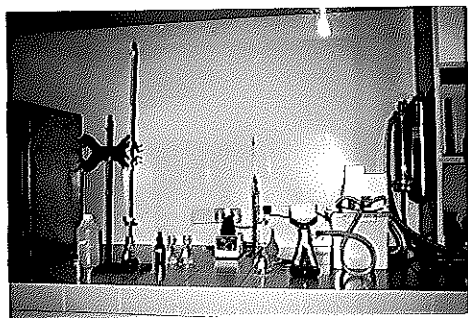
## เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง



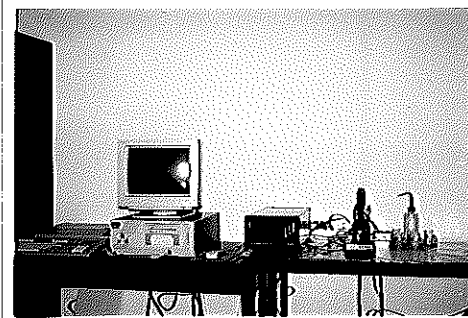
ภาพประกอบ 49 เตาเผา (Furnace) พร้อม  
ภาชนะดินเผา มีฝาปิด



ภาพประกอบ 50 เครื่องเขย่าขวด (Shaker)  
ในการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 51 ชุดเครื่องมือการวิเคราะห์หา  
ค่าไอโอดีน ของถ่านกัมมันต์



ภาพประกอบ 52 เครื่องสตริบปีง โฟเทนชิโอมิเตอร์  
(Stripping Potentiometer)

ภาคผนวก ซ.

ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

# การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24

19-21 ตุลาคม 2541

ณ ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์

กรุงเทพมหานคร

กำหนดการและบทคัดย่อ  
PROGRAMME AND ABSTRACTS

ISBN 974-86505-5-3

24th Congress on Science and  
Technology of Thailand

19-21 October 1998

at Queen Sirikit National Convention Center  
Bangkok



ชื่อ-สกุล ผู้นิบาชงานวิจัย ... รัชนก แซ่เจิน

 นาย  น.ส.  นาง  ดร.  อ.  ผศ.  รศ.  ศ.

ที่ทำงาน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา โทร. 074-212904

สาขาวิชา:

 กายภาพ  ชีวภาพ  
 แพทย์  ทรัพยากร-แวดล้อม  
 เกษตร  วิศวกรรม  
 วิทยาศาสตร์  ทั่วไป

## Kinetic of Arsenic Adsorption by Activated Carbon which made from Rice Husk and Coconut Shell

Ratchanok Saejen\*, Surapon Arrykul\*\*, Pitsanu Bunnau\*\*, Kalayanee Kooptarnon\*\*

\*Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand

\*\*Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Thailand

The purpose of this research is to study the kinetic of adsorption of Arsenic(III) and Arsenic(V) by activated carbon made from chemical activated process. Chemicals for activation were sodium chloride (NaCl) and ferric chloride ( $FeCl_3$ ) which were used in an appropriate ratio with raw material. Batch adsorption tests were used to evaluate the effects of arsenic adsorption under 4 types of activated carbon which are Coconut shell:NaCl (1:3), Coconut shell: $FeCl_3$  (1:3), Rice husk :NaCl (1:1) and Rice husk : $FeCl_3$  (1:1). The results show that the adsorption rate constants (K) for As(III) are 0.01, 0.44, 0.03 and 0.21 mg/g, and for As(V) are 0.01, 3.26, 0.01 and 2.92 mg/g, respectively. The adsorption rate were estimated by using Freundlich equation constants. This is concluded from the isotherm graph that arsenic is better adsorbed by  $FeCl_3$ -activated carbon than by NaCl-activated carbon.

### จลนศาสตร์ของการดูดซับสารหนู ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก แกลบ และ กะลามะพร้าว

รัชนก แซ่เจิน \*, สุรพล อารีกุล \*\*, พิษณุ บุญนวล \*\*, กัลยาณี คุปตานนท์ \*\*

\* คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา

\*\* คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา

จุดประสงค์ของการวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ ของการดูดซับสารหนูวาเลนซ์ 3 และสารหนูวาเลนซ์ 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี ด้วยสารกระตุ้น 2 ชนิด คือ เกลือแกง (NaCl) และ เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $FeCl_3$ ) ที่ใช้ในอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบ ต่อสารกระตุ้นที่เหมาะสม โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับสารหนูในถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ได้จาก กะลามะพร้าว ต่อ NaCl (1:3) .กะลามะพร้าว ต่อ  $FeCl_3$  (1:3) แกลบ ต่อ NaCl (1:1) และ แกลบ ต่อ  $FeCl_3$  (1:1) พบว่า ให้อัตราการดูดซับของสารหนูวาเลนซ์ 3 เป็น 0.01 0.44 0.03 และ 0.21 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับสารหนูวาเลนซ์ 5 เป็น 0.01 3.26 0.01 และ 2.92 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากค่าคงที่ในสมการของ Freundlich. ผลของไอโซเทอรั่มแสดงให้เห็นว่าชนิดของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย  $FeCl_3$  มีความเหมาะสมต่อการดูดซับสารหนู ได้ดีกว่าชนิดที่ใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น

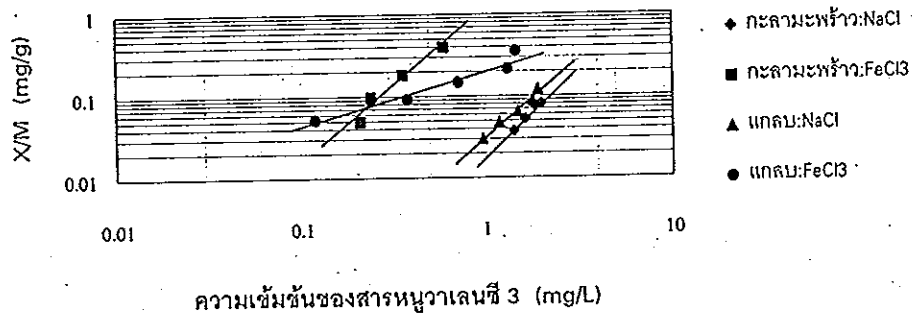
INDEX KEY WORDS: activated carbon, arsenic adsorption, kinetic

ชื่อเรื่อง (ไทย) จลนศาสตร์ของการดูดซับสารหนู ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก  
 แกลบ และ กะลามะพร้าว

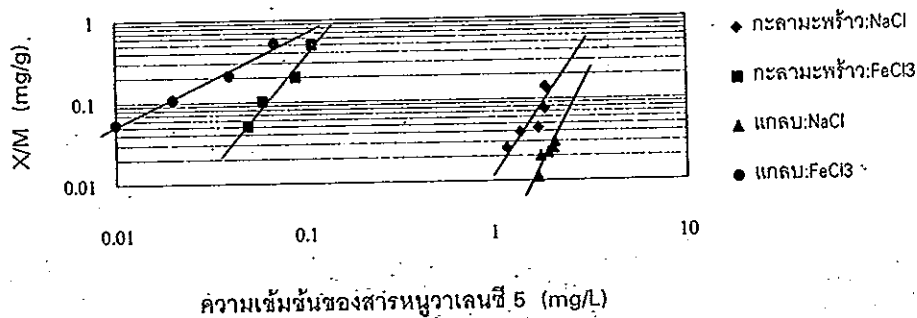
ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่จลนศาสตร์ (K) และค่าความชัน (1/n) ของการดูดซับสารหนู ในถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของถ่านกัมมันต์	As(III)		As(V)	
	K (mg/g)	1/n	K (mg/g)	1/n
CS : NaCl 1:3	0.01	3.19	0.01	3.56
CS : FeCl <sub>3</sub> 1:3	0.44	0.89	3.26	1.02
RH : NaCl 1:1	0.03	1.77	0.01	4.45
RH : FeCl <sub>3</sub> 1:1	0.21	0.72	2.92	0.87

หมายเหตุ CS = Coconut Shell และ RH = Rice Husk



รูปที่ 1: แสดง Adsorption Isotherm ของสารหนูวาเลนซี 3 จากถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2: แสดง Adsorption Isotherm ของสารหนูวาเลนซี 5 จากถ่านกัมมันต์ชนิดต่าง ๆ

หมายเหตุ X/M หมายถึง ปริมาณของสารหนูที่ถูกดูดซับ ต่อ น้ำหนักถ่านกัมมันต์

เอกสารอ้างอิง

1. Maeda, S., Ohki, A., Shunsuke, S. and Naka, K. 1992. 'Iron (III) Hydroxide-Loaded Coral Limestone as an Adsorbent for Arsenic(III) and Arsenic(V)', *Separation Science and Technology*. 25(5), 681-685.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวรัชก แซ่เจิน  
 วัน เดือน ปีเกิด 26 กรกฎาคม 2517  
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา เคมี	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่	2538

## ทุนการศึกษา

- ทุนผู้ช่วยสอน คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2539
- ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ ในงาน วทท 24 กรุงเทพฯ จัดโดย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 2541