

การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต
ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์



นายโกมล แพงทรัพย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

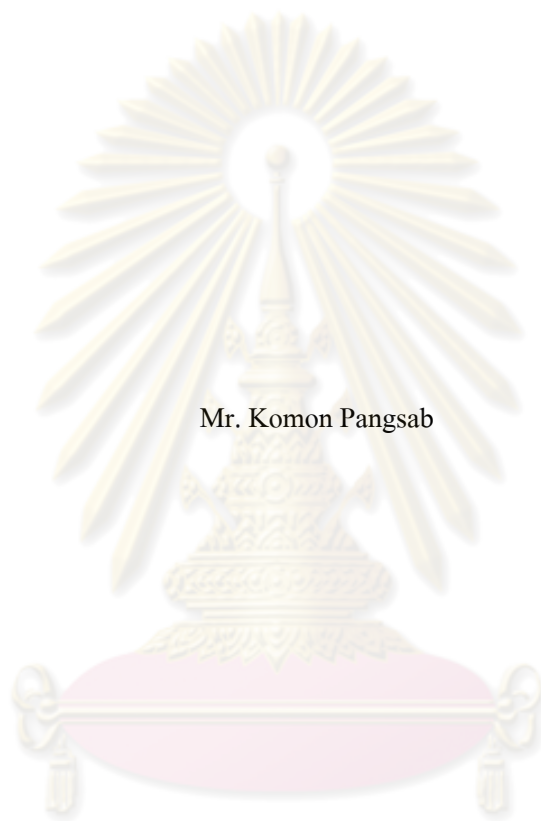
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTION OF URANIUM IN TRISODIUM PHOSPHATE SOLUTION ON
TRICALCIUM PHOSPHATE AND HYDROXYAPATITE



Mr. Komon Pangsab

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วย
ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

โดย

นายโกมล แพงทรัพย์

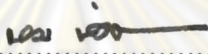
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

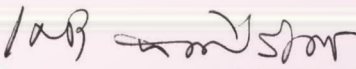
รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัตรศิริเวช)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์)

โกมล แพงทรัพย์ : การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์. (ADSORPTION OF URANIUM IN TRISODIUM PHOSPHATE SOLUTION ON TRICALCIUM PHOSPHATE AND HYDROXYAPATITE) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัตรีศิริเวช, 65 หน้า.

กระบวนการดูดซับยูเรเนียมซึ่งปนเปื้อนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)และไตรแคลเซียมฟอสเฟต($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ได้ถูกทดลองแบบกะที่อุณหภูมิห้อง โดยสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของไตรโซเดียมฟอสเฟตต่อปริมาณการดูดซับยูเรเนียม

สำหรับสารละลายยูเรเนียมเข้มข้น 30 มก./ล. การดูดซับยูเรเนียมด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟต ด้วยอัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายเท่ากับ 0.2 กรัมต่อสารละลาย 50 กรัม และ 2 กรัมต่อสารละลาย 50 กรัม ตามลำดับ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะจะมีค่า 4.4 มก.ต่อกรัม และ 0.99 มก.ต่อกรัม ตามลำดับ ในการดูดซับที่เวลา 1 ชั่วโมง ปริมาณยูเรเนียมที่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะมีค่าถึงร้อยละ 95.2 และ 97.0 ของปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยูเรเนียมที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนดลิช นอกจากนี้โซเดียมไอออนก็ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดด้วยและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไอออนที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของโซเดียมไอออนในสารละลายเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนดลิช ปริมาณยูเรเนียมที่ถูกดูดซับจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไอออนในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์.....
ปีการศึกษา.....2552...

4970755621 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION / URANIUM / HYDROXYAPATITE / TRICALCIUM PHOSPHATE

KOMON PANGSAB : ADSORPTION OF URANIUM IN TRISODIUM PHOSPHATE SOLUTION ON TRICALCIUM PHOSPHATE AND HYDROXY APATITE. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 65 pp.

Uranyl ion(UO_2^{2+}) contaminated in trisodium phosphate solution was adsorbed batchwisely by hydroxyapatite($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) and tricalcium phosphate($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) at pH 12 and ambient temperature. Influence of trisodium phosphate concentration on the amount adsorbed was also investigated.

For 30 mg/L of uranium and 0.2 g hydroxyapatite to 50 ml solution and 2 g tricalcium phosphate to 50 ml solution, the adsorption equilibria reached 4.4 mg uranium per gram of hydroxyapatite, and 0.99 mg uranium per gram of tricalcium phosphate. For one hour adsorption, the amount adsorbed reached 95.2% and 97.0% of equilibrium amount, respectively. The relationships of amount adsorbed with the solution concentration were obeyed Freundlich's model. In addition, sodium ion was also adsorbed on both adsorbents. Again, the relationships of amount adsorbed with the Na^+ concentration were agreed with Freundlich's model. The adsorbed amount of uranium on both adsorbents was reduced by increase in Na^+ concentration.

Department : Chemical Engineering.....

Field of Study : Chemical Engineering.....

Academic Year : 2009.....

Student's Signature *Komon Pangsab*
 Advisor's Signature *Decha Chatsiriwech*

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัทรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง สำหรับการให้คำแนะนำและการดูแลเอาใจใส่ รวมทั้งกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวสันต์ และ ดร.พิพัฒน์ พิเชษฐพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมทั้งศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ซึ่งเป็นหน่วยงานในสังกัดสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และเพื่อนๆที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ผู้ทำการวิจัยจนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. ยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	3
2.1 ไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	3
2.2 ยูเรเนียม.....	3
2.3 การผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก.....	4
2.4 การลดปริมาณยูเรเนียมในสารละลาย.....	6
3. การดูดซับ.....	7
3.1 การดูดซับ.....	7
3.2 ระบบการดูดซับของเหลวหลายสาร.....	8
3.3 ตัวดูดซับ.....	9
3.3.1 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	9
3.3.2 ไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	10
4. วิธีการทดลอง.....	13
4.1 การหาเวลาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	13
4.2 การหาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์	13

4.3 การหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วย ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์	14
4.4 การหาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วย ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์	14
4.5 การหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จาก กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและ ไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	15
5. ผลการทดลอง.....	16
5.1 ผลการหาเวลาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	16
5.2 ผลการหาสมดุลการดูดซับโซเดียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพา ไทต์.....	18
5.3 ผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วย ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	26
5.4 ผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจาก กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพา ไทต์.....	29
6 สรุปผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	38
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	38
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
รายการอ้างอิง.....	40
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก.....	42
ภาคผนวก ข.....	50
ภาคผนวก ค.....	58
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สมบัติของตัวดูดซับแต่ละชนิด.....	12
5.1	ผลการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช ในระบบ การดูดซับ โขเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลาย โขเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิด.....	23
5.2	แสดงปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการดูดซับด้วยดูดซับ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	25
5.3	แสดงปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการดูดซับด้วยดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์ในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	25
5.4	ค่าคงที่ของแบบจำลอง.....	28
5.5	ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)).....	28
5.6	ค่าคงที่ของแบบจำลอง.....	30
5.7	ความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายแต่ละชนิดที่ pH 12.....	31
5.8	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช ในระบบการดูดซับยูเรเนียมใน สารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	33
5.9	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช ในระบบการดูดซับยูเรเนียมใน สารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียม ฟอสเฟต.....	34
5.10	ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)) สำหรับ ระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	36
5.11	ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)) สำหรับ ระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	36
ก.1	แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับที่เวลาต่างๆด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	42
ก.2	แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับที่เวลาต่างๆด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	42
ก.3	แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	42

ตารางที่		หน้า
ก.27	แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมที่มีความเข้มข้น ไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 ก./ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	48
ก.28	แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมที่มีความเข้มข้น ไตรโซเดียมฟอสเฟต 80 ก./ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	49



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์.....	5
3.1	เส้นสมมูลการดูดซับ.....	8
5.1	ร้อยละการดูดซับยูเรเนียมที่ระยะเวลาการการดูดซับต่างๆกันของตัวดูดซับสองชนิด.....	16
5.2	เส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	17
5.3	แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	17
5.4	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์....	18
5.5	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	19
5.6	แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	21
5.7	แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	21
5.8	แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต	22
5.9	แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	22
5.10	แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์ ของระบบการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	23
5.11	แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์ ของระบบการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	24
5.12	แสดงเส้นการดูดซับตามแบบจำลองของแลงมัวร์ และเส้นการดูดซับที่ได้จากการทดลองของระบบการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	25

ภาพที่	หน้า	
5.13	แสดงเส้นการดูดซับตามแบบจำลองของแลงมัวร์ และเส้นการดูดซับที่ได้จากการทดลองของระบบการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	25
5.14	แสดงเส้นการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	26
5.15	แสดงการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	26
5.16	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	27
5.17	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	28
5.18	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต.....	29
5.19	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	30
ข.1	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	50
ข.2	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	50
ข.3	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	51
ข.4	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 15 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	51
ข.5	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 20 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	52
ข.6	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 40 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	52
ข.7	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	53
ข.8	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 80 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	53

ภาพที่	หน้า
ข.9	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 54
ข.10	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 54
ข.11	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 55
ข.12	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 15 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 55
ข.13	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 20 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 56
ข.14	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 40 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 56
ข.15	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 57
ข.16	แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 80 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต..... 57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไตรโซเดียมฟอสเฟต(Na_3PO_4) เป็นสารประกอบไอออนิกชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยอะตอมของโซเดียมและหมู่ฟอสเฟต มีมวลโมเลกุล 163.94 มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ สารประกอบในกลุ่มนี้ที่สำคัญประกอบด้วย โมโนโซเดียมฟอสเฟต (NaH_2PO_4) ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) มีการใช้ประโยชน์สารประกอบโซเดียมฟอสเฟตในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ใช้ในระบบบำบัดน้ำ เป็นส่วนประกอบในสารรักษาความชื้นในอาหาร ยา ระบาย เป็นวัตถุอันตรายในอุตสาหกรรมผงซักฟอก ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวก่อนจะทาสี ใช้ในระบบบำบัดน้ำ แก้ปัญหาตะกรันในระบบท่อ ระบบน้ำถ่ายเทความร้อนที่มีความกระด้างของน้ำสูงเพื่อป้องกันการอุดตัน เป็นต้น กระบวนการผลิตโซเดียมฟอสเฟตในระดับอุตสาหกรรมนั้น มีวิธีการผลิตอยู่หลายวิธีขึ้นกับวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โมโนโซเดียมฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) สามารถผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และ โซดาแอช(Na_2CO_3) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ส่วนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตนั้น จะแตกต่างออกไปโดยต้องใช้โซดา(NaOH) แทนโซดาแอช เพื่อให้อะตอมของโซเดียมสามารถเข้าไปแทนที่อะตอมได้ถึงไฮโดรเจนตัวที่สาม

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก เป็นหน่วยงานในสังกัดสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีพันธกิจในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์เพื่อผลิตธาตุหายาก ทอเรียมและยูเรเนียม เพื่อใช้สำหรับงานวิจัย นอกจากผลผลิตหลักข้างต้นแล้ว ยังได้ไตรโซเดียมฟอสเฟตเป็นผลผลิตพลอยได้อีกด้วย โดยไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จะอยู่ในรูปของผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตโคเคะไฮเดรต($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) และเนื่องจากในแร่โมนาไซต์มียูเรเนียมซึ่งเป็นสารรังสีเป็นส่วนประกอบอยู่ ทำให้มียูเรเนียมปนเปื้อนอยู่ในผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตนี้ด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดปริมาณยูเรเนียมในผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตก่อนที่จะนำไปใช้

การลดปริมาณยูเรเนียมในผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตนั้น จะกระทำในสถานะที่เป็นสารละลาย ดังนั้นจึงต้องนำผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตไปละลายน้ำก่อน ส่วนวิธีการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายนั้นก็มีอยู่หลายวิธี เช่น การสกัดด้วยสารสกัดชนิดต่างๆ การตกตะกอนและกรอง การดูดซับ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้วิธีการดูดซับ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพดี ไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่ใช้คือไตรแคลเซียมฟอสเฟต($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)และไฮดรอกซีอะพาไทต์($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ซึ่งสามารถหาได้ง่าย มีเสถียรภาพทั้งทางเคมีและทางกล และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

หาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) หาเวลาในการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยตัวดูดซับสองชนิด คือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียม 0.93 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12

2) หาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยตัวดูดซับสองชนิดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นโซเดียม 0.84 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12

3) หาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยตัวดูดซับสองชนิดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียม 0.93 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12

4) หาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต ด้วยตัวดูดซับสองชนิดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นของโซเดียมเริ่มต้น 47.2 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12

5) หาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมและโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต ด้วยตัวดูดซับสองชนิดคือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ความเข้มข้นของโซเดียมเริ่มต้น 39.6 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 38.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)

บทที่ 2

ยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต

2.1 ไตรโซเดียมฟอสเฟต

ในระยะหลายสิบปีที่ผ่านมาการใช้ประโยชน์ของปุ๋ยเคมี กรดฟอสฟอริก เกลือฟอสเฟต และอนุพันธ์ของฟอสเฟตมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆมากขึ้น มีผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่เกิดขึ้นจำนวนมาก ประกอบกับการพัฒนาการศึกษาเกี่ยวกับฟอสฟอรัสในรูปแบบสารประกอบต่างๆ ทำให้มีปริมาณการใช้งานในแต่ละปีมากขึ้น นอกจากนี้สารประกอบฟอสฟอรัสยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญชนิดหนึ่งในสิ่งมีชีวิต เช่น แคลเซียมฟอสเฟตในกระดูก รวมทั้งมีความสามารถในการเกิดเป็นสารประกอบร่วมกับอะตอมของโลหะต่างๆและสามารถเกิดเป็นโพลีเมอร์กับสารอินทรีย์และอนินทรีย์ชนิดต่างๆได้

โซเดียมฟอสเฟต(Na_3PO_4) เป็นสารประกอบของธาตุฟอสฟอรัสซึ่งอะตอมของฟอสฟอรัสถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนสี่อะตอม ตั้งอยู่ที่ใจกลางของรูปผลึกทรงแปดหน้า มีมวลโมเลกุล 163.94 มีลักษณะเป็นผงสีขาว สารประกอบในกลุ่มที่น่าสนใจประกอบด้วย โมโนโซเดียมฟอสเฟต ไดโซเดียมฟอสเฟต ไตรโซเดียมฟอสเฟต สารประกอบสองชนิดแรกผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างกรดฟอสฟอริกและโซดาแอช และสารละลายที่ได้จะถูกระเหยจนให้แห้งจากนั้นจึงบดให้ได้ขนาดตามต้องการ ไตรโซเดียมฟอสเฟตผลิตจากกระบวนการดังกล่าวด้วยเช่นกัน แต่เติมโซดาไฟเพิ่มเข้าไปเพื่อให้อะตอมของโซเดียมเข้าไปแทนไฮโดรเจนตัวที่สามของกรดฟอสฟอริก การใช้ประโยชน์ของสารประกอบโซเดียมฟอสเฟตเหล่านี้มีหลากหลาย เช่น ใช้ในระบบบำบัดน้ำเพื่อแก้ปัญหาน้ำกระด้าง ผงฟู วัสดุทนไฟ ผงซักฟอก ผงทำความสะอาด ฯลฯ

2.2 ยูเรเนียม

ยูเรเนียมในธรรมชาติจะอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ในแหล่งน้ำธรรมชาติก็มียูเรเนียมอยู่ โดยในทะเลจะมียูเรเนียมอยู่ 0.002 ส่วนในล้านส่วน ในน้ำบาดาลจะมียูเรเนียม 0.0002 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมก็มียูเรเนียมอยู่ประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน ยูเรเนียมในธรรมชาติ ประกอบด้วย ยูเรเนียม-235 ประมาณ 0.71% ยูเรเนียม-238 ประมาณ 99.28 % และ U-234 ประมาณ 0.0054% โดยทั่วไปมีปริมาณ 1 - 2 ส่วนในล้านส่วนสำหรับในพื้นที่ทั่วไป ซึ่งมีปริมาณมากกว่าแอนติโมนี บิสมีท์ พรอท เงิน และทอง และมีปริมาณใกล้เคียงกับโคบอลต์ ตะกั่ว และโมลิบดีนัม สำหรับในประเทศไทยแร่โมนาไซต์ซึ่งเป็นหางแร่ดีบุกและถูกใช้เป็นตัวดูดซับของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากในการผลิตธาตุหายากมีปริมาณยูเรเนียมประมาณร้อยละ 0.3 ทอเรียมประมาณร้อยละ 5 โดยมีมวล

ยูเรเนียมใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ โดยจะผ่านกระบวนการที่ทำให้ระดับของ U-235 สูงกว่าธรรมชาติ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชิงพาณิชย์โดยทั่วไป ใช้ยูเรเนียมที่มี U-235

ร้อยละ 2-3 โดยมวล แต่ก็ยังมีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์บางชนิดที่ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นยูเรเนียมธรรมชาติ ซึ่งมี U-235 น้อยกว่าร้อยละ 1 โดยมวล ได้นอกจากนี้ยูเรเนียมยังใช้ในการผลิตหัวกระสุนที่มีประสิทธิภาพในการทะลุทะลวงสูง

สารประกอบยูเรเนียมทุกไอโซโทปเป็นสารพิษ และมีกัมมันตภาพรังสี ถ้าได้รับรังสีในปริมาณที่ต่ำ อาจจะเป็นพิษต่อไต ผลที่เกิดจากรังสีส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ เนื่องจากรังสีอัลฟาซึ่งส่วนใหญ่มาจากการสลายตัวของ U-238 เคลื่อนที่ได้ในระยะสั้นเท่านั้น คนทั่วไปจะได้รับยูเรเนียมหรือไอโซโทปที่เกิดขึ้น โดยการหายใจเอาฝุ่นในอากาศ หรือจากควันบุหรี่จากใบยาสูบที่ปลูกโดยใช้ปุ๋ยฟอสเฟต หรือโดยการดื่มหรือทานอาหาร สำหรับคนทั่วไปที่ได้รับยูเรเนียมจากรับประทานอาหาร โดยเฉลี่ยจะได้รับยูเรเนียม 1 ถึง 4 ไมโครกรัมต่อวัน ปริมาณยูเรเนียมในอากาศมีน้อย ยูเรเนียมสามารถเข้าสู่ร่างกายเมื่อหายใจหรือกินอาหาร หรือบางกรณีอาจจะเข้าทางบาดแผล ยูเรเนียมจะไม่ซึมผ่านผิวหนัง และรังสีอัลฟาที่มาจากยูเรเนียมก็ไม่สามารถผ่านผิวหนังเข้าสู่ร่างกายได้ ยูเรเนียมที่อยู่ภายนอกร่างกายจึงมีอันตรายน้อยกว่าเมื่อเข้าไปในร่างกายแล้ว ยูเรเนียมไม่ใช่สารก่อมะเร็งแต่เมื่อเข้าสู่ร่างกายแล้วอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อไตได้ ระดับของยูเรเนียมในน้ำดื่มที่ปลอดภัยคือ 20 ไมโครกรัมต่อลิตร

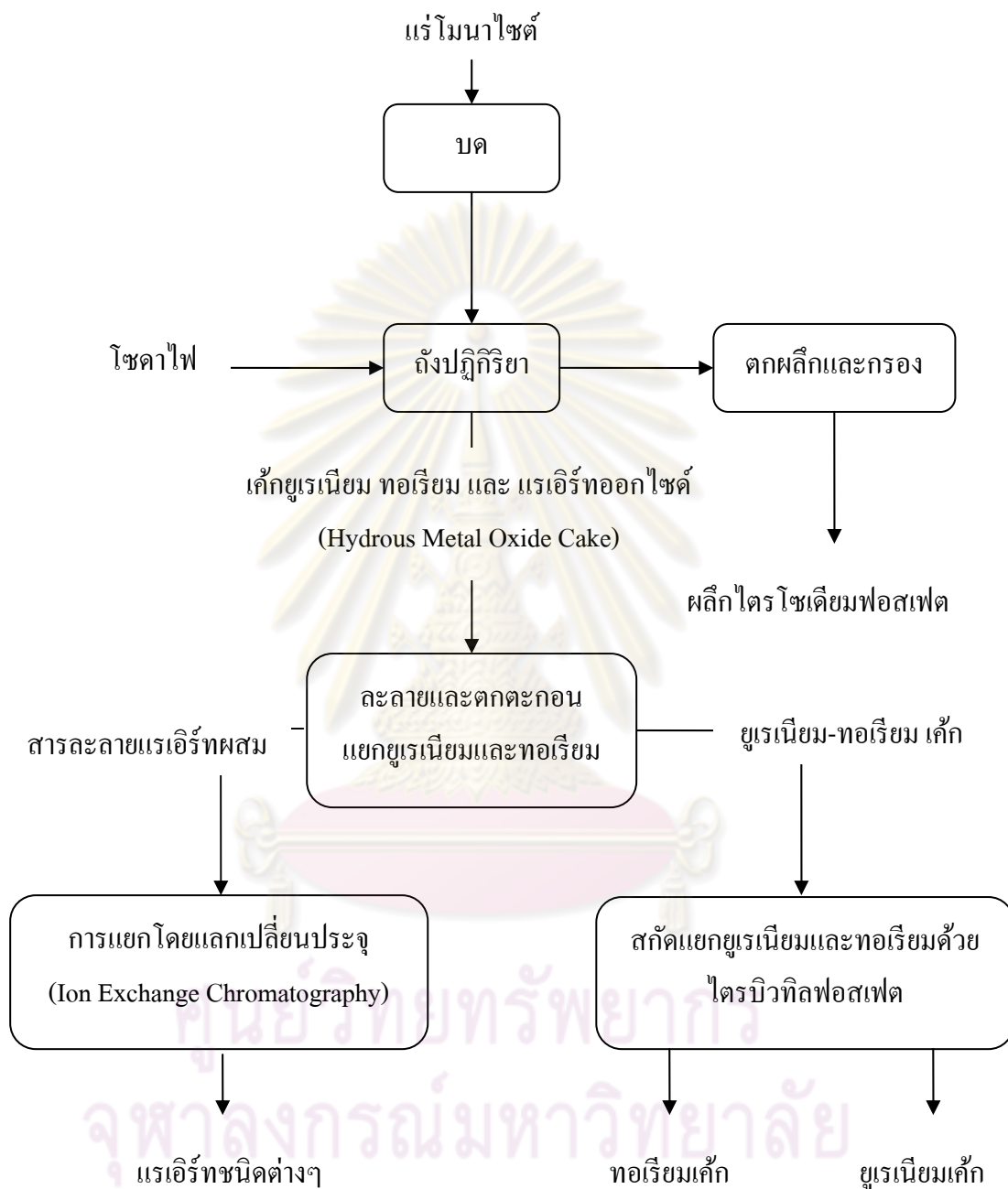
2.3 การผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากตั้งอยู่ในเทคโนโลยี ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี เป็นหน่วยงานในสังกัด สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีพันธกิจในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์เพื่อผลิตธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียมสำหรับงานวิจัย นอกจากนี้ยังมีผลผลิตพลอยได้เป็นไตรโซเดียมฟอสเฟต โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นแร่โมนาไซต์ซึ่งเป็นหางแร่ดิบที่ผ่านการแต่งมาแล้ว มีปริมาณธาตุหายากรวมทั้งยูเรเนียมและทอเรียมอยู่ประมาณร้อยละ 50 โดยมวลกระบวนการผลิตจะแบ่งเป็นสามส่วน คือ งานแปรสภาพแร่ งานแรเออร์ท และงานยูเรเนียมและทอเรียม

งานแปรสภาพแร่จะมีหน้าที่เปลี่ยนสภาพวัตถุดิบคือ แร่โมนาไซต์ให้เป็นสารละลายในเตาของธาตุหายาก และ ยูเรเนียมและทอเรียมเค้ก โดยสารละลายในเตาของธาตุหายากจะถูกส่งไปงานแรเออร์ทเพื่อแยกธาตุหายากแต่ละธาตุออกมา ส่วนยูเรเนียมและทอเรียมเค้ก จะถูกส่งไปงานยูเรเนียมและทอเรียมเพื่อสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากกัน

การแยกธาตุหายากแต่ละธาตุออกจากกันจะใช้เทคนิค Ion Exchange Chromatography ในขณะที่การแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากกันจะใช้เทคนิค Liquid-Liquid Extraction ยูเรเนียมที่ได้จะอยู่ในรูปของโซเดียมไดยูเรเนต ($\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$) ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 50 โดยมวล ส่วนทอเรียมอยู่ในรูปของ ทอเรียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Th}(\text{OH})_3$) ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 65 โดยมวล

ผังกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.1 กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์

จากกระบวนการข้างต้น ผลึกไตรโซเดียมฟอสเฟตซึ่งเป็นผลผลิตพลอยได้ มีส่วนประกอบ ดังนี้ ไตรโซเดียมฟอสเฟตโคเคะไฮเดรต ร้อยละ 88 โดยน้ำหนัก โซดาไฟ ร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก และยูเรเนียม 100 - 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยจึงจำเป็นต้องแยกยูเรเนียมที่ปนอยู่ในไตรโซเดียมฟอสเฟตออกเสียก่อนที่จะนำไปใช้

2.4 การลดปริมาณยูเรเนียมในสารละลาย

การแยกไอออนของโลหะออกจากสารละลายนั้นมีอยู่หลายวิธี โดยหลักการคือการทำให้ไอออนโลหะที่ต้องการแยกนั้นเข้าไปอยู่ในอีควิวภาคหนึ่ง โดยการทำให้เกิดอีควิวภาคใหม่ขึ้นหรือการเติมอีควิวภาคเข้าไปเพื่อให้ไอออนของโลหะเข้าไปอยู่ในอีควิวภาคที่เดิมเข้าไปนั้น การลดปริมาณยูเรเนียมในงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปที่การลดปริมาณยูเรเนียมในน้ำทิ้งที่เกิดจากสถานที่ที่มีดำเนินกิจกรรมทางด้านนิวเคลียร์ หรือการลดปริมาณยูเรเนียมในน้ำบาดาลที่มีปริมาณยูเรเนียมสูง วิธีการที่ใช้เช่น การตกตะกอน การกรอง การดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

สารละลายยูเรเนียมที่ใช้ในงานวิจัยส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกรดอ่อน ด่างอ่อน หรือเป็นกลาง ความเข้มข้นยูเรเนียมอยู่ระหว่าง 83 – 400 ไมโครกรัมต่อลิตร รวมทั้งไอออนอื่นๆ มีปริมาณไม่มาก ส่วนสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นของโซเดียม 39.6 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นยูเรเนียม 38.8 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 12 ซึ่งมีความแตกต่างกับงานวิจัยอื่นมาก ทำให้บางกระบวนการที่ใช้ในการลดปริมาณยูเรเนียมในน้ำบาดาลใช้ไม่ได้กับการลดปริมาณยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากการกระบวนการแปรสภาพแร่ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกการดูดซับเป็นกระบวนการที่จะศึกษา เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพดีและไม่ซับซ้อน อีกทั้งตัวดูดซับที่ใช้คือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น มีประสิทธิภาพในการดูดซับยูเรเนียมได้ดี สามารถหาได้ง่าย มีเสถียรภาพทั้งทางเคมีและทางกล และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการซึ่งตัวถูกละลายที่เราสนใจถูกถ่ายเทไปสู่วัฏภาคของแข็งซึ่งไม่ละลายในวัฏภาคเดิม ในกระบวนการดูดซับ โมเลกุล อะตอม หรือไอออนในก๊าซหรือของเหลว จะแพร่ไปที่ผิวหน้าของของแข็งจากนั้น เกิดพันธะกับพื้นผิวนั้นหรืออาจจับกันด้วยแรงระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนก็ได้ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับจะเรียกว่า “ตัวถูกดูดซับ” ส่วนของแข็งที่เป็นตัวดูดซับนั้นเรียกว่า “ตัวดูดซับ” ถ้าต้องการให้การดูดซับดี นั่นคือปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักมีค่ามาก จะต้องทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวมากๆ โดยมีความพรุนสูง

การดูดซับแบ่งเป็นสองชนิดคือการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี โดยแบ่งตามชนิดของแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลหรือไอออนในของเหลวกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นเมื่อแรงระหว่างไอออนในของเหลวกับพื้นผิวตัวดูดซับมีค่ามากกว่าแรงระหว่างไอออนเหล่านั้นในของเหลว การดูดซับทางกายภาพอาจเป็นแบบชั้นเดียว สองชั้น หรือหลายชั้น หากเป็นแบบชั้นเดียว จะสามารถย้อนกลับได้ หากเป็นแบบหลายชั้นกระบวนการก็จะมี ความซับซ้อนและยากที่จะคาดการณ์ ในขณะที่การดูดซับแบบเคมี จะมีพันธะเคมีระหว่างตัวที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งจะปล่อยความร้อนออกมามากกว่าการดูดซับแบบกายภาพ

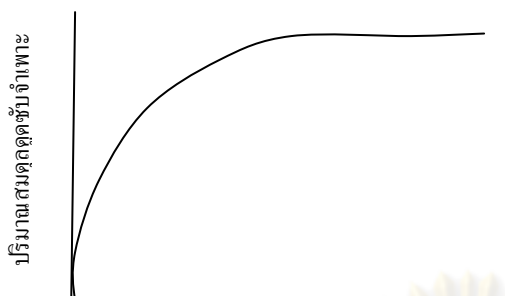
3.1 สมดุลการดูดซับ

สมดุลการดูดซับจะถูกอธิบายในรูปแบบของ

1. ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหล
2. ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักหรือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

เมื่อวาดกราฟระหว่างข้อ 2 ต่อ ข้อ 1 ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟที่เรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งแสดงปริมาณการดูดซับที่สมดุลกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลว ดังรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกละลาย

รูปที่ 3.1 เส้นสมดุลการดูดซับ

3.2 ระบบการดูดซับของเหลวหลายสาร

การคำนวณในระบบการดูดซับของเหลวหลายสาร จะต้องพิจารณาผลของสารชนิดอื่นๆ ในระบบซึ่งมีผลต่อการดูดซับด้วย โดยใช้สมการ Extended Langmuir Equation

$$q_i = \frac{(q_i)_m K_i C_i}{1 + \sum_j K_j C_j} \quad \text{-----(3-1)}$$

อีกสมการหนึ่งคือ Extended Langmuir-Freundlich Equation

$$q_i = \frac{(q_i)_0 k_i C_i^{1/n_i}}{1 + \sum_j k_j C_j^{1/n_j}} \quad \text{-----(3-2)}$$

- โดย q คือ ปริมาณการดูดซับ (น้ำหนักหรือ โมลต่อน้ำหนักหรือพื้นที่ผิว)
 q_m, q_0 คือ ปริมาณการดูดซับสูงสุด (น้ำหนักหรือโมลต่อน้ำหนักหรือพื้นที่ผิว)
 K, k คือ ค่าคงที่การดูดซับ
 C คือ ความเข้มข้น (น้ำหนักหรือโมลต่อปริมาตร)
 i คือ สารที่เราสนใจ
 j คือ สารชนิดอื่นในระบบ
 n_i, n_j คือ ค่าคงที่มีค่าระหว่าง 1 - 5

ค่า q_m, q_0, k และ K หาได้จากการทดลองในระบบเดี่ยวของตัวถูกละลายแต่ละชนิด อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบที่ตัวถูกละลายแต่ละชนิดมีผลต่อกัน (solute-solute interaction) ค่า q_m, q_0, k และ K ที่หาได้จากระบบหลายสารจะให้ผลที่แม่นยำกว่า

3.3 ตัวดูดซับ

ของแข็งเกือบทุกชนิดสามารถใช้เป็นตัวดูดซับได้แต่มีแค่บางชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือสามารถดูดซับไอออนที่สนใจได้มากกว่าไอออนตัวอื่นๆและปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักมีค่ามาก ซึ่งสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวที่ต้องจะมีค่ามากๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตตัวดูดซับนั้นๆ

ตัวดูดซับมีหลายชนิด แต่ตัวดูดซับที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีความสามารถสูงในการจับไอออนที่สนใจ
2. มีความสามารถในการดูดซับปริมาณไอออนที่สนใจสูง
3. มีความสามารถดูดซับในอัตราที่รวดเร็ว
4. มีความเสถียรทางเคมีและอุณหภูมิ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะใช้งานอยู่
5. มีความแข็งแรงทางกลศาสตร์และทนต่อการกัดกร่อน
6. ใช้งานได้ง่าย สามารถป้อนเข้าและดึงออกจากภาชนะที่ใช้ได้ง่าย
7. มีความสามารถต้านทานต่อการเกิด fouling สูง
8. ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นที่จะรบกวนกระบวนการดูดซับ
9. สามารถนำกลับไปมาใช้ใหม่ได้
10. ราคาถูก

ตัวดูดซับที่ใช้ทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมคือ ถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล activated alumina และ molecular-sieve zeolites ในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และ ไฮดรอกซีอะพาไทต์

3.3.1 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

เป็นสารประกอบสูตรโมเลกุลคือ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ หรือเรียกว่า แคลเซียมออร์โทฟอสเฟต หรือ bone ash ในสินแร่ แคลเซียมฟอสเฟตจะหมายถึงแร่ที่มีไอออนของแคลเซียม(Ca^{2+}) กับออร์โทฟอสเฟต(PO_4^{3-}) เมตาฟอสเฟตหรือไพโรฟอสเฟต($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) บางครั้งก็รวมตัวกับไฮโดรเจนหรือไฮดรอกไซด์ไอออน โดยเฉพาะในแร่ อะพาไทต์ (Apatite) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ โดยที่ X คือ ไอออนของฟลูออไรด์ คลอรีน ไฮดรอกไซด์หรือปนกันและจะเรียกว่า ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ถ้า X คือ ไอออนของไฮดรอกไซด์ แคลเซียมฟอสเฟตที่พบในธรรมชาติ จะไม่อยู่ในรูปบริสุทธิ์แต่จะมีธาตุอื่นปนอยู่ด้วยกัน หินฟอสเฟตส่วนใหญ่มีฟอสเฟต (P_2O_5) ปนอยู่ร้อยละ 30 – 40 โดยมวล ในกระดูกและฟันก็มีส่วนประกอบของแคลเซียมฟอสเฟตด้วย ไตรแคลเซียมฟอสเฟตถูกใช้ในลักษณะผงเพื่อเป็นสารป้องกันการแข็งตัว(Anti-caking agent) นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัตถุบิในการผลิตกรดดินประสิวและปุ๋ยเคมี

Aklil, Mouflih and Sebti(2009) ได้ทำการทดลองการดูดซับไอออนโลหะหนักของตะกั่ว ทองแดง สังกะสี ออกจากน้ำ โดยใช้ calcined phosphate เป็นตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับนี้เตรียมจากหิน ฟอสเฟต ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงล้างน้ำและเผาที่ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสอีกครั้ง เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง สารละลายที่ใช้มีความเข้มข้นของตัวถูก ดูดซับ 50 มก./ล. pH 5 อัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารละลายเท่ากับ 0.1/100 กรัมต่อมิลลิลิตร ผลการ ทดลองพบว่า calcined phosphate สามารถดูดซับโลหะหนักดังกล่าวได้ดี โดยมีความสามารถ โกล่เกลี่ยหรือดีกว่าตัวดูดซับทางการค้าที่ใช้กันทั่วไป ดังนั้นแคลเซียมฟอสเฟตจึงเป็นตัวดูดซับชนิด หนึ่งที่น่าสนใจในการดูดซับไอออนโลหะหนัก เนื่องจากหาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพดี

3.3.2 ไฮดรอกซีอะพาไทต์หรือแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์

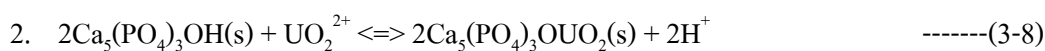
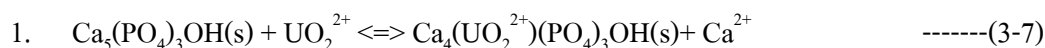
ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารประกอบฟอสเฟตชนิดหนึ่ง มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ ในธรรมชาติปรากฏอยู่ในรูปของสินแร่หนึ่งในหินฟอสเฟต เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูก และฟัน ไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมและฟอสเฟต หรือจะสังเคราะห์จากแร่อะพาไทต์หรือจากกระดูกสัตว์ก็ได้ โดยวิธีการใช้ความร้อน(Thermal Process) นอกจากนี้ยังพบใน ปะการัง ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากการ สังเคราะห์ตามงานวิจัยของ Smiciklas, Onjia and Raicevic(2004) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากัน ระหว่างสารละลายกรดฟอสฟอริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง ไฮดรอกซีอะ พาไทต์มีความสามารถเปลี่ยนไอออนโลหะหนักในสารละลายให้อยู่ในรูปตะกอนที่ไม่ละลายน้ำได้ ไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับโลหะหนักและโลหะกลุ่มแอกติไนด์ได้ดี ตะกอนที่เกิดขึ้นมี เสถียรภาพ จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในการกำจัดไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในระบบต่างๆ งานวิจัยที่ เกี่ยวข้องกับการลดปริมาณยูเรเนียมด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่น่าสนใจมีดังนี้

Jeanjean and others(1995) ได้ศึกษาการลดปริมาณยูเรเนียมและโลหะหนักโดยใช้ ไฮดรอก ซีอะพาไทต์เป็นตัวดูดซับ สารละลายที่ใช้มียูเรเนียม 90 มก./ล. อัตราส่วนสารละลายต่อตัวดูดซับ เท่ากับ 25/50 มล.ต่อมก. ที่อุณหภูมิ 20 C pH 5 เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 1 นาที ไปจนถึง 48 ชั่วโมง ซึ่งสรุปว่าสามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดี กลไกที่เกิดขึ้นคือการละลายและตกตะกอน การแลกเปลี่ยน ไอออนและ Surface Adsorption

กลไกการละลายและตกตะกอน เป็นดังนี้



และกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนและ Surface Adsorption เป็นดังนี้



นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษากลไกการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายที่สภาวะต่างๆ เช่น งานวิจัยของ Krestou, Xenidis and Panias(2003) ได้ทำการวิจัยการดูดซับยูเรเนียมซึ่งมีความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 1 มก./ล. ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ สรุปว่า การแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นกลไกการละลายและตกตะกอน สามารถลดปริมาณยูเรเนียมได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ภายในช่วง pH ระหว่าง 3 - 11 แต่ในช่วงเป็นด่างมากๆ ยูเรเนียมจะละลายกลับเข้าไปในสารละลาย โดยที่ pH 13 ยูเรเนียมจะละลายกลับถึงร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก อีกงานวิจัยหนึ่งที่น่าสนใจคืองานของ Simon and others(2004) เป็นการศึกษาการลดปริมาณยูเรเนียมในน้ำบาดาลในระบบต่อเนื่องด้วยหอดูดซับโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวดูดซับและทรายเป็นตัวเสริมด้วยอัตราส่วน 1:9 สารละลายที่ใช้มียูเรเนียมเข้มข้น 3.1 มก./ล. อัตราการไหล 0.286 ลิตรต่อชั่วโมง หอดูดซับมีความยาว 0.2 เมตร สรุปได้ว่า อัตราการดูดซับเป็นแบบ pseudo first-order kinetics แสดงได้ดังสมการ

$$d[U]/dt = -k[U] \quad , \quad k = 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad \text{-----}(3-9)$$

โดยไฮดรอกซีอะพาไทต์ 1 กิโลกรัมสามารถดูดซับยูเรเนียมได้ถึง 2900 มิลลิกรัม

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ในธรรมชาติมีส่วนประกอบแตกต่างกันตามสภาพแวดล้อมที่เกิด ลักษณะที่แตกต่างกันนั้นส่งผลต่อสมบัติการดูดซับของไฮดรอกซีอะพาไทต์แต่ละชนิดด้วย งานวิจัยของ Raicevic and others(2006) ซึ่งได้ทดลองดูดซับยูเรเนียมด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากแหล่งต่างๆ พบว่ากระบวนการดูดซับยูเรเนียมที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์แต่ละชนิด โดยประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมเป็นที่น่าพอใจและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากธรรมชาติในการกำจัดยูเรเนียมในระดับโรงงานขนาดใหญ่ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 สมบัติของตัวดูดซับแต่ละชนิด

	ไฮดรอกซีอะพาไทต์	ไตรแคลเซียมฟอสเฟต
มวลโมเลกุล	502.31	310.18
พื้นที่ผิว(ตรม.ต่อกรัม) ด้วยวิธี BET (Autosorb 1C, Quantachrome,U.S.A)	89.51	11.35
ขนาดอนุภาค	17.5% > 0.15 มม. 32.5% > 0.075 มม. 31.3% > 0.045 มม. 18.7 % < 0.045 มม.	28.7% > 0.15 มม. 46.7% > 0.075 มม. 16.0% > 0.045 มม. 8.6 % < 0.045 มม.
ค่าคงที่การละลาย (Solubility product)	2.34×10^{-59}	2.07×10^{-33}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ที่ pH 12 โดยใช้ตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต(Ca_3PO_4) และไฮดรอกซีอะพาไทต์($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) และเนื่องจากในระบบที่ศึกษามีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วนคือ ยูเรเนียม โซเดียมไฮดรอกไซด์ และไตรโซเดียมฟอสเฟต ดังนั้นในการทดลองจึงได้แบ่งระบบออกเป็น 4 ระบบ คือ ระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายที่มี pH 12 ระบบการดูดซับโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มี pH 12 ระบบการดูดซับโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ pH 12 และระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ทั้งนี้เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากระบบย่อยๆแต่ละระบบมาศึกษา เปรียบเทียบกับระบบโดยรวมทั้งหมด โดยมีขั้นตอนทั้งหมดดังต่อไปนี้

4.1 การหาเวลาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

4.1.1 นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมียูเรเนียมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียม 0.93 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12 มา 50 มิลลิลิตรใส่ลงในกรวยแยก (Separatory funnel) จากนั้นผสมกับไตรแคลเซียมฟอสเฟต 2 กรัม

4.1.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า Gerhardt ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายมา 10 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องเหวี่ยง(HERAEUS SEPATECH, Labofuge 200) โดยใช้ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เก็บตัวอย่างส่วนใส นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมด้วยเทคนิค ICP Spectrometer(Spectro, Spectroflame P)

4.1.3 ทำซ้ำข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 โดยเปลี่ยนเวลาในการเขย่าเป็น 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

4.1.4 ทำซ้ำข้อ 4.1.1-4.1.3 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับมาใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 0.2 กรัม

4.2 การหาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีขั้นตอนดังนี้

4.2.1 ชั่งไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.3 กรัม ใส่ลงในกรวยแยก (Separatory funnel) และผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีโซเดียม 0.84 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

4.2.2 เขย่าสารละลายด้วยความถี่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.2.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย แยกตะกอนออกจากสารละลายด้วยการกรอง นำไปอบจนแห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอนที่ได้ จากนั้นนำตะกอนไปละลายด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1% เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมด้วยเทคนิค ICP

4.2.4 ทำซ้ำข้อ 4.2.1 – 4.2.3 โดยเปลี่ยนปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้เป็น 0.5 1 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ

4.2.5 ทำซ้ำข้อ 4.2.1 – 4.2.4 โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์หนัก 0.02 0.05 0.1 0.2 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ

4.3 การเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีขั้นตอนดังนี้

4.3.1 นำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมียูเรเนียมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียม 0.93 กรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12 มา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในกรวยแยก (Separatory funnel) จากนั้นผสมกับไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.3 กรัม

4.3.2 เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่า Gerhardt ด้วยความถี่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.3.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง จากนั้นนำสารละลาย 10 มิลลิลิตร ไปเข้าเครื่อง centrifuge ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที สารละลายส่วนใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมด้วยเครื่อง ICP Spectrometer

4.3.4 ทำซ้ำข้อ 4.3.1 – 4.3.3 โดยเปลี่ยนปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้เป็น 0.5 1 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ

4.3.5 ทำซ้ำข้อ 4.3.1 – 4.3.4 โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์หนัก 0.02 0.05 0.1 0.2 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ

4.4 การหาเส้นแสดงการดูดซับโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีขั้นตอนดังนี้

4.4.1 ผสมไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.3 กรัม กับสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต ซึ่งมีโซเดียม 47.2 กรัมต่อลิตร ฟอสเฟต 64.0 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ซึ่งอยู่ในกรวยแยก (Separatory funnel)

4.4.2 เขย่าสารละลาย ด้วยความถี่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.4.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย แยกตะกอนออกจากสารละลายด้วยการกรอง นำไปอบจนแห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอนที่ได้ จากนั้นนำตะกอนไปละลายด้วยสารละลายกรดไน

ตริกเข้มข้น 1% เก็บตัวอย่างสารละลายนำไปวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมด้วยเทคนิค ICP และวิเคราะห์ปริมาณของฟอสเฟตด้วยเทคนิค Spectrophotometer (Spectroquant, Nova60, MERCK)

4.4.4 ทำซ้ำข้อ 4.4.1 – 4.4.3 โดยเปลี่ยนปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้เป็น 0.5 1 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ

4.4.5 ทำซ้ำข้อ 4.4.1 – 4.4.4 โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์หนัก 0.02 0.05 0.1 0.2 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ

4.5 การหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมและโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีขั้นตอนดังนี้

4.5.1 ผสมไตรแคลเซียมฟอสเฟตจำนวน 0.1 กรัม กับสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ซึ่งมียูเรเนียม 38.8 มิลลิกรัมต่อลิตรโซเดียม 39.6 กรัมต่อลิตรฟอสเฟต 55.65 กรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในกรวยแยก (Separatory funnel)

4.5.2 เขย่าสารละลาย ด้วยความถี่ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.5.3 วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง นำสารละลายมา 10 มิลลิลิตรเพื่อนำไปห้วยแยกตะกอนสารละลายส่วนใสที่ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมด้วยเครื่อง ICP Spectrometer

4.5.4 ทำซ้ำข้อ 4.5.1 – 4.5.3 โดยเปลี่ยนปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้เป็น 0.3 0.5 1 และ 2 กรัม ตามลำดับ

4.5.5 ทำซ้ำข้อ 4.5.1 – 4.5.4 โดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์หนัก 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 กรัม ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 ผลการหาเวลาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยไคร แคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

นำผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมที่อยู่ในสารละลายมาคำนวณหาปริมาณสมมูลดูดซับ
จำเพาะของยูเรเนียม ตามสมการ

$$\frac{(C_0 - C_t)}{m} = \text{ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (q)}$$

C_0 ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายเริ่มต้น มก./ลิตร

C_t ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายที่เวลาใดๆ มก./ลิตร

m น้ำหนักตัวดูดซับ กรัม

และจากข้อมูลจากการทดลอง นำมาคำนวณหาปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่เวลาต่างๆและ
ค่าคงที่จากสมการ

$$q_t = \frac{q_c A t}{(1 + A t)}$$

q_t ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่เวลาใดๆ (มก./ก.)

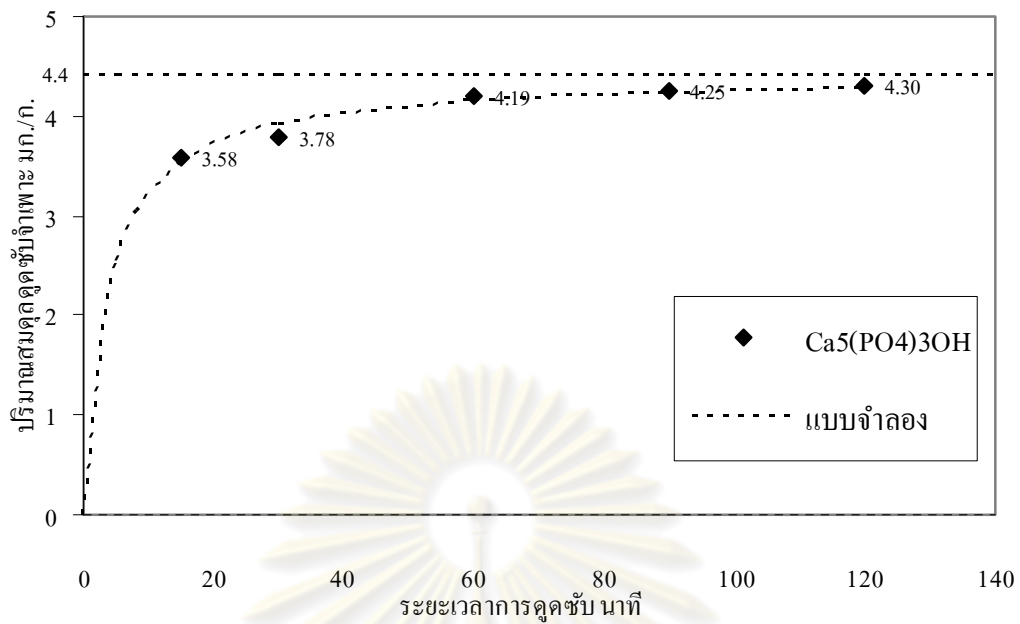
q_c ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่จุดสมดุล (มก./ก.)

A ค่าคงที่

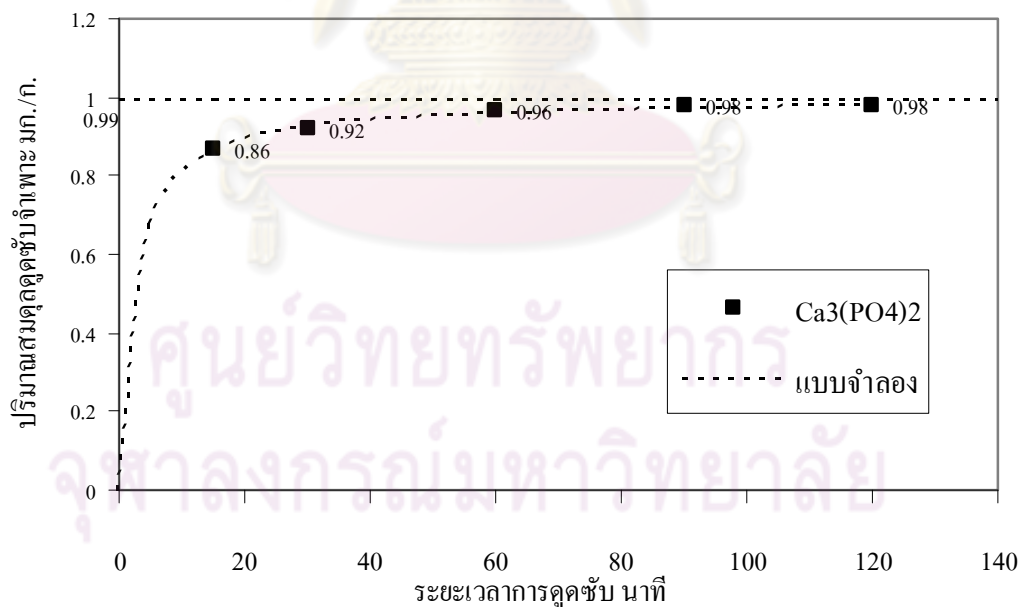
t เวลา (นาที)

จากนั้นนำค่าที่ได้มาแทนในสมการแล้วนำมาพล็อตเส้นแสดงปริมาณการดูดซับที่เวลาต่างๆ
ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ผลที่ได้เป็นดังรูป

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะของการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

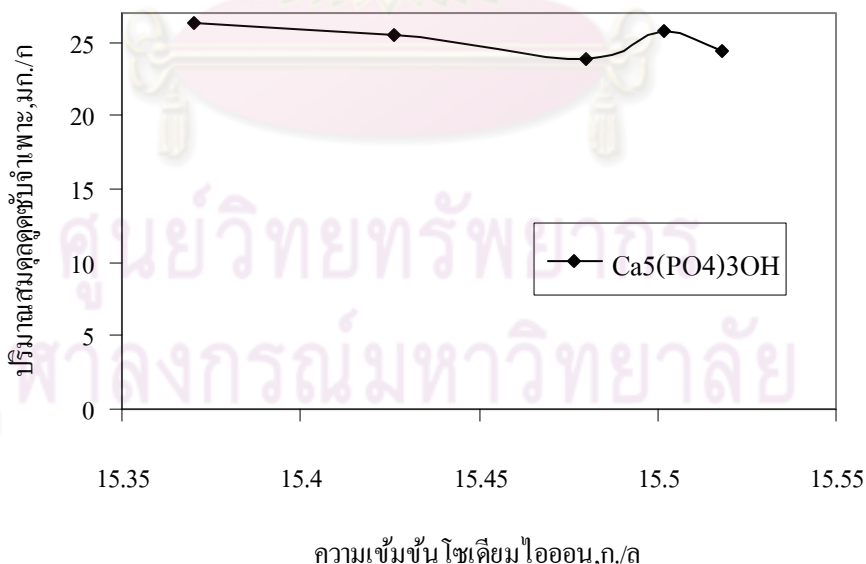


รูปที่ 5.2 ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะของการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระยะเวลาการดูดซับต่างๆ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

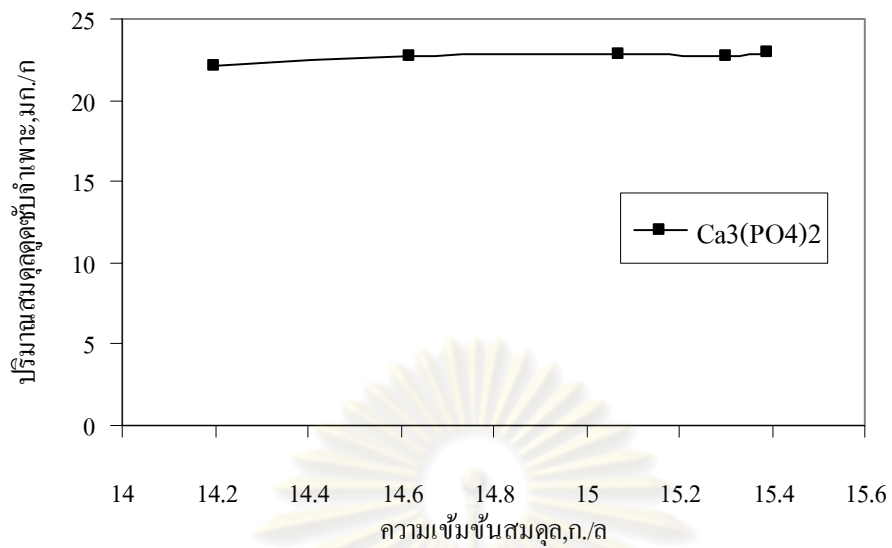
จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 พบว่า การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)และไฮดรอกซีอะพาไทต์($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากระบบเข้าสู่สมดุลทำให้ไม่เกิดการดูดซับขึ้นอีก และปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสำหรับตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟต คือ 4.4 มก./ก. และ 0.99 มก./ก. ตามลำดับ และที่เวลาการดูดซับ 1 ชั่วโมงนั้น ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับยูเรเนียมได้มากถึงร้อยละ 97 และ 95.2 ของปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะที่จุดสมดุล ดังนั้นในการทดลองการดูดซับยูเรเนียม โซเดียมและฟอสเฟตในงานวิจัยนี้ จะใช้เวลาในการดูดซับ 1 ชั่วโมง เพราะหากใช้เวลามากกว่านี้ ค่าการดูดซับที่ได้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งยังทำให้ใช้เวลาในการทดลองมากขึ้น

5.2 ผลการหาสมมูลการดูดซับโซเดียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

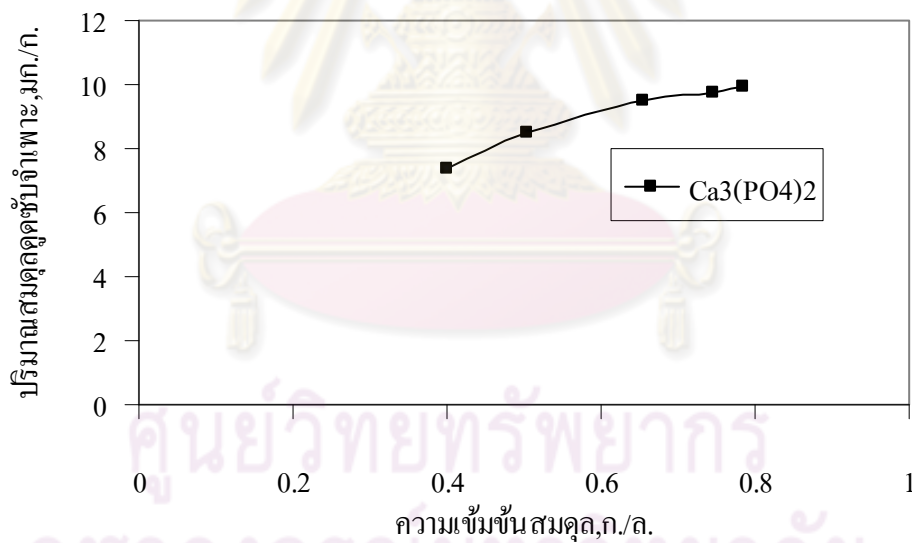
เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ปริมาณ โซเดียมหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาคำนวณหาปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะ และนำมาวาดกราฟ ร่วมกับค่าความเข้มข้นของไอออนโซเดียมในสารละลายของแต่ละระบบ จะได้ดังรูป



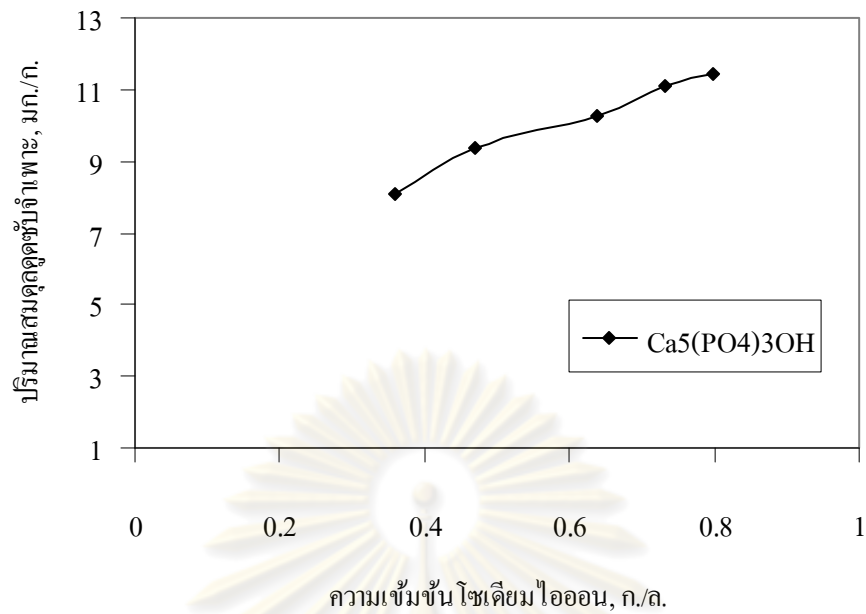
รูปที่ 5.3 แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 5.4 แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต
ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

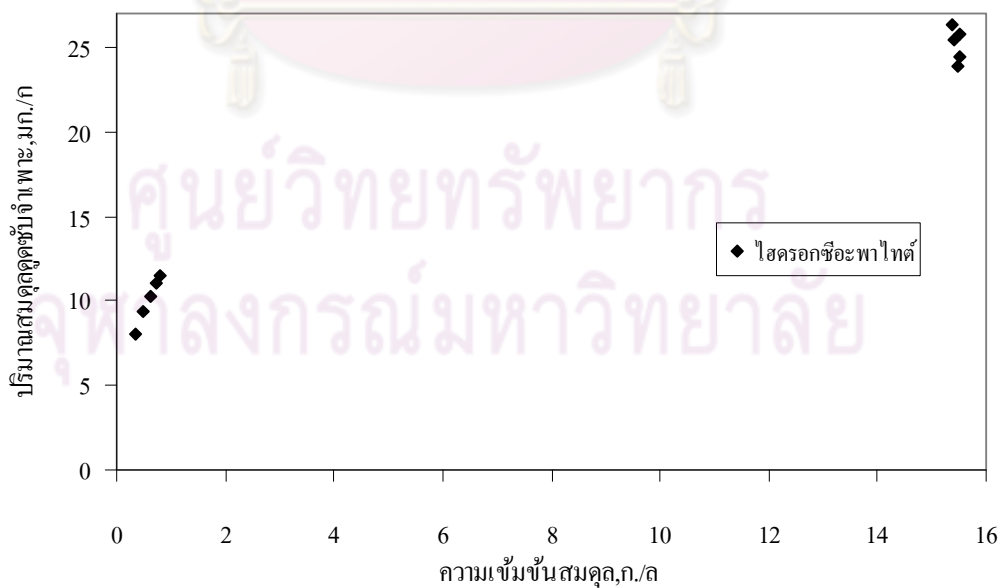


รูปที่ 5.5 แสดงเส้นการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

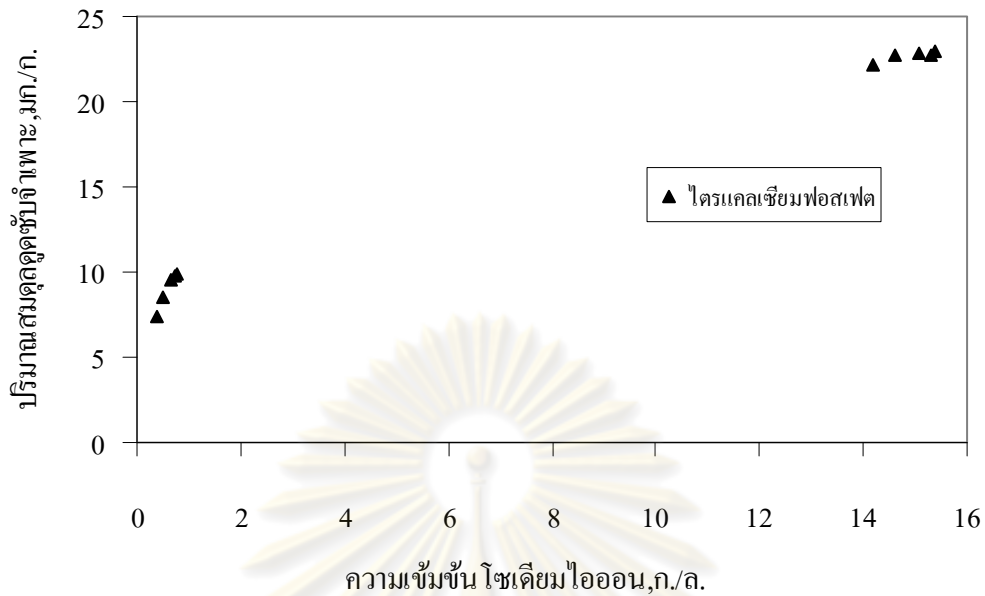


รูปที่ 5.6 แสดงเส้นการดูดซับโหเดียมไอออนในสารละลายโหเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากรูปที่ 5.3 5.4 5.5 และ 5.6 ซึ่งเป็นเส้นแสดงการดูดซับโหเดียมในสารละลายไตรโหเดียมฟอสเฟตและสารละลายโหเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อนำข้อมูลจากทั้งสองระบบมาวัดลงในรูปเดียวกันจะได้ดังรูปต่อไปนี้

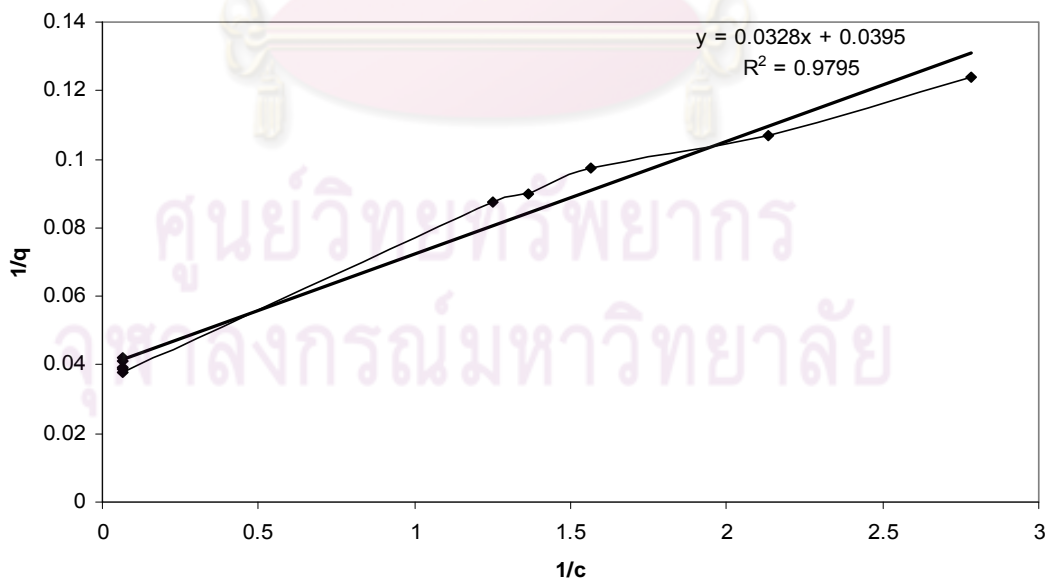


รูปที่ 5.7 แสดงเส้นการดูดซับโหเดียมไอออนในสารละลายไตรโหเดียมฟอสเฟตและสารละลายโหเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

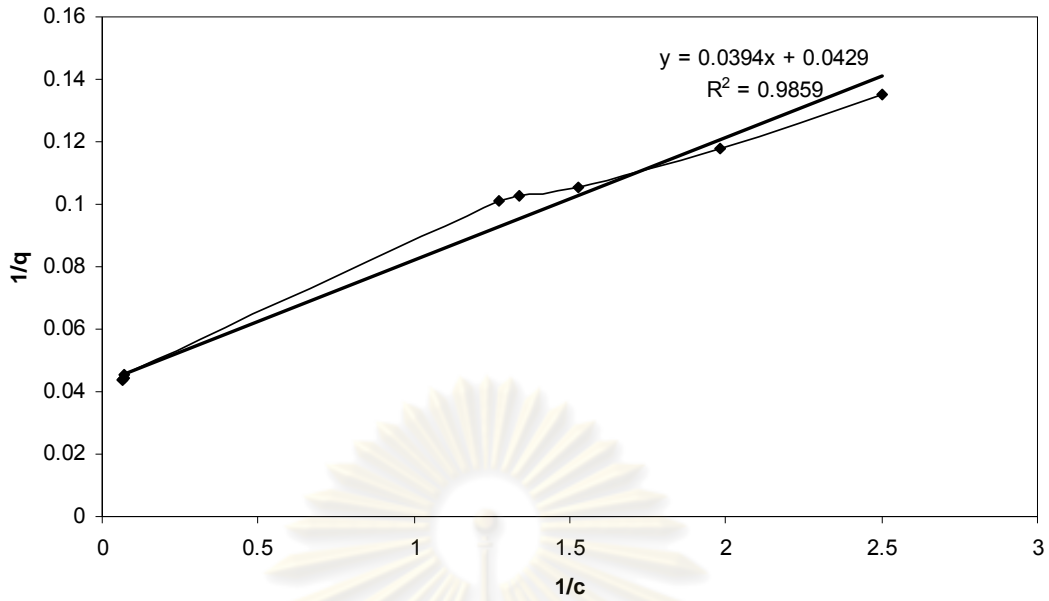


รูปที่ 5.8 แสดงเส้นการดูดซับ โขเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลาย โขเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

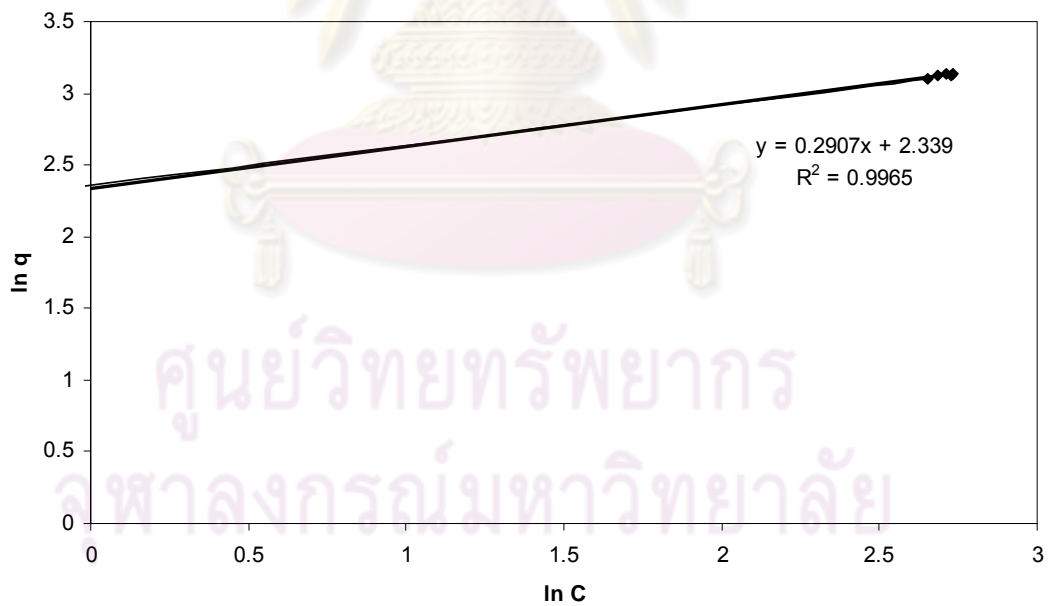
จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าข้อมูลการดูดซับ โขเดียมไอออนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตมีแนวโน้มว่าจะเป็นข้อมูลชุดเดียวกัน เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งสองระบบมาคำนวณหาค่าคงที่แบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช จะได้



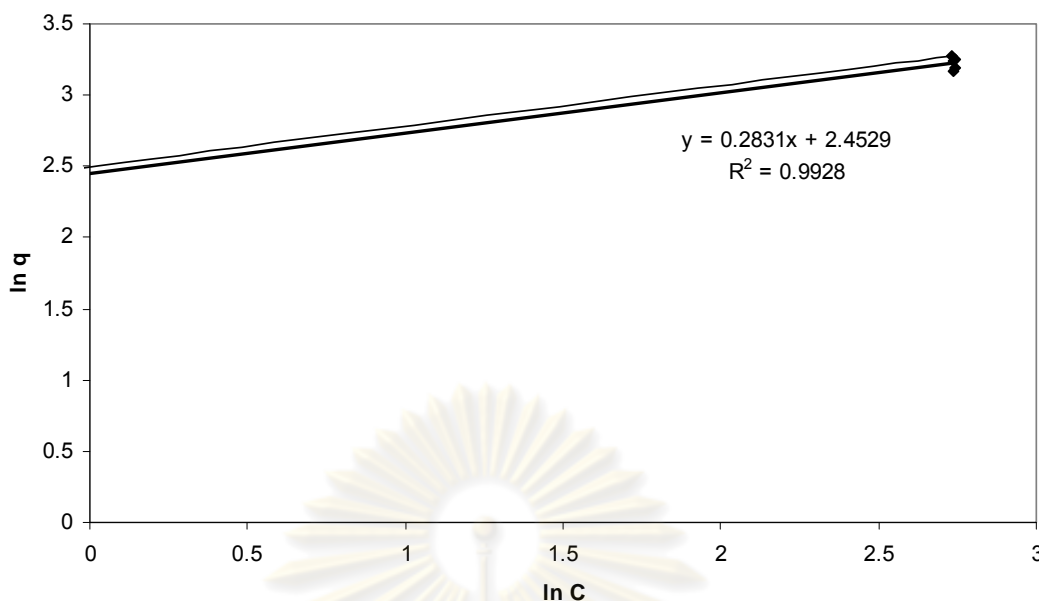
รูปที่ 5.9 แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์ ของระบบการดูดซับ โขเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 5.10 แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์ ของระบบการดูดซับไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ 5.11 แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรอนดลิช ของระบบการดูดซับไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต



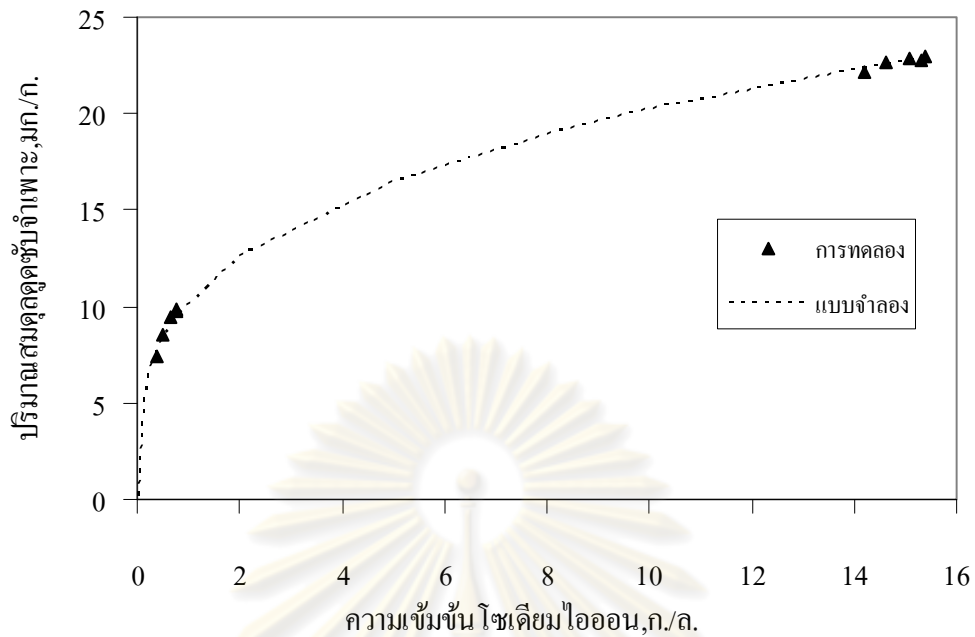
รูปที่ 5.12 แสดงการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรอนคิช ของระบบการดูดซับ โซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

ผลการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองการดูดซับของแลงมัวร์และฟรอนคิช สำหรับระบบการดูดซับ โซเดียมไอออนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ แสดงดังตาราง

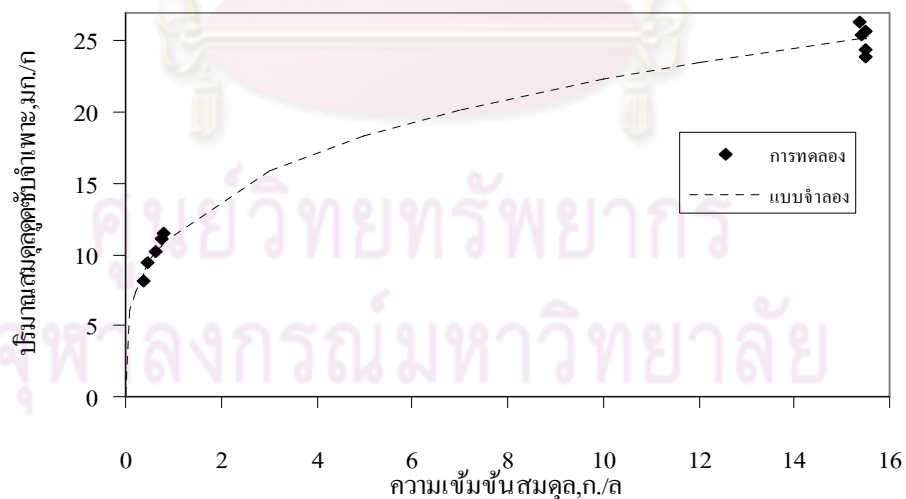
ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรอนคิช ในระบบการดูดซับ โซเดียมไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิด

ตัวดูดซับ	ค่าคงที่สมดุลของฟรอนคิช	ค่าคงที่สมดุลของแลงมัวร์
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	$n = 0.28$ $K_L = 11.6$ $R^2 = 0.9928$	$q_m = 25.3$ $K_L = 1.2$ $R^2 = 0.979$
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต	$n = 0.29$ $K_L = 10.4$ $R^2 = 0.9965$	$q_m = 23.3$ $K_L = 1.1$ $R^2 = 0.986$

จากตารางที่ 5.1 พบว่าค่า R^2 ที่ได้มีค่าใกล้ 1 นั้นแสดงว่าข้อมูลจากทั้งสองระบบสามารถเข้ากันได้ดี โดยระบบการดูดซับทั้งสองระบบเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนคิช เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้มาแทนค่าในแบบจำลอง แล้ววาดลงในรูปเดียวกับชุดข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองจะได้ดังรูป



รูปที่ 5.13 แสดงเส้นการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนคลิชและข้อมูลการดูดซับที่ได้จากการทดลองของระบบการดูดซับไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายไอเดียม ไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ 5.14 แสดงเส้นการดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนคลิชและข้อมูลการดูดซับที่ได้จากการทดลองของระบบการดูดซับไอออนในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตและสารละลายไอเดียม ไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

จากข้อมูลในตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.13 และ 5.14 สรุปได้ว่าระบบการดูดซับโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตเป็นระบบเดียวกัน โดยระบบการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนดลิช ค่าคงที่การดูดซับตามแบบจำลองของฟรอนดลิช (K_F)และค่าคงที่(n) สำหรับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่า 10.4 และ 0.29 และ 11.6 และ 0.28 ตามลำดับ

สำหรับการดูดซับฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดนั้น เมื่อนำผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตในตัวดูดซับแต่ละชนิดก่อนและหลังการดูดซับ มาคำนวณหาปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงและปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ จะได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการดูดซับด้วยดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต

ปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้(กรัม)	ปริมาณฟอสเฟต(กรัม)		ปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลง(กรัม)	ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ(มก./ก)
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ		
0.3	0.144	0.112	-0.032	-0.13356
0.5	0.293	0.371	0.078	0.159902
1	0.656	0.608	-0.048	-0.04388
2	1.192	1.205	0.013	0.006544
3	1.913	2.021	0.108	0.033872

ตารางที่ 5.3 แสดงปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการดูดซับด้วยดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์ในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต

ปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ใช้(กรัม)	ปริมาณฟอสเฟต(กรัม)		ปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลง(กรัม)	ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ(มก./ก)
	ก่อนการดูดซับ	หลังการดูดซับ		
0.3	0.0133	0.016	0.0027	0.122172
0.5	0.0291	0.026	-0.0031	-0.06392
1	0.05724	0.055	-0.00224	-0.02348
2	0.11574	0.121	0.00526	0.027268
3	0.2607	0.179	-0.0817	-0.18803

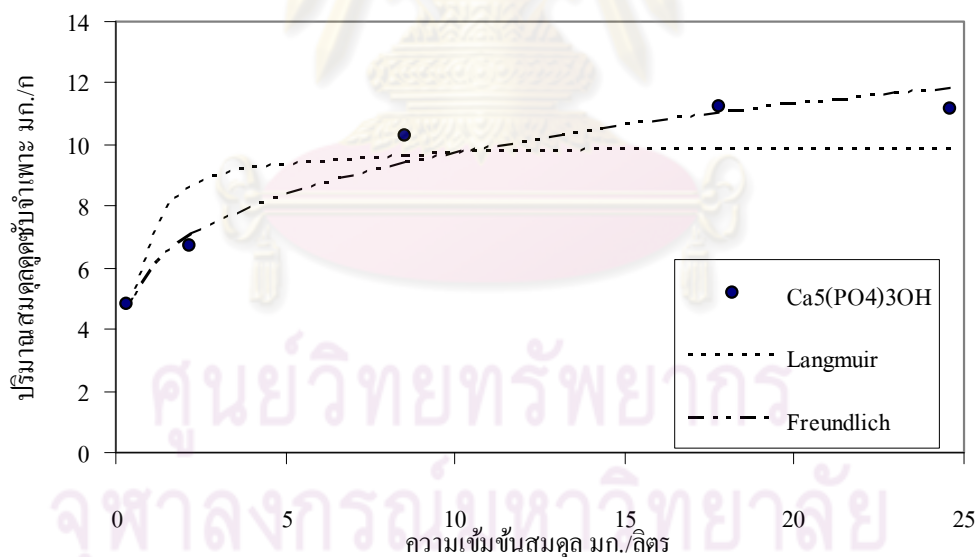
จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 พบว่าสำหรับตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการดูดซับมีค่าระหว่าง -0.048 กรัม ถึง 0.108 กรัม สำหรับตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงหลังการดูดซับมีค่าระหว่าง -0.0817 กรัม ถึง 0.00526

กรัม ซึ่งค่าที่ได้มีค่าน้อยและอยู่ในช่วงที่บวกลบ และเมื่อดูจากค่าปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต ปริมาณฟอสเฟตปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะมีค่าระหว่าง -0.13356 มก./ก. ถึง 0.159902 มก./ก. สำหรับตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะมีค่าระหว่าง -0.18803 มก./ก. ถึง 0.122172 มก./ก.

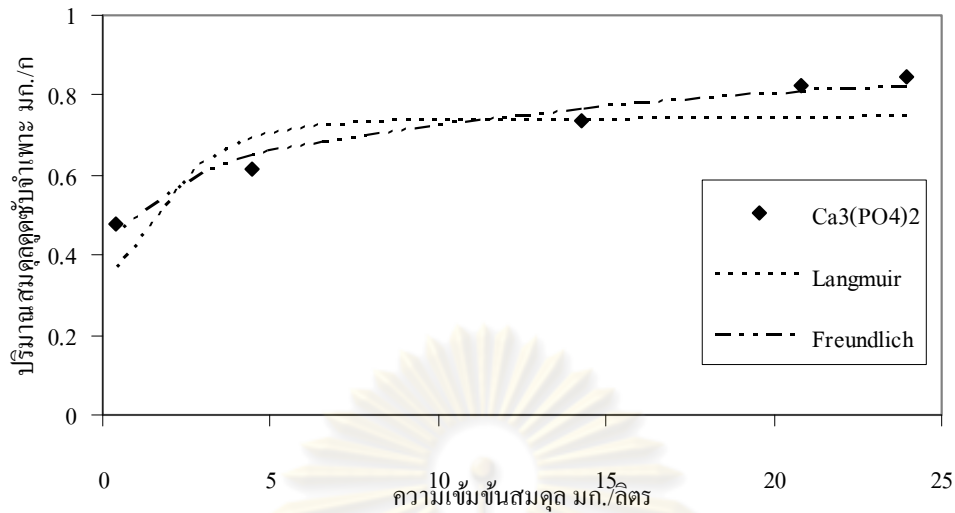
จากค่าปริมาณฟอสเฟตที่เปลี่ยนแปลงหลังการดูดซับกับค่าปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะที่คำนวณได้พบว่า ปริมาณทั้งสองค่ามีค่าน้อยและมีค่าทั้งบวกลบ จึงสรุปได้ว่าฟอสเฟตไอออนไม่ได้ถูกดูดซับโดยตัวดูดซับทั้งสองชนิดนี้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัด

5.3 ผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาคำนวณหาปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ และนำมาวาดกราฟร่วมกับค่าความเข้มข้นสมมูลในแต่ละระบบ จะได้ดังรูป



รูปที่ 5.15 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ 5.16 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

จากรูปที่ 5.15 และ 5.16 พบว่าเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมของทั้งสองระบบ มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับแบบแลงมัวร์หรือแบบฟรุนดลิช สมการแบบจำลองของทั้งสองแบบเป็นดังนี้

แบบจำลองสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์

$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C}$$

แบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรุนดลิช

$$q = K_F C^n$$

- q คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะ
- q_m คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะสูงสุด
- K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงมัวร์
- K_F คือ ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดลิช
- C คือ ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย
- n คือ ครรชนชี้กำลัง

เมื่อกำหนดค่าคงที่ตามแบบจำลองแต่ละชนิดจะได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.4 ค่าคงที่ของแบบจำลอง

ตัวคูณ	ค่าคงที่สมมูลของแสงมัวร์	ค่าคงที่สมมูลของฟรุนคลิช
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	$q_m = 10.08$ $K_L = 2.82$ $R^2 = 0.8277$	$n = 0.21$ $K_F = 6.05$ $R^2 = 0.9795$
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต	$q_m = 0.76$ $K_L = 2.31$ $R^2 = 0.7729$	$n = 0.14$ $K_F = 0.53$ $R^2 = 0.9359$

เมื่อกำหนดค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Residual Sum of Squares (RSS)) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบ ตามสมการ

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2$$

y_i คือค่าที่ได้จากการทดลอง

y_m คือค่าที่ได้จากแบบจำลอง

n คือจำนวนข้อมูล

จะได้ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(RSS)ของแต่ละแบบจำลอง ตามตาราง

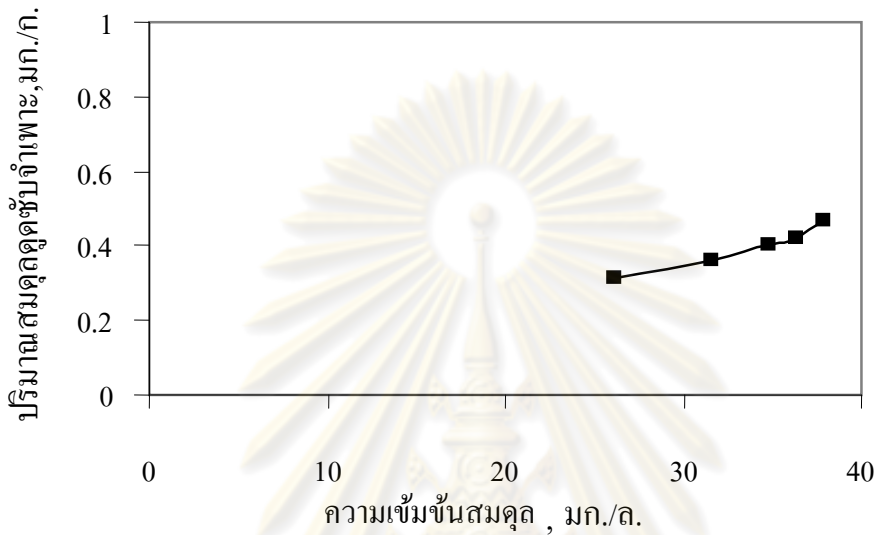
ตารางที่ 5.5 ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS))

ตัวคูณ	แบบจำลองสมมูลของแสงมัวร์	แบบจำลองสมมูลของฟรุนคลิช
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	RSS = 7.52	RSS = 1.3
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต	RSS = 0.39	RSS = 0.27

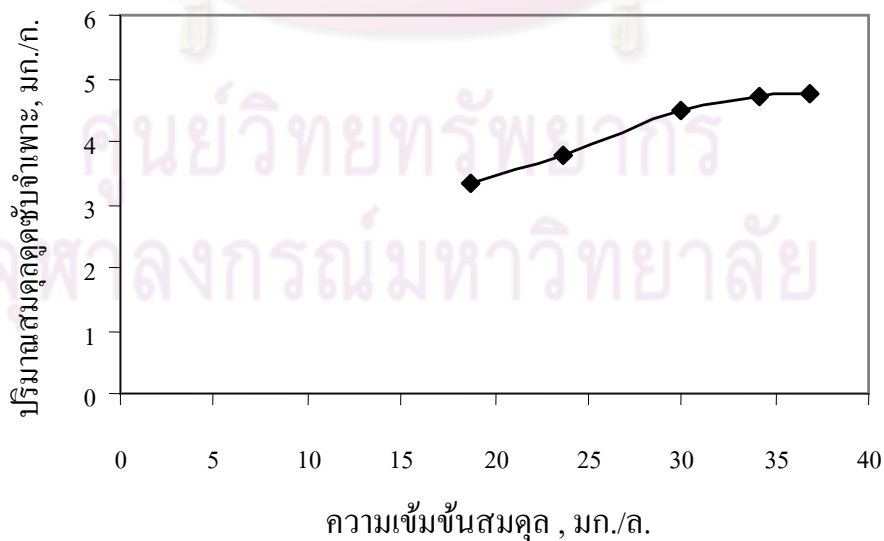
จากตารางที่ 5.4 และ 5.5 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยตัวคูณทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนคลิชมากกว่าแบบจำลองของแสงมัวร์ เนื่องจากเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(RSS) พบว่าแบบจำลองของฟรุนคลิชให้ค่า RSS น้อยกว่า รวมทั้งยังให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกับ 1 มากกว่าข้อมูลที่อธิบายด้วยแบบจำลองของแสงมัวร์ จากข้อมูลจึงสรุปได้ว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยตัวคูณไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟตเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนคลิช โดยค่าคงที่การดูดซับ(K_F) และค่าคงที่(n) มีค่า 0.53 และ 0.14 และ 6.05 และ 0.21 ตามลำดับ

5.4 ผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์

เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับแต่ละชนิดในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่ มาคำนวณหาปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ และนำมาวาดกราฟ ร่วมกับค่าความเข้มข้นสมมูลในแต่ละระบบ จะได้ดังรูป



รูปที่ 5.17 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ 5.18 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

รูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงเส้นสมมูลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซด์ ซึ่งมียูเรเนียมเข้มข้น 38.8 มิลลิกรัม/ลิตร โซเดียม 39.6 กรัม/ลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.15 และ 5.16 ซึ่งเป็นรูปแสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟต พบว่าเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิด มีค่าน้อยกว่าเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมด้วยตัวดูดซับชนิดเดียวกันอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าไอออนโซเดียมและยูเรเนียมในสารละลายซึ่งมีประจุเป็นบวกเหมือนกัน มีปฏิกิริยาต่อกันทำให้ตัวดูดซับทั้งสองชนิดในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตดูดซับยูเรเนียมได้น้อยลง ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไอออนน้อย โซเดียมไอออนจะมีผลต่อการดูดซับยูเรเนียมน้อย ในทางตรงข้าม ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโซเดียมมาก ไอออนของโซเดียมจะมีผลต่อการดูดซับยูเรเนียมมาก นั่นคือ ทำให้ดูดซับยูเรเนียมได้น้อยลง เมื่อคำนวณหาค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช จะได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.6 ค่าคงที่ของแบบจำลอง

ตัวดูดซับ	ค่าคงที่สมมูลของแลงมัวร์	ค่าคงที่สมมูลของเฮนรี	ค่าคงที่สมมูลของฟรุนดลิช
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	$q_m = 9.3$ $K_L = 0.03$ $R^2 = 0.9807$	$K_H = 0.14$ $R^2 = 0.4261$	$n = 1.8$ $K_F = 0.65$ $R^2 = 0.9846$
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต	$q_m = 21.5$ $K_L = 5 \times 10^{-4}$ $R^2 = 0.9518$	$K_H = 0.01$ $R^2 = 0.9352$	$n = 1.1$ $K_F = 0.11$ $R^2 = 0.9449$

จากตาราง 5.3 สรุปได้ว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตสำหรับตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช มีค่าคงที่การดูดซับเท่ากับ 0.65 และค่าคงที่ของแบบจำลองเท่ากับ 1.8

สำหรับตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตนั้นเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช ถึงแม้ว่าค่า R^2 จากการคำนวณตามแบบจำลองของแลงมัวร์จะมีค่ามากกว่า แต่ถ้าดูตามรูปเส้นสมมูลจะพบว่า เส้นสมมูลมีลักษณะเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิชมากกว่า จึงสรุปว่าการดูดซับนี้เป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิช มีค่าคงที่การดูดซับเท่ากับ 0.11 และค่าคงที่ของแบบจำลองเท่ากับ 1.1

และเพื่อเป็นการยืนยันผลของโซเดียมไอออนต่อการดูดซับยูเรเนียม จึงทำการทดลองเพิ่มเติม โดยเป็นการดูดซับยูเรเนียมด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่

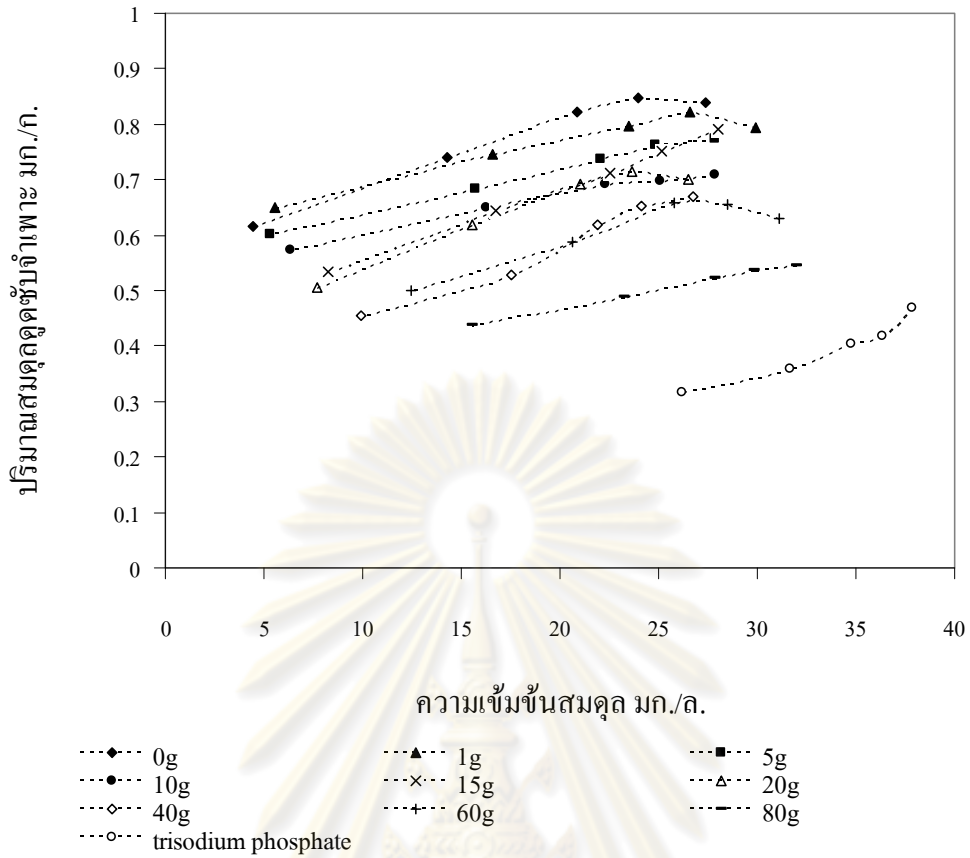
ความเข้มข้นต่างๆ สารละลายที่ใช้มีความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 30 มก./ล. pH 12 ไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ใช้เตรียมสารละลายอยู่ในรูปผลึก($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายสรุปได้ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ความเข้มข้นของไอออนต่างๆในสารละลายแต่ละชนิดที่ pH 12

ชื่อสารละลาย	ความเข้มข้นโซเดียมไอออนเริ่มต้น (ก./ล.)	ความเข้มข้นของยูเรเนียมเริ่มต้น (มก./ล.)
0g	0.93	29.06
1g	1.41	31.48
5g	2.29	29.42
10g	3.7	29.24
15g	5.4	29.63
20g	7.2	27.93
40g	14.0	28.08
60g	16.9	32.41
80g	22.95	33.04
Trisodium phosphate	39.6	38.8

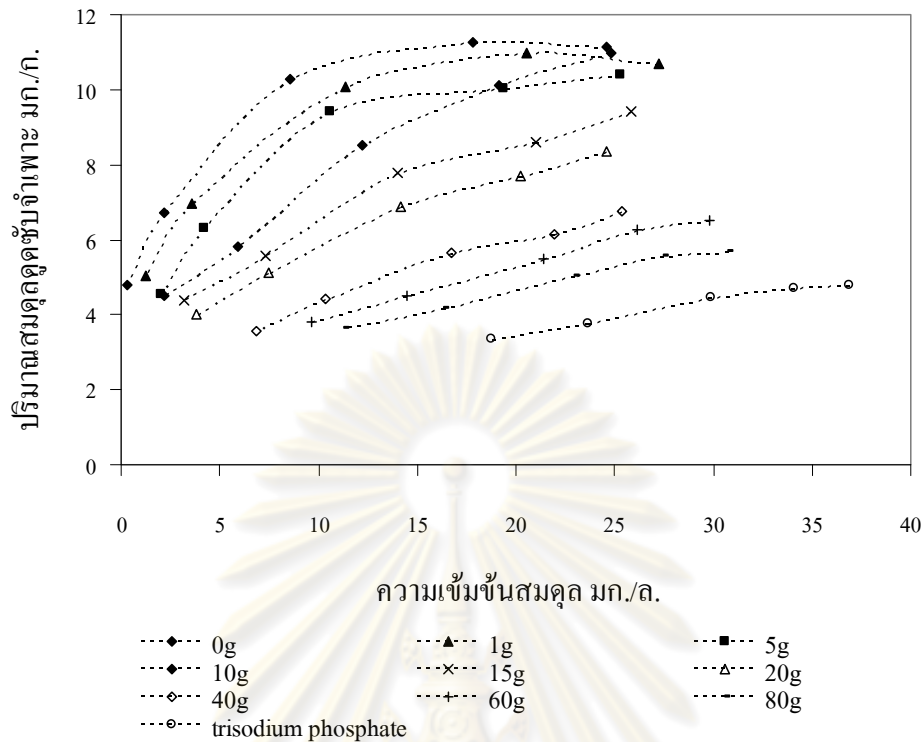
เมื่อนำผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมในสารละลายมาคำนวณค่าปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ และนำมาวาดเส้นการดูดซับสำหรับตัวดูดซับแต่ละชนิด จะได้ผลดังรูป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 แสดงเส้นการดูซ้ำยูเรเนียมในสารละลายความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.20 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

จากข้อมูลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตความเข้มข้นต่างๆ เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช จะได้ดังตาราง ตารางที่ 5.8 ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช ในระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

ชื่อสารละลาย	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรุนดลิช
0g	$R^2 = 0.8672$ $q_m = 10.08$ มก./ก. $K_L = 2.82$	$R^2 = 0.9760$ $K_F = 6.05$ $n = 0.21$
1g	$R^2 = 0.9678$ $q_m = 11.1$ มก./ก. $K_L = 0.66$	$R^2 = 0.9658$ $K_F = 4.95$ $n = 0.26$
5g	$R^2 = 0.9915$ $q_m = 11.75$ มก./ก. $K_L = 0.3$	$R^2 = 0.9544$ $K_F = 3.81$ $n = 0.33$

ชื่อสารละลาย	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรูนดลิช
10g	$R^2 = 0.9022$ $q_m = 10.85$ มก./ก. $K_L = 0.31$	$R^2 = 0.9822$ $K_F = 3.24$ $n = 0.38$
15g	$R^2 = 0.9409$ $q_m = 10.15$ มก./ก. $K_L = 0.22$	$R^2 = 0.9877$ $K_F = 2.78$ $n = 0.375$
20g	$R^2 = 0.9735$ $q_m = 9.7$ มก./ก. $K_L = 0.18$	$R^2 = 0.9972$ $K_F = 2.34$ $n = 0.398$
40g	$R^2 = 0.9964$ $q_m = 9.62$ มก./ก. $K_L = 0.085$	$R^2 = 0.9944$ $K_F = 1.43$ $n = 0.48$
60g	$R^2 = 0.9813$ $q_m = 9.7$ มก./ก. $K_L = 0.064$	$R^2 = 0.9938$ $K_F = 1.21$ $n = 0.496$
80g	$R^2 = 0.9788$ $q_m = 8.51$ มก./ก. $K_L = 0.064$	$R^2 = 0.9899$ $K_F = 1.15$ $n = 0.4705$
Trisodium Phosphate	$R^2 = 0.9807$ $q_m = 9.3$ มก./ก. $K_L = 0.03$	$R^2 = 0.9846$ $K_F = 0.655$ $n = 0.56$

ตารางที่ 5.9 ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรูนดลิช ในระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ชื่อสารละลาย	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรูนดลิช
0g	$R^2 = 0.9508$ $q_m = 0.9$ มก./ก. $K_L = 0.48$	$R^2 = 0.9814$ $K_F = 0.53$ $n = 0.14$
1g	$R^2 = 0.9506$ $q_m = 0.85$ มก./ก. $K_L = 0.57$	$R^2 = 0.9609$ $K_F = 0.51$ $n = 0.14$

ชื่อสารละลาย	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์	ค่าคงที่ตามแบบจำลองของฟรุนดลิช
5g	$R^2 = 0.9195$ $q_m = 0.8$ มก./ก. $K_L = 0.54$	$R^2 = 0.9736$ $K_F = 0.46$ $n = 0.15$
10g	$R^2 = 0.9760$ $q_m = 0.75$ มก./ก. $K_L = 0.5$	$R^2 = 0.9957$ $K_F = 0.43$ $n = 0.15$
15g	$R^2 = 0.9571$ $q_m = 0.92$ มก./ก. $K_L = 0.16$	$R^2 = 0.9851$ $K_F = 0.27$ $n = 0.31$
20g	$R^2 = 0.9830$ $q_m = 0.85$ มก./ก. $K_L = 0.2$	$R^2 = 0.9771$ $K_F = 0.29$ $n = 0.28$
40g	$R^2 = 0.9306$ $q_m = 0.9$ มก./ก. $K_L = 0.1$	$R^2 = 0.9580$ $K_F = 0.17$ $n = 0.4$
60g	$R^2 = 0.9374$ $q_m = 0.83$ มก./ก. $K_L = 0.01$	$R^2 = 0.8973$ $K_F = 0.24$ $n = 0.3$
80g	$R^2 = 0.9885$ $q_m = 0.71$ มก./ก. $K_L = 0.1$	$R^2 = 0.9969$ $K_F = 0.18$ $n = 0.31$
Trisodium Phosphate	$R^2 = 0.9518$ $q_m = 21.5$ มก./ก. $K_L = 5 \times 10^{-4}$	$R^2 = 0.9449$ $K_F = 0.11$ $n = 1.1$

จากตารางที่ 5.8 และ 5.9 เมื่อนำค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมาหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)) ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองตามแบบจำลองของแลงมัวร์และแบบจำลองของฟรุนดลิช สำหรับระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ผลสรุปจะได้ดังตาราง

ตารางที่ 5.10 ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)) สำหรับระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ชื่อสารละลาย	เทียบกับแบบจำลองของแลงมัวร์	เทียบกับแบบจำลองของฟรุนคลิช
0g	0.0026	0.0021
1g	0.0013	0.0009
5g	0.0020	0.0009
10g	0.0005	0.0001
15g	0.0026	0.0016
20g	0.001	0.0009
40g	0.0026	0.0056
60g	0.0078	0.0026
80g	0.0001	0.0015
Trisodium Phosphate	0.0095	0.0192

ตารางที่ 5.11 ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(Residual Sum of Squares (RSS)) สำหรับระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์

สารละลาย	เทียบกับแบบจำลองของแลงมัวร์	เทียบกับแบบจำลองของฟรุนคลิช
0g	7.5222	1.5979
1g	1.1500	1.6505
5g	0.3212	1.7968
10g	4.0383	0.3738
15g	1.2434	0.2056
20g	0.4122	0.0442
40g	0.0551	0.0496
60g	0.1155	0.0473
80g	0.0634	0.0361
Trisodium Phosphate	0.0444	0.0415

จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งเป็นรูปแสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่สารละลายที่ไม่มีไตรโซเดียมฟอสเฟตไปจนถึงสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ซึ่งมีความเข้มข้นของไตรโซเดียมฟอสเฟตสูงสุด พบว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือ ความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของไตรโซเดียมฟอสเฟตในสารละลายมีค่ามากขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมที่ลดลงนั้น เป็นผลมาจากไอออนของโซเดียมซึ่งแตกตัวออกมาจากโมเลกุลของไตรโซเดียมฟอสเฟตและโซดาไฟที่เติมเข้าไปเพื่อปรับค่า pH นั้น ได้เข้าไปรบกวนกระบวนการดูดซับยูเรเนียมในสารละลาย ทำให้ตัวดูดซับทั้งสองชนิดดูดซับยูเรเนียมได้น้อยลง

จากตารางที่ 5.8 5.9 5.10 และ 5.11 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าคงที่ตามแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดลิช และตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(RSS) ของการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น พบว่าระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดนั้น แนวโน้มส่วนใหญ่เป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิชมากกว่าแบบจำลองของแลงมัวร์ เนื่องจากให้ค่าความเบี่ยงเบนตามสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง(R^2)ใกล้เคียงกับ 1 มากกว่าและให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง(RSS)น้อยกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าคงที่การดูดซับตามแบบจำลองของฟรุนดลิช(K_F) พบว่าค่าคงที่ดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไอออนโซเดียมในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อไอออนของโซเดียมในสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างๆ ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์จะมีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการหาเส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. การดูดซับยูเรเนียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และ ไฮดรอกซีอะพาไทต์($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากระบบการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลทำให้ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะมีค่าคงที่

2. ระบบการดูดซับโซเดียมไอออนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นโซเดียมไอออนเริ่มต้น 0.84 ก./ล. pH 12 และสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่มีความเข้มข้นโซเดียมไอออน 47.2 ก./ล. ความเข้มข้นฟอสเฟตไอออน 64 ก./ล. pH 12 เป็นระบบเดียวกัน โดยระบบการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนดลิช ค่าคงที่การดูดซับตามแบบจำลองของฟรอนดลิช(K_F)และค่าคงที่(n) สำหรับระบบการดูดซับที่ใช้ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นตัวดูดซับมีค่า 10.4 และ 0.29 และ 11.6 และ 0.28 ตามลำดับ

3. ในระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมที่มีความเข้มข้นยูเรเนียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 12 ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟตพบว่า การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรอนดลิช มีค่าคงที่การดูดซับ(K_F)และค่าคงที่(n) เท่ากับ 6.05 และ 0.21 และ 0.53 และ 0.14 ตามลำดับ และตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียมได้ดีกว่าตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

4. ในระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตที่ได้จากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ซึ่งมียูเรเนียมเข้มข้น 38.8 มิลลิกรัม/ลิตร โซเดียม 39.6 กรัม/ลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 พบว่าไอออนโซเดียมมีผลต่อการดูดซับยูเรเนียม ทำให้ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไอออนน้อย ตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะดูดซับยูเรเนียมได้มาก ในทางตรงข้าม ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนโซเดียมมาก ตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะดูดซับยูเรเนียมได้น้อย โดยระบบการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตด้วยไฮดรอกซีอะพาไทต์และไตรแคลเซียมฟอสเฟตเป็นไปตามแบบจำลองของฟรอนดลิช ค่าคงที่การดูดซับ(K_F) และค่าคงที่(n) สำหรับตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่า 0.11 และ 1.1 และ 0.66 และ 0.56 ตามลำดับ และตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตได้ดีกว่าตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ ใช้เวลาในการดูซ้ำแต่ละครั้งที่ 1 ชั่วโมง ซึ่งระบบยังไม่เข้าสู่สมดุลอย่างสมบูรณ์ หากต้องการข้อมูลที่แม่นยำถูกต้อง จะต้องใช้เวลาในทดลองแต่ละครั้งมากกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งระบบจะเข้าใกล้สมดุลมากกว่านี้
2. ระบบที่ศึกษามีปริมาณโซเดียมเข้มข้นมาก ทำให้มีปัญหาในการวิเคราะห์ ทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Aklil,A., Mouflih, M. and Sebti,S. Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent. Journal of Hazardous Meterials A112(2004) : 183-190.
- Clegg,J.W., and Foley,D.D. Uranium Ore Processing.p.p.3-6. Reading, Massachusetts: Addison-wesley Publishing,1958.
- Jeanjean,J., Rouchaud,J.C, Tran,L. and Fedoroff,M. Sorption of uranium and other heavy metals on hydroxyapatite. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry 201(1995): 529-539
- Krestou, A., Xenidis, A., and Panias,D. Mechanism of aqueous uranium(VI) uptake by hydroxyapatite. Minerals Engineering 17(2003): 373-381
- Raicevic,S., Wright,J.V., Veljkovic,V.,Conca J.L. Theoretical stability assessment of uranyl phosphates and apatites : Selection of amendments for in situ remediation of uranium. Science of the Total Environment 355(2006): 13 - 24
- Simon,F.G., Biermann,V., Segebade,C. and Martina Hedrich. Behavior of uranium in hydroxyapatite – bearing permeable reactive barriers: investigation using ^{237}U as a radioindicator. Science of the total environment 326(2004): 249-256
- Seader,J.D. and Henley,E.J. Separation Process Principles.p.p.548-565.2 nd edition. Asia:John Wiley & Sons, 2006.
- Smiciklas,I., Onjia,A., and Raicevic, S. Experimental design approach in the synthesis of hydroxyapatite by neutralization method. Separation and Purification Technology 44(2004): 97-102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก : ตารางข้อมูลและผลวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุต่างๆในสารละลาย

ตาราง ก.1 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับที่
เวลาต่างๆด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	เวลาการดูดซับ(นาที)				
	15	30	60	90	120
ความเข้มข้นยูเรเนียม (มก./ล.)	3.82	2.42	1.31	1.04	0.97
ร้อยละการดูดซับยูเรเนียม	84.97	90.50	94.83	95.93	96.17

ตาราง ก.2 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับที่
เวลาต่างๆด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	เวลาการดูดซับ(นาที)				
	15	30	60	90	120
ความเข้มข้นยูเรเนียม (มก./ล.)	7.54	6.51	4.468	4.186	3.948
ร้อยละการดูดซับยูเรเนียม	70.35	74.40	82.43	83.54	84.48

ตาราง ก.3 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 12 หลัง
การดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นโซเดียม(มก./ล.)	0.78	0.74	0.65	0.50	0.4
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	9.91	9.76	9.5	8.5	7.4

ตาราง ก.4 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้น โซเดียม(มก./ล.)	0.8	0.73	0.64	0.47	0.36
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	11.45	11.1	10.25	9.38	8.08

ตาราง ก.5 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	24.6	17.8	8.53	2.181	0.31
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	11.15	11.26	10.27	6.72	4.79

ตาราง ก.6 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	23.97	20.84	14.28	4.47	0.41
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.85	0.82	0.74	0.61	0.48

ตาราง ก.7 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้น โซเดียม(มก./ล.)	46.74	46.73	46.7	46.65	46.6
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	24.4	25.76	23.88	25.44	26.29

ตาราง ก.8 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นโซเดียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นโซเดียม(มก./ล.)	46.61	46.52	46.29	45.84	45.42
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	22.96	22.78	22.89	22.69	22.13

ตาราง ก.9 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นฟอสเฟต(ก./ล.)	63.94	64.06	64.04	63.89	65.63
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.12	-0.06	-0.02	0.03	-0.19

ตาราง ก.10 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นฟอสเฟต(ก./ล.)	64.64	62.43	64.97	63.74	61.84
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	-0.13	0.16	-0.04	0.01	0.03

ตาราง ก.11 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	36.92	34.12	29.89	23.69	18.79
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	4.775	4.71	4.47	3.79	3.34

ตาราง ก.12 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟตจากกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	37.89	36.32	34.78	31.65	26.22
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.47	0.42	0.41	0.36	0.32

ตาราง ก.13 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	27.21	20.52	11.34	3.56	1.22
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	10.68	10.96	10.07	6.98	5.04

ตาราง ก.14 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	25.26	19.39	10.58	4.23	2.04
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	10.4	10.03	9.42	6.3	4.56

ตาราง ก.15 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	24.85	19.14	12.23	5.94	2.15
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	10.97	10.1	8.51	5.83	4.52

ตาราง ก.16 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 15 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	25.86	21.02	14.04	7.35	3.22
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	9.43	8.61	7.79	5.57	4.40

ตาราง ก.17 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 20 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	24.59	20.22	14.15	7.47	3.82
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	8.35	7.71	6.89	5.12	4.02

ตาราง ก.18 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 40 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	25.38	21.95	16.75	10.36	6.81
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	6.75	6.13	5.67	4.43	3.55

ตาราง ก.19 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	29.81	26.13	21.43	14.47	9.67
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	6.5	6.28	5.49	4.49	3.79

ตาราง ก.20 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 80 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮดรอกไซด์อะพาไทต์

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	30.77	27.46	22.95	16.36	11.26
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	5.68	5.58	5.05	4.17	3.63

ตาราง ก.21 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	29.89	26.55	23.51	16.58	5.54
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.79	0.82	0.79	0.74	0.65

ตาราง ก.22 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	27.87	24.85	22.05	15.75	5.34
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.78	0.76	0.74	0.68	0.6

ตาราง ก.23 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	27.82	25.05	22.32	16.24	6.34
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.71	0.69	0.69	0.65	0.57

ตาราง ก.24 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 15 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักรับดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	28.05	25.12	22.51	16.76	8.23
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.79	0.75	0.71	0.64	0.54

ตาราง ก.25 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 20 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักรับดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	26.53	23.65	21.02	15.54	7.66
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.7	0.71	0.69	0.62	0.51

ตาราง ก.26 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 40 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักรับดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	26.74	24.16	21.88	17.52	9.94
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.67	0.65	0.62	0.53	0.45

ตาราง ก.27 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักรับดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	31.15	28.47	25.82	20.65	12.46
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.63	0.66	0.66	0.59	0.5

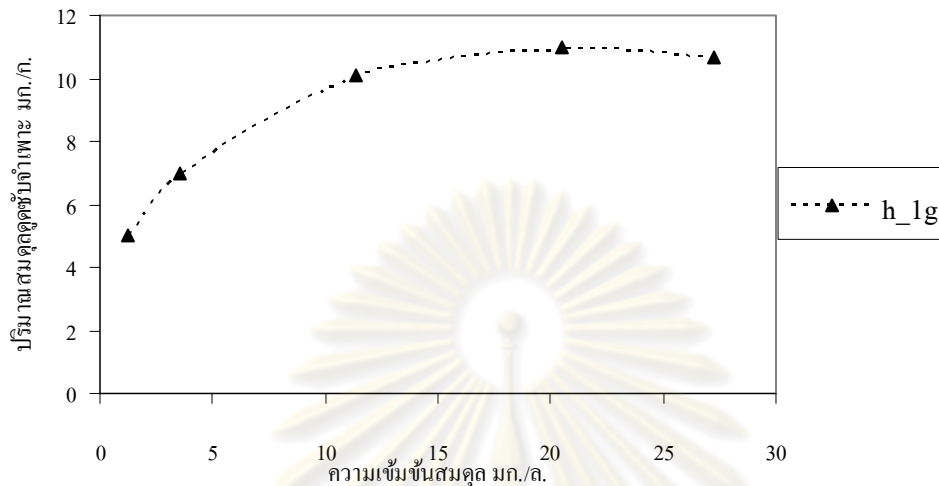
ตาราง ก.28 แสดงผลวิเคราะห์ความเข้มข้นยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม ที่มีความเข้มข้นไตร
โซเดียมฟอสเฟต 80 กรัม/ล. pH 12 หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

	น้ำหนักตัวดูดซับ(กรัม)				
	0.3	0.5	1	2	3
ความเข้มข้นยูเรเนียม(มก./ล.)	31.95	29.82	27.82	23.24	15.56
ปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะ (มก./ก.)	0.55	0.54	0.52	0.49	0.44

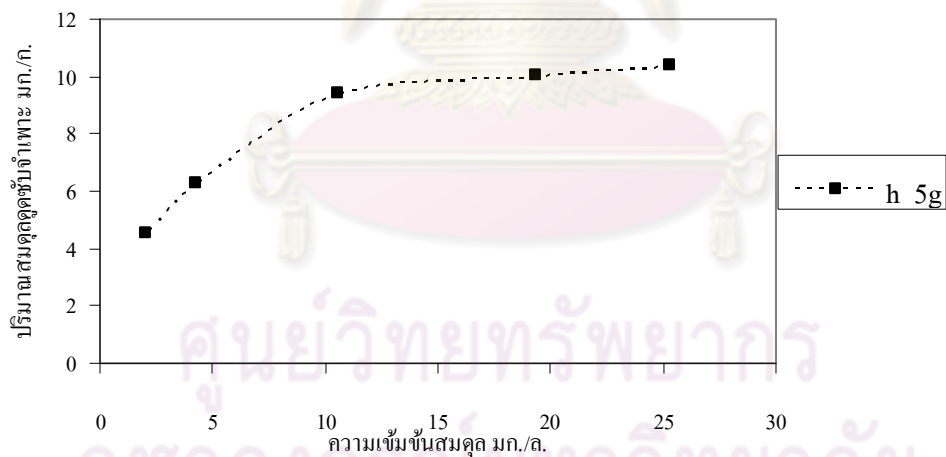


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

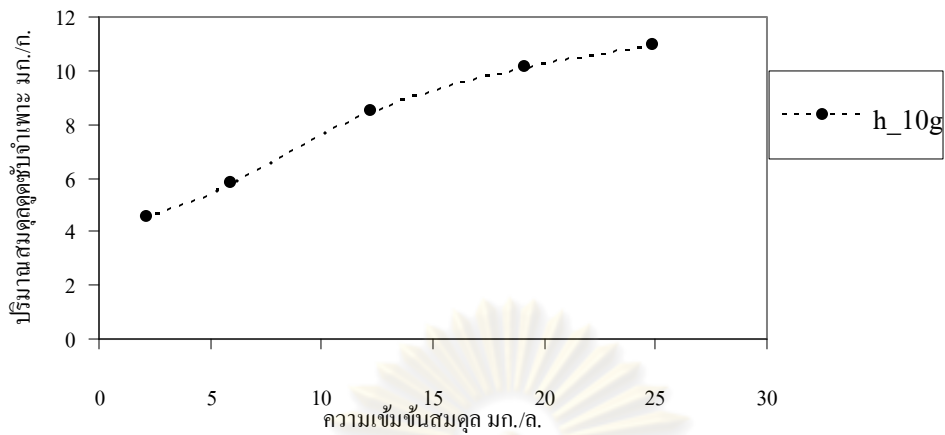
ภาคผนวก ข : เส้นแสดงการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟตต่างๆ



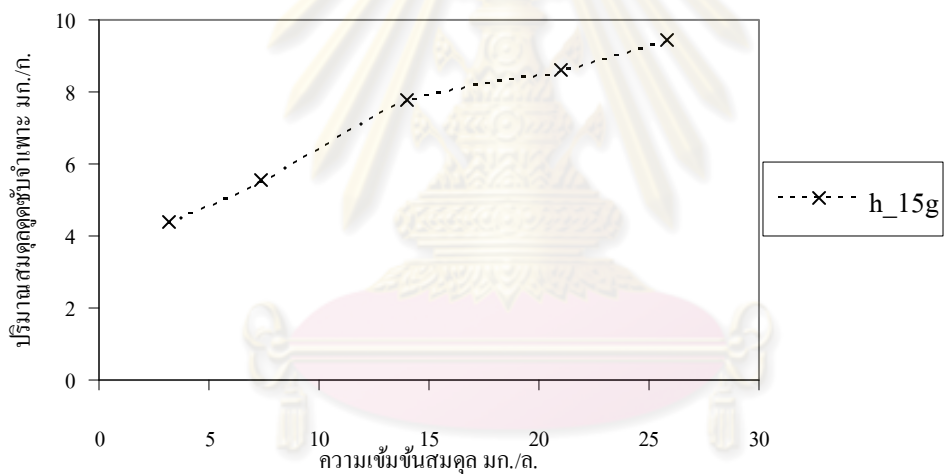
รูปที่ ข 1 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์



รูปที่ ข 2 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

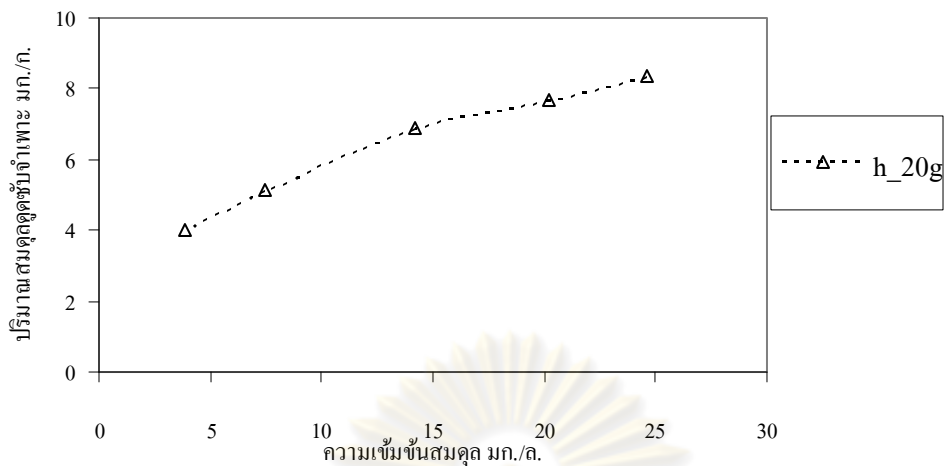


รูปที่ ข 3 แสดงเส้นการดูดซับยูเรียในสารละลายยูเรีย pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โซเดียม ฟอสเฟต 10 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

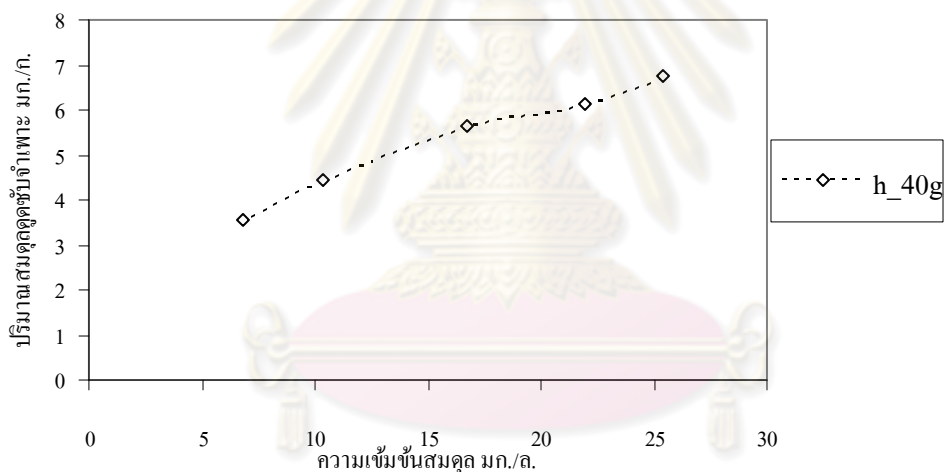


รูปที่ ข 4 แสดงเส้นการดูดซับยูเรียในสารละลายยูเรีย pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โซเดียม ฟอสเฟต 15 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

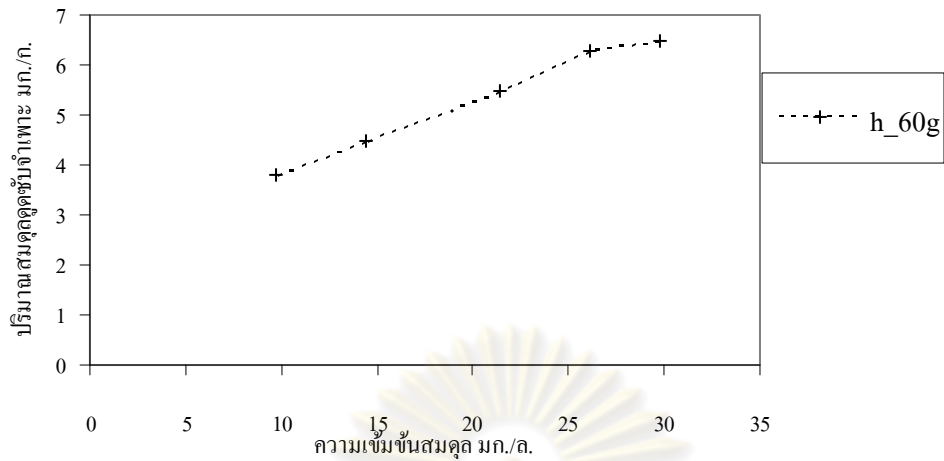


รูปที่ ข 5 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โหเดียม ฟอสเฟต 20 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

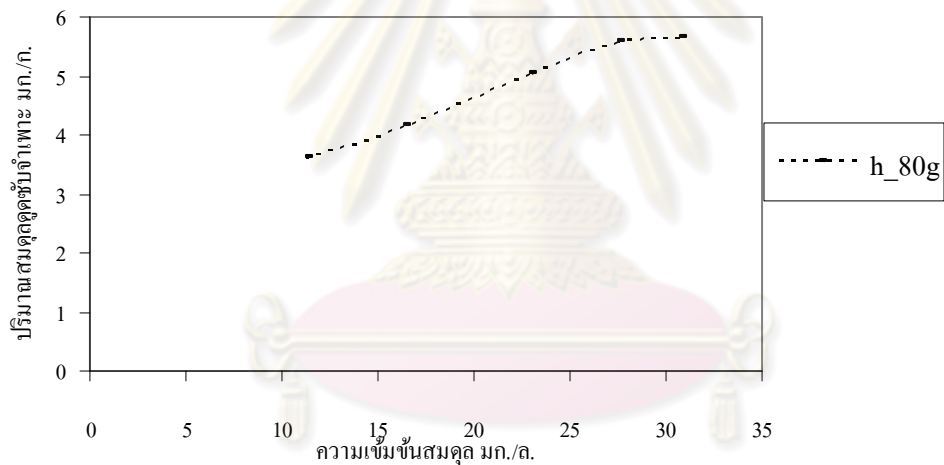


รูปที่ ข 6 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โหเดียม ฟอสเฟต 40 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

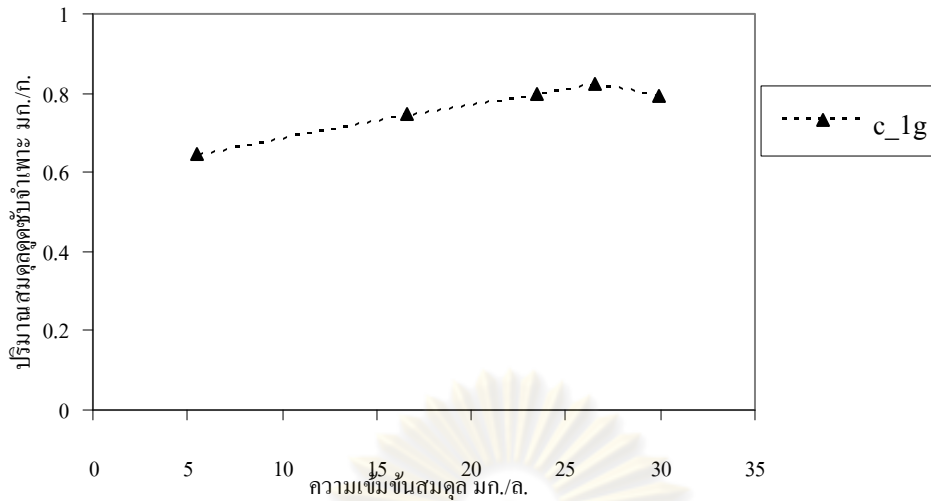


รูปที่ ๗ แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โซเดียม ฟอสเฟต 60 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

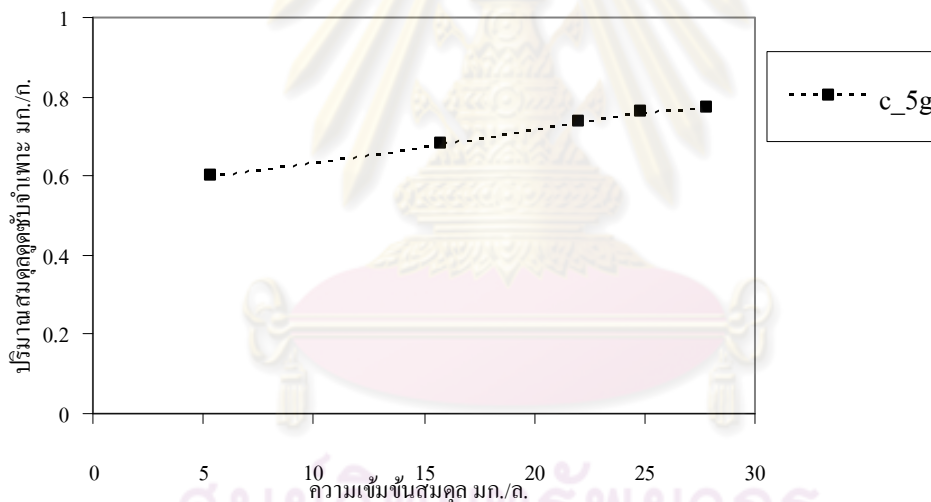


รูปที่ ๘ แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตร โซเดียม ฟอสเฟต 80 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์

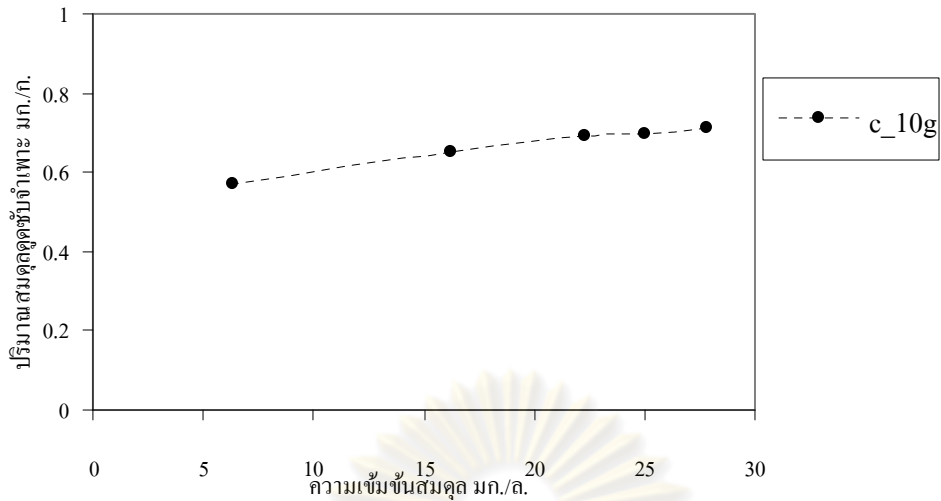
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



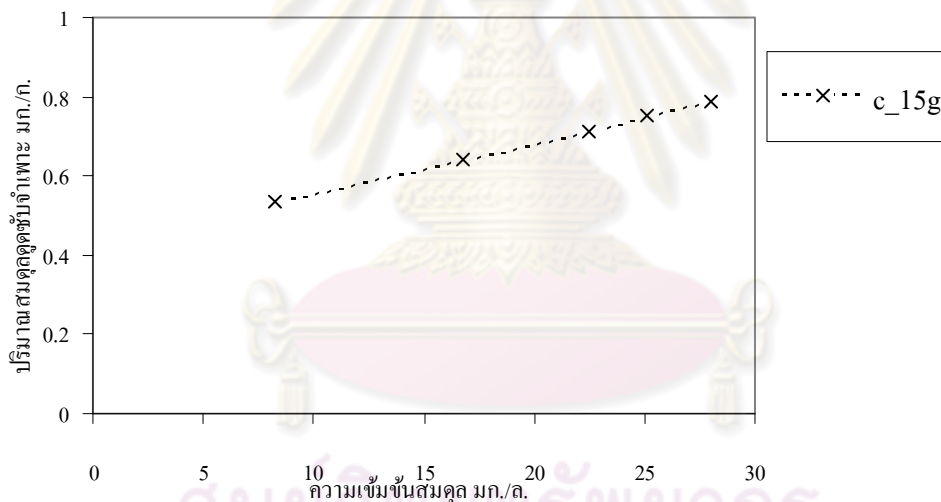
รูปที่ 9 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตรโซเดียมฟอสเฟต 1 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต



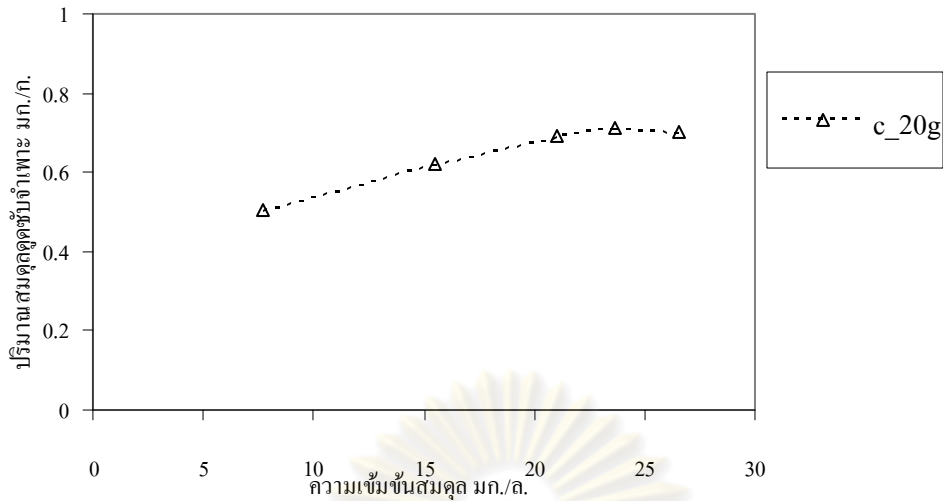
รูปที่ 10 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้น ไตรโซเดียมฟอสเฟต 5 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต



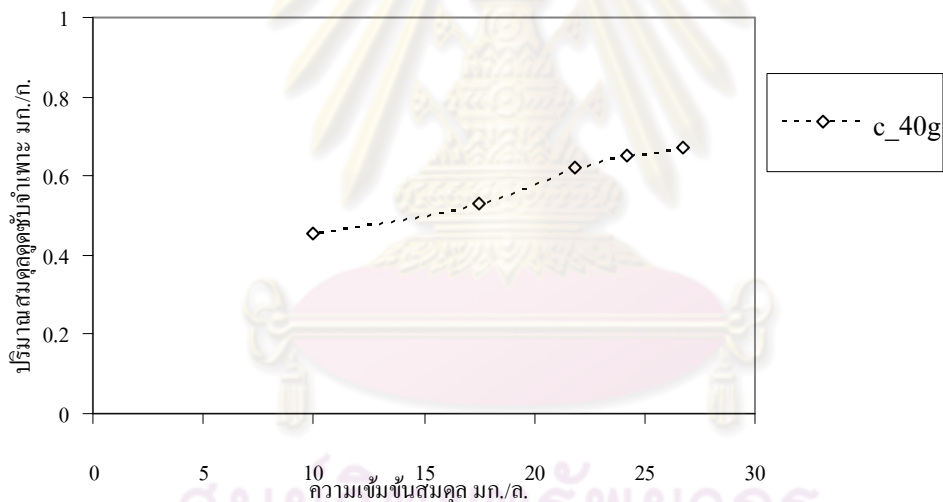
รูปที่ ข 11 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต



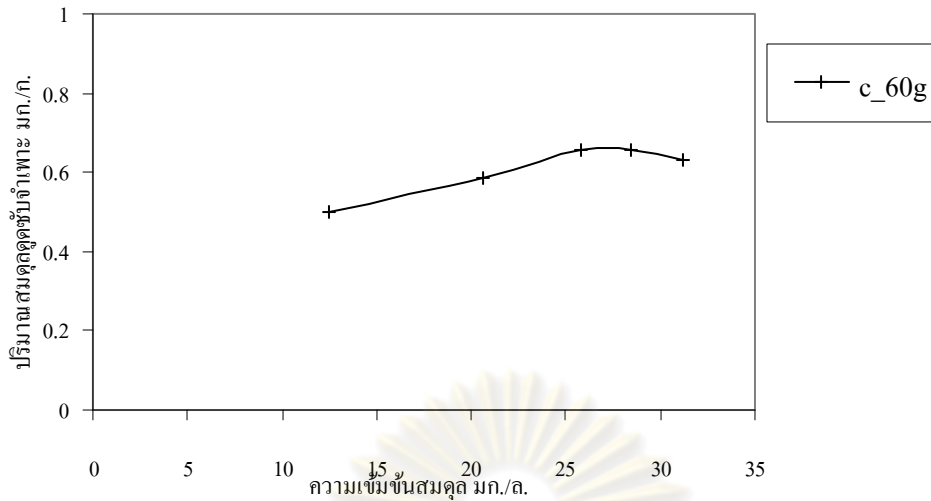
รูปที่ ข 12 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 15 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต



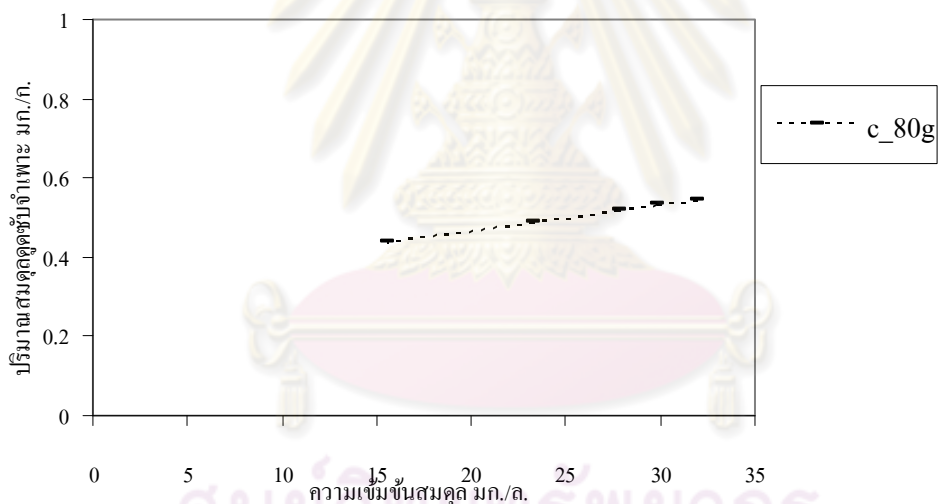
รูปที่ ข 13 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 20 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ ข 14 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 40 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ ข 15 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 60 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต



รูปที่ ข 16 แสดงเส้นการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายยูเรเนียม pH 12 ที่ความเข้มข้นไตรโซเดียมฟอสเฟต 80 กรัม/ล. ด้วยตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ภาคผนวก ค การเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับชาติ

การประชุมวิชาการและวิจัย ประจำปี 2552 (RURC2009)

3 - 4 กันยายน 2552

SC-O-07

สมดุลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างด้วยไตรแคลเซียมฟอสเฟต
และไฮดรอกซีอะพาไทต์

Adsorption Equilibrium of Uranium in Alkaline Solution on
Tricalcium Phosphate and Hydroxyapatite

โกมล แพงทรัพย์¹

บทคัดย่อ

การวิจัยเป็นการศึกษาสมดุลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่าง โดยตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) และ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) สารละลายมีความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 12 มีความเข้มข้นยูเรเนียม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกเขย่าในแต่ละตัวดูดซับที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ จากผลที่ได้พบว่าการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดเข้าสู่สมดุลในเวลา 2 ชั่วโมง และ สมดุลการดูดซับเป็นแบบฟรอนด์ลิช โดยค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิช (K_F) และดรรชนีชี้กำลัง (n) สำหรับไฮดรอกซีอะพาไทต์ และไตรแคลเซียมฟอสเฟต มีค่า 6.05, 0.21, 0.53 และ 0.14 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ยูเรเนียม ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต การดูดซับ

ABSTRACT

The objective of this research was the study of the adsorption equilibrium of uranium in alkaline solution, on hydroxyapatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) and tricalcium phosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). The solutions of 30 mg/L Uranium, pH 12, were shaken with each adsorbent at room temperature and atmospheric pressure. The obtained results show that the equilibriums are achieved after 2 hours and the adsorption isotherms are Freundlich isotherm. Freundlich equilibrium constant (K_F) and power index (n) of hydroxyapatite and tricalcium phosphate are 6.05, 0.21, 0.53 and 0.14, respectively.

Keywords: uranium, hydroxyapatite, tricalcium phosphate, adsorption

บทนำ

ยูเรเนียมเป็นสารกัมมันตภาพรังสีชนิดหนึ่งซึ่งพบอยู่เสมอในน้ำทิ้งของหน่วยงานที่มีการดำเนินกิจกรรมทางด้านรังสี การแยกยูเรเนียมออกจากน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งไปจึงมีความจำเป็นอย่างมาก กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งในการแยกยูเรเนียมออกจากสารละลาย การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสมกับสภาพของสารละลายจะสามารถแยกยูเรเนียมออกจากสารละลายได้ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Ailli et al., 2004) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) (Krestou et al., 2003) เป็นตัวดูดซับที่มีการวิจัยแล้วพบว่าสามารถแยกยูเรเนียมออก

รองศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาวัทธรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสารละลายที่มีสภาพเป็นกลางได้ดี ในบางกรณีน้ำทิ้งไม่ได้มีสภาพเป็นกลาง แต่มีสภาพเป็นด่าง หากต้องปรับสภาพสารละลายให้เป็นกลางก่อน จะสิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องเติมลงไป ประกอบกับยังไม่มิงานวิจัยการดูดซับยูเรเนียมในสภาวะที่สารละลายมีความเป็นด่าง ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะศึกษาการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายที่เป็นด่าง

วัตถุประสงค์

การวิจัยนี้เป็นจะศึกษาสมมูลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายที่มีสภาพความเป็นด่าง (pH = 12) ด้วยตัวดูดซับ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อศึกษาสมมูลการดูดซับและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับทั้งสองชนิดนี้

วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์

1. เครื่องเขย่าสารเคมี ของบริษัท Gerhardt
2. เครื่องวิเคราะห์ ICP Spectrometer รุ่น Spectroflame บริษัท Spectro

สารเคมี

1. ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
2. ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นเองด้วยวิธี Neutralization Method (Smiciklas et.al,2004)
3. สารละลายต่าง มียูเรเนียมเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เท่ากับ 12 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)

วิธีการทดลอง

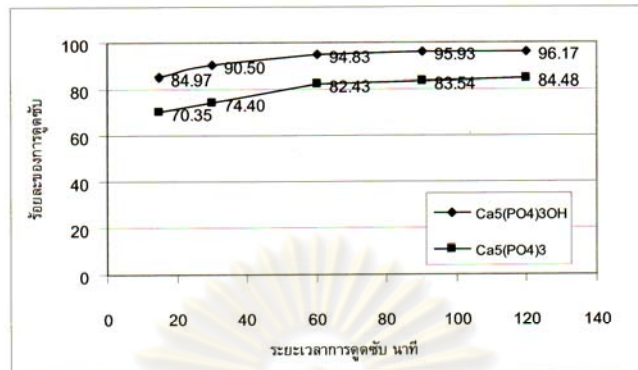
1. การหาเวลาเข้าสู่สมดุล

- 1.1 นำสารละลายต่างมา 50 มิลลิตร ผสมกับไตรแคลเซียมฟอสเฟต 2 กรัม
- 1.2 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เก็บตัวอย่างส่วนใส นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมด้วยเทคนิค ICP
- 1.3 ทำซ้ำข้อ 1.1 และ 1.2 โดยเปลี่ยนเวลาในการเขย่าเป็น 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ
- 1.4 ทำซ้ำข้อ 1.1-1.3 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับมาใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 0.2 กรัม

2. การหาสมมูลการดูดซับ

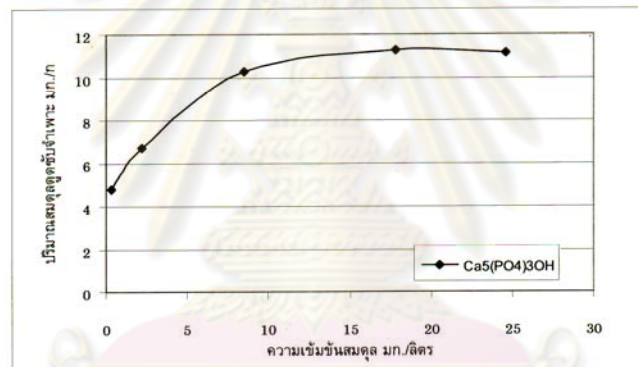
- 2.1 นำสารละลายต่างมา 50 มิลลิตร ผสมกับไตรแคลเซียมฟอสเฟต 0.3 กรัม
- 2.2 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำเข้าเครื่องเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เก็บตัวอย่างส่วนใส นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมด้วยเทคนิค ICP
- 2.3 ทำซ้ำข้อ 2.1 และ 2.2 โดยเปลี่ยนปริมาณไตรแคลเซียมฟอสเฟตเป็น 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ
- 2.4 ทำซ้ำข้อ 2.1-2.3 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับเป็น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปริมาณที่ใช้คือ 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.3 กรัม ตามลำดับ

ผลการวิจัย

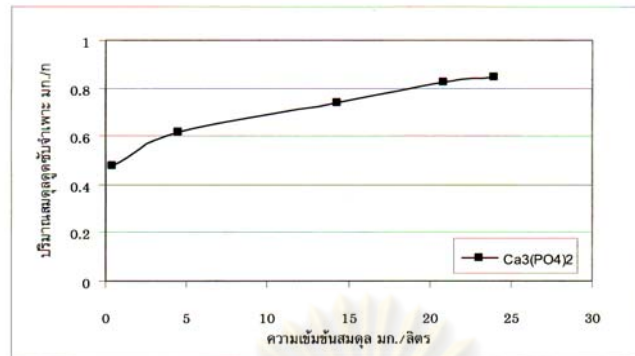


ภาพที่ 1 ร้อยละของการชุบกับเวลาในการชุบ

จะเห็นว่า การชุบยูเรเนียมในสารละลายต่างด้วยตัวชุบไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วง 1 ชั่วโมงแรกและจะเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง เนื่องจากตัวชุบอ้อมด้วยยูเรเนียมทำให้เกิดการชุบขึ้นอีก (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 2 สมดุลการชุบของตัวชุบไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) กับยูเรเนียมในสารละลายต่าง



ภาพที่ 3 สมดุลการดูดซับของตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) กับยูเรเนียมในสารละลายต่าง

จากภาพที่ 2 และ 3 เห็นได้ว่าสมดุลการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างมีลักษณะเป็นเส้นโค้งว่า ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับแบบแลงมัวร์หรือแบบฟรุนดลิช สมการแบบจำลองของทั้งสองแบบเป็นดังนี้

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงมัวร์

$$q = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C}$$

แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช

$$q = K_F C^n$$

- q คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะ
 q_m คือ ปริมาณการดูดซับจำเพาะสูงสุด
 K_L คือ ค่าคงที่สมดุลของแลงมัวร์
 K_F คือ ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดลิช
 C คือ ความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย
 n คือ ดรรชนีชี้กำลัง

ค่าคงที่ q_m และ K_L สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกนและความชันของเส้นความสัมพันธ์ของส่วนกลับของปริมาณการดูดซับจำเพาะ ($1/q$) กับส่วนกลับของความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ ($1/C$) ตามสมการ

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K_L C} + \frac{1}{q_m}$$

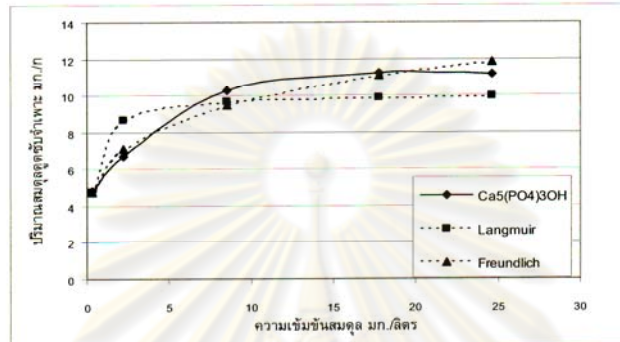
ค่าคงที่ n และ K_F หาได้จากการคำนวณจุดตัดแกนและความชันของเส้นความสัมพันธ์ของค่าลอการิทึมของความเข้มข้นสมดุลของตัวถูกดูดซับ ($\ln C$) และปริมาณการดูดซับจำเพาะ ($\ln q$) ตามสมการ

$$\ln q = n \ln C + \ln K_F$$

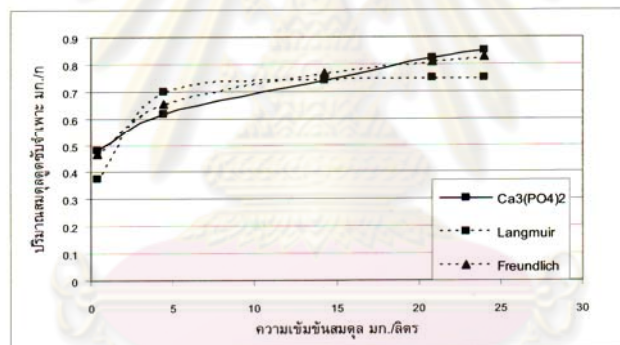
ผลการคำนวณค่าคงที่ต่างๆ สรุปได้ตามตาราง

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองและค่าไคสแควร์

ตัวดูดซับ	ค่าคงที่สมดุลของแลงมัวร์	ค่าคงที่สมดุลของฟรุนดลิช
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	$q_m = 10.08$ $K_L = 2.82$	$n = 0.21$ $K_F = 6.05$
ไตรแคลเซียมฟอสเฟต	$q_m = 0.76$ $K_L = 2.31$	$n = 0.14$ $K_F = 0.53$



ภาพที่ 4 แสดงสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์ ฟรุนดลิช และสมมูลที่ได้จากการทดลองของตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์



ภาพที่ 5 แสดงสมมูลการดูดซับของแลงมัวร์ ฟรุนดลิช และสมมูลที่ได้จากการทดลองของตัวดูดซับไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4 และ 5 แสดงสมมูลการดูดซับยูเรเนียมที่ได้จากการทดลอง สมมูลตามแบบจำลองของแลงมัวร์ และ สมมูลตามแบบจำลองของฟรุนดลิชของตัวดูดซับแต่ละชนิด เมื่อหาค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Residual Sum of Squares (RSS)) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบ ตามสมการ

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2$$

y_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

y_m คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

n คือ ลำดับของข้อมูล

จะได้ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสองของแต่ละแบบจำลอง ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Residual Sum of Squares (RSS))

ตัวดูดซับ	แบบจำลองสมมูลของแลงมัวร์	แบบจำลองสมมูลของฟรุนดลิช
ไฮดรอกซีอะพาไทต์	RSS = 7.52	RSS = 1.3
ไทรแคลเซียมฟอสเฟต	RSS = 0.39	RSS = 0.27

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองของฟรุนดลิชมากกว่าแบบจำลองของแลงมัวร์ เนื่องจากให้ค่า RSS น้อยกว่า

จากภาพที่ 4 และ 5 จุดบนเส้นสมมูลการดูดซับของตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่ามากกว่าของตัวดูดซับไทรแคลเซียมฟอสเฟต แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับของตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่ามากกว่าปริมาณการดูดซับยูเรเนียมเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับไทรแคลเซียมฟอสเฟต สรุปได้ว่าตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์มีประสิทธิภาพดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างมากกว่าตัวดูดซับไทรแคลเซียมฟอสเฟต เนื่องจากใช้เวลาเข้าสู่สมดุลเท่ากัน นั่นคือ 2 ชั่วโมง แต่ตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่างซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 12 และมีความเข้มข้นของยูเรเนียมเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยตัวดูดซับไทรแคลเซียมฟอสเฟตและไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเข้าสู่สมดุลใน 2 ชั่วโมง สมมูลการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองสมมูลการดูดซับของฟรุนดลิช โดยตัวดูดซับไฮดรอกซีอะพาไทต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าตัวดูดซับไทรแคลเซียมฟอสเฟต

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาระบบที่มีสารประกอบชนิดอื่นร่วมในสารละลายด้วย เพื่อศึกษาผลของสารประกอบต่าง ๆ ต่อการดูดซับยูเรเนียมในสารละลายต่าง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อสารเคมี เครื่องมือ วิเคราะห์ และคำแนะนำที่มีประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

- Aklii, A., Moufih, M. and Sebtii, S. 2004. Removal of heavy metal ions from water by using calcined phosphate as a new adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*. A112:183-190.
- Krestou, A., Xenidis, A., and Panias, D. 2003. Mechanism of aqueous uranium(VI) uptake by hydroxyapatite. *Minerals Engineering*. 17: 373-381.
- Smiciklas, I., Onjia, A., and Raicevic, S. 2004. Experimental design approach in the synthesis of hydroxyapatite by neutralization method. *Separation and Purification Technology*. 44: 97-102



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย โกมล แพงทรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดสุโขทัย สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และสำเร็จการศึกษาระดับ ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย