

การดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

นายภาสกร ธรรมสังข์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ADSORPTION OF LANTHANIDE NITRATES WITH COCONUT SHELL ACTIVATED  
CARBON ADSORBING TRIBUTYLPHOSPHATE

Mr. Passworn Thamsatjakul

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์จาก  
กะลามะพร้าวที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

โดย

นายภาสกร ธรรมสังกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัตรศิริเวช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

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

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพร รับคำอินทร์)

ภาสวร ธรรมสังกุล : การดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว  
ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต. (ADSORPTION OF LANTHANIDE NITRATES WITH  
COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON ADSORBING TRIBUTY-  
PHOSPHATE)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 115 หน้า

ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวถูกดูดซับด้วยไตรบิวทิลฟอสเฟตเป็นเวลา 60  
นาทีจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน เป็นเวลา 60 นาที โดยนำตัวดูดซับที่เตรียมไว้ไปดูด  
ซับแลนทาไนด์ในเตรดที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 30 – 600 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิและความ  
ดันบรรยากาศ ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 10 ถึง 60 นาที โดยปริมาณแลนทาไนด์ในเตรดที่ถูก  
ดูดซับไว้ได้ ตรวจสอบได้จากการคายกลับด้วยกรดไนตริก 0.05 โมลาร์ ทั้งยังศึกษาถึงการนำตัว  
ดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้ว นำกลับมาดูดซับใหม่เป็นวัฏจักร

ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตได้ 640 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน โดยการดูด  
ซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต สามารถ  
เข้าสู่สมดุลภายใน 10 นาที มีค่าปริมาณดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดจำเพาะที่ 65 มิลลิกรัม/กรัม  
ถ่าน โดยค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะแตกต่างกันขึ้นกับอัตราส่วนของปริมาณตัวดูดซับต่อ  
สารละลาย 50 – 500 กรัม/ลิตร และที่ความเข้มข้นต่างกันใช้อัตราส่วนตัวดูดซับต่อสารละลาย  
เท่ากันคือ 100 กรัม/ลิตร ตลอดจนการนำตัวดูดซับที่ยังคงมีไตรบิวทิลฟอสเฟตอยู่ภายใน  
กลับมาใช้ใหม่ พบว่าการดูดซับถึงสภาวะคงตัวที่วัฏจักรการดูดซับรอบที่ 5

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

## 5270446321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: LANTHANIDE NITRATED/TRIBUTYL PHOSPHATE/ADSORPTION

PASSWORN THAMSATJAKUL: ADSORPTION OF LANTHANIDE NITRATES WITH COCONUT SHELL ACTIVATED CARBON ADSORBING TRIBUTYL-PHOSPHATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D., 115 pp.

Tri-n-butyl phosphate (TBP) was adsorbed on commercial activated carbon, produced from coconut shell, at ambient temperature for 60 min. After drying the activated carbon at 343 K for 60 min, it was used to adsorb lanthanide nitrates in the solutions with the concentration of 30 - 600 g/L at ambient temperature for 10-60 min. The adsorbed amount of lanthanide nitrates was measured by desorbing lanthanide nitrate with 0.05 M. nitric acid solution. In addition, re-using the desorbed activated carbon for adsorption lanthanide nitrates was investigated.

The activated carbon was able to adsorb TBP 640 mg/g. The adsorption of lanthanide nitrate on the activated carbon adsorbing TBP reached the equilibrium within 10 min. The equilibrium adsorbed amount of lanthanide nitrates was 65 mg/g. The equilibrium adsorbed amount varied proportionally to the adsorbent to the solution ratio for the 50 - 500 g/L lanthanide nitrate solution, and to the solution concentrations for the adsorbent to the solution ratio of the 100 g/L lanthanide nitrate solution. The activated carbon containing TBP could be re-used to adsorb lanthanide nitrate for at least 10 times without adding TBP. In addition, the adsorption of lanthanide nitrates reached its periodic steady-state after 5 cycles of adsorption/desorption.

Department: ....Chemical Engineering..... Student's Signature: .....

Field of Study: ..Chemical Engineering.... Advisor's Signature: .....

Academic Year: .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา นัทรศิริเวช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในการให้คำแนะนำและดูแลเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกรุณาตรวจสอบเนื้อหาวิทยานิพนธ์เพื่อให้ได้วิทยานิพนธ์ที่มีความสมบูรณ์ ตลอดจน ศาสตราจารย์ ดร.

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพร รับคำอินทร์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยมหิดล ที่ได้ให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อศูนย์วิจัยและพัฒนาธาดูหาซากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และคุณ คุณเชาวเลข ชยวัฒน์นงกุล ผู้เชี่ยวชาญด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ และ คุณสุสดี ช่วยแก้ว นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี และเครื่องมือวิจัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี ผลงานวิจัยสมบูรณ์เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา ญาติพี่น้อง และ เพื่อนพี่น้องห้องวิจัย วิศวกรรมกระบวนการผลิตเพื่อความยั่งยืน ที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ต
สัญลักษณ์และตัวย่อ .....	ด
<b>บทที่</b>	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ธาตุอนุกรมแลนทาไนด์.....	5
2.1.1 ประวัติการค้นพบ.....	5
2.1.2 การจัดเรียงอิเล็กตรอนและรัศมีของอนุภาค.....	7
2.1.3 กระบวนการแยกธาตุบริสุทธิ์.....	10
2.1.4 การแยกธาตุกัมมันตรังสีออกจากแร่โมนาไซต์.....	11
2.2 ทฤษฎีการดูดซับ .....	14
2.2.1 ประเภทการดูดซับ.....	14
2.2.2 ตัวดูดซับ.....	15
2.2.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเหลว .....	17
2.2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ .....	21

บทที่	หน้า
2.2.3 การควบคุมสารอินทรีย์จากสารละลาย.....	22
2.2.4 การควบคุมสารอินทรีย์ด้วยถ่านดูดซับ.....	23
2.2.5 การควบคุมในกระบวนการแบบกะ.....	24
2.2.6 อิทธิพลที่มีผลต่อสถานะดูดซับ.....	25
2.3 ทฤษฎีการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	26
2.3.1 การสกัดโลหะด้วยตัวทำละลายอินทรีย์.....	26
2.3.2 ตัวทำละลายอินทรีย์.....	27
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3. การดำเนินการทดลอง.....	35
3.1 สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์.....	35
3.2 ศึกษาปริมาณการดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว.....	36
3.3 ศึกษาสมมูลดูดซับและคายกลับแลนทาไนด์ในเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟต.....	37
3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของเวลาการดูดซับต่อสมมูลดูดซับ.....	37
3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อสมมูลดูดซับ.....	38
3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อสมมูลดูดซับ.....	39
3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของวัฏจักรการดูดซับ.....	40
4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.1 ศึกษาปริมาณการดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์กะลามะพร้าว.....	41
4.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว.....	41
4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตจำเพาะของถ่านกัมมันต์.....	42
4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟต.....	46



บทที่	หน้า
4.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรคของถ่านกัมมันต์ จากกะลามะพร้าวที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	48
4.2.1 การเตรียมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรคเริ่มต้น.....	48
4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของเวลาการดูดซับ.....	50
4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	56
4.2.4 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นแลนทาไนด์ในเตรค.....	67
4.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีอิทธิพล ต่อวัฏจักรการดูดซับ.....	74
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
5.2.1 สรุปผลการวิจัย.....	78
5.2.2 ข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	114
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	รายละเอียดการค้นพบธาตุกลุ่มแลนทาไนด์.....	6
2.2	การจัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอมและไอออนของธาตุกลุ่ม แลนทาไนด์.....	9
4.1	คุณสมบัติพื้นฐานถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว.....	42
4.2	ค่าคงที่จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ดูดซับอันดับหนึ่ง .....	44
4.3	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในสารละลาย แลนทาไนด์ในเตรดรวม .....	48
4.4	องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์ ในเตรดรวม .....	49
4.5	ความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดในสารละลายแลนทาไนด์ในเต รดรวมที่คายกลับแต่ละรอบของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	51
4.6	สัดส่วนการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดเฉลี่ยของแต่ละรอบการคาย กลับของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที.....	51
4.7	ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดใน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรดรวมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	53
4.8	องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์ ในเตรดรวมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	54
4.9	ความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดในสารละลายแลนทาไนด์ในเต รดรวมที่คายกลับแต่ละรอบของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดย น้ำหนักต่อปริมาตร.....	57
4.10	สัดส่วนการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดเฉลี่ยของแต่ละรอบการคาย กลับของปริมาณถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	57

ตารางที่	หน้า
4.11 ปริมาณคูดซั้บจำพะาะของถ่านกั้มมันต์ที่คูดซั้บ ไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	59
4.12 ปริมาณการคูดซั้บจำพะาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดใน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมของปริมาณถ่านกั้มมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนั้กต่อปริมาตร.....	62
4.13 ปริมาณการคูดซั้บจำพะาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดใน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมของปริมาณถ่านกั้มมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนั้กต่อปริมาตร .....	63
4.14 การเปรียบเทียบการแยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรคด้วยการสกัดด้วย ของเหลวและการคูดซั้บด้วยถ่านกั้มมันต์ที่คูดซั้บ ไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	65
4.15 ความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคในสารละลายแลนทาไนด์ ในเตรครวมที่คายกลับแต่ละรอบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ ในเตรค 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร.....	68
4.16 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของแบบจำลองสมคูลคูดซั้บของเฮนรี่และ ฟรุนดริช.....	70
4.17 ค่าคงที่แบบจำลองสมคูลคูดซั้บของเฮนรี่และฟรุนดริช ของเกลือ แลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นสมคูลของแลนทาไนด์ ในเตรครวม.....	71
4.18 ปริมาณการคูดซั้บจำพะาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดใน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรค เริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร .....	71
4.19 องค์กรประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์ ในเตรครวมของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรคเริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร .....	72
4.20 ปริมาณการคูดซั้บจำพะาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดใน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมของวั้จจักรการคูดซั้บรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 10 .....	75

ตารางที่	หน้า
4.21	องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์ ในเตรดรวมของวัฏจักรการดูดซับรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 10 ..... 77
ก.1	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 10 นาที ..... 84
ก.2	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 20 นาที..... 85
ก.3	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 30 นาที ..... 86
ก.4	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 40 นาที ..... 87
ก.5	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 50 นาที ..... 88
ก.6	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ เวลาการดูดซับ 60 นาที ..... 89
ก.7	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 5..... 90
ก.8	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10..... 91
ก.9	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 15..... 92
ก.10	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 20..... 93
ก.11	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 30..... 94
ก.12	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 40..... 95

ตารางที่	หน้า
ก.13 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 50.....	96
ก.14 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 กรัมต่อลิตร .....	97
ก.15 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร .....	98
ก.16 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 กรัมต่อลิตร .....	99
ก.17 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 กรัมต่อลิตร .....	100
ก.18 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 150 กรัมต่อลิตร .....	101
ก.19 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร .....	102
ก.20 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ของ ความเข้มข้นเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร .....	103
ก.21 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 1.....	104
ก.22 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 2.....	105
ก.23 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 3.....	106
ก.24 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 4.....	107
ก.25 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 5.....	108

ก.26	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 6.....	109
ก.27	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 7.....	110
ก.28	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 8.....	111
ก.29	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 9.....	112
ก.30	ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้นที่สมดุลและที่คายกลับได้ ของวัฏจักรที่ 10.....	113

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดอะตอมและไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ .....	8
2.2 การดูดซับของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ .....	14
2.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับชนิดต่างๆ .....	16
2.4 สูตรโครงสร้างของไตรบิวทิลฟอสเฟต .....	27
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับกับปริมาณการดูดซับจำเพาะของ ไตรบิวทิลฟอสเฟตและน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส...	43
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของเวลาการดูดซับกับส่วนกลับของปริมาณ การดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตและน้ำ ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส.....	44
4.3 ดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	45
4.4 ภาพถ่ายถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวก่อนผ่านการดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (ก) ผิวนอกของถ่านกัมมันต์ (ข) โพรงของ ถ่านกัมมันต์.....	46
4.5 ภาพถ่ายถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวเมื่อผ่านการดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (ก) ผิวนอกของถ่านกัมมันต์ (ข) โพรงของ ถ่านกัมมันต์.....	47
4.6 ความลักษณะของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับภายในถ่านกัมมันต์ที่ โพรงขนาดเล็ก ขนาดกลาง ขนาดใหญ่และบริเวณพื้นผิวนอก.....	47
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของแลนทาไนด์ ไนเตรดสะสมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	50
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับกับปริมาณการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ ไนเตรดจำเพาะของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	52
4.9 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ไนเตรดระหว่าง สารละลายแลนทาไนด์ไนเตรดก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และในตัวดูดซับ ของ การดูดซับ 10 ถึง 60 นาที .....	55

ภาพที่	หน้า
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของแลนทาไนด์ ในเตรดสะสมของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยมวลต่อ ปริมาตร.....	56
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของเกลือ แลนทาไนด์ในเตรดที่เวลาสมดุล.....	58
4.12 พฤติกรรมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับก๊าซ (ก) และดูดซับของเหลว (ข) ที่ระดับโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดเล็ก.....	60
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับ ปริมาณการดูดซับจำเพาะของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร .....	61
4.14 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดระหว่าง สารละลายแลนทาไนด์ในเตรดก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และ ในตัวดูดซับ ของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร...	64
4.15 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟตกับปริมาณการสกัดจำเพาะใน การสกัดเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยตัวทำละลายเหลว.....	66
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของแลนทาไนด์ ในเตรดสะสมของความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรด 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร .....	67
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับ ปริมาณการดูดซับจำเพาะของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรดเริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร .....	69
4.18 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดระหว่าง สารละลายแลนทาไนด์ในเตรดก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และ ในตัวดูดซับ ของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรด เริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร.....	73



ภาพที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวัฏจักรการดูดซับกับปริมาณการดูดซับเกลือ แลนทาไนด์ในเตรคจำเพาะ.....	74
4.20 แบบจำลองวัฏจักรการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรคด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต.....	76

### สัญลักษณ์และตัวย่อ

$q$	=	ปริมาณการดูดซับจำเพาะ
$q_T$	=	ปริมาณการดูดซับจำเพาะรวมของเกลือไนเตรด
$C$	=	ความเข้มข้นที่ดูดซับได้
$C_T$	=	ความเข้มข้นรวมของแลนทาไนด์ไนเตรดรวมของเกลือไนเตรด
$t$	=	เวลาการดูดซับ
$\bar{X}$	=	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต
S.D.	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
C.V.	=	สัมประสิทธิ์การผันแปร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธาตุหายาก (Rare Earth Elements) เป็นกลุ่มธาตุในอนุกรมแลนทาไนด์ (Lanthanide Series) ของตารางธาตุ ซึ่งประกอบด้วยธาตุต่าง ๆ จำนวน 15 ธาตุ โดยปกติของผสมของธาตุหายากจะแยกเป็นกลุ่ม ดังนี้ ธาตุน้ำหนักรเบา (LREE) ได้แก่ แลนทานัม (La), ซีเรียม (Ce), เพอร์ซีโอดีเมียม (Pr) และ นีโอดีเมียม (Nd) ธาตุน้ำหนักรปานกลาง (MREE) ได้แก่ โพรมีเทียม (Pm), ซาแมเรียม (Sm), ยูโรเพียม (Eu) และ แกโดลิเนียม (Gd) ธาตุน้ำหนักรสูง (HREE) ได้แก่ เทอร์เบียม (Tb) และ ดิสโพรเซียม (Dy), โฮลเมียม (Ho), เออร์เบียม (Er), ทูเลียม (Tm), อิตเทอร์เบียม (Yb) และ ลูทีเซียม (Lu) [1]

ธาตุหายากมักเกิดอยู่รวมกันในแร่แบสต์ไนต์ (Bastnaesite) โมนาไซต์ (Monazite) และ ซีโนไทม์ (Xenotime) การแยกสารเจือปนออกทำให้ได้ธาตุที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการแยก ซึ่งการแยกธาตุหายากออกมาแต่ละตัวนั้นกระทำได้ยาก เนื่องจาก ธาตุดังกล่าวตามธรรมชาติมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน [2] แร่โมนาไซต์ มีธาตุโลหะหายากน้ำหนักรเบา โดยทฤษฎีประมาณร้อยละ 70 เป็นแร่ที่เกิดอยู่ในหินแกรนิต ซึ่งเป็นทางแร่จากเหมืองแร่ดิบุกในภาคใต้ของประเทศไทย ประกอบด้วยธาตุหายากในกลุ่มอนุกรมแลนทาไนด์ 9 ชนิด ได้แก่ แลนทานัม, ซีเรียม, เพอร์ซีโอดีเมียม, นีโอดีเมียม, ซาแมเรียม, ยูโรเพียม, แกโดลิเนียม, ดิสโพรเซียม, อิตเทอร์เบียม ทั้งยังมียูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งอยู่ในอนุกรมแอกติไนด์ และ อิตเทรียม ซึ่งอยู่ในอนุกรมทรานซิชัน [3] ธาตุหายากเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงของกระบวนการสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งของผสมของธาตุหายากจำเป็นต้องแยกออกมาก่อนที่จะนำเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไปใช้ต่อไป [4]

ธาตุหายากส่วนใหญ่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของปิโตรเลียมเหลว นอกจากนี้ยังใช้ทำสารประกอบสำหรับขั้วแก้ว และสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมแก้ว ทำแม่เหล็กถาวร อุปกรณ์กีฬา สารเร่งปฏิกิริยาการเรืองแสงของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หลอดภาพ โทรทัศน์ หลอดไฟฟ้า รั้งสีอิเล็กทรอนิกส์ สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น การใช้ประโยชน์ธาตุหายากดังกล่าวต้องการสารประกอบออกไซด์ของธาตุหายากแต่ละชนิดที่มีความบริสุทธิ์

สูง จึงมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแยกธาตุหายากให้มีความบริสุทธิ์เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานแต่ละประเภท [5] เพื่อใช้วัตถุดิบในประเทศให้เกิดประโยชน์และเพื่อทดแทนการนำเข้า

ในปี 1949 ได้มีการแยกซีเรียมออกจากธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ โดยการสกัดจากสารละลายกรด ในตริกไปยังไตรบิวทิลฟอสเฟต ภายหลั้มนิยมแยกแลนทาไนด์ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น น้ำมันก๊าด และสารสกัดไตรบิวทิลฟอสเฟต หรือ บิส -เอทิลเฮกซิลฟอสฟอนิก สำหรับการสกัดแลนทาไนด์จากสารละลายกรดในตริก โดยเมื่อชั้นของสารละลายกรดและสารสกัดอินทรีย์ถูกกวนเข้าด้วยกันและทำการแยกชั้น ชั้นของสารอินทรีย์จะมีความเป็นกรด และมีปริมาณของแลนทาไนด์ที่สกัดได้เพิ่มมากขึ้น โดยสารอินทรีย์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [7] โดยกระบวนการสกัดดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สารสกัดในปริมาณมากและสิ้นเปลืองพลังงานในการกวนผสม

การสกัดด้วยวิธีดูดซับไอออน เป็นกระบวนการสกัดธาตุหายากที่ยังมีผู้ทำการศึกษาวิจัยอยู่น้อยและไม่กว้างขวาง ซึ่งกระบวนการเริ่มจากนำถ่านกัมมันต์ไปดูดซับสารสกัดซึ่งสารสกัดจะสะสมอยู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ ด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือ ทางเคมี จากนั้นไอออนของโลหะจากสารละลายจะแพร่ผ่านเข้าไปในโพรงของถ่านกัมมันต์ โดยสารสกัดจะมีคุณสมบัติดึงดูดไอออนที่ต้องการได้ดี ทำให้เกิดพันธะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะ ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ใช้สารสกัดในปริมาณน้อย ปลอดภัยในการปฏิบัติการ และ ลดการใช้พลังงานในการกวนผสม อีกทั้งการประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์ มีความเหมาะสมในการใช้งานเนื่องจาก มีปริมาณพื้นที่ผิวและความพรุนสูง ทนต่อสภาวะที่อุณหภูมิและกัมมันตรังสีในระดับสูง โดยเฉพาะมีลักษณะแข็งและโครงสร้างรูพรุนคงตัวในสารละลายกรดเข้มข้น [6] ทั้งยังเป็นวัสดุจากธรรมชาติซึ่งมีราคาถูก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาสมมูลดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไครบิวทิลฟอสเฟต และสมมูลการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรดออกจากถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดไว้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 วัดปริมาณสมมูลดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยกระบวนการแบบกะที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 25 กรัมต่อลิตร ในช่วงเวลาการดูดซับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
- 1.3.2 วัดปริมาณสมมูลดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยกระบวนการแบบกะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 25 กรัมต่อลิตรและเวลาที่ใช้เข้าสู่สมมูลการดูดซับและคายกลับเป็น 10 นาที ในช่วงอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ
- 1.3.3 วัดปริมาณสมมูลดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยกระบวนการแบบกะที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและเวลาที่ใช้เข้าสู่สมมูลการดูดซับและคายกลับเป็น 10 นาที ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 10, 25, 50, 100, 150, 200 และ 250 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
- 1.3.4 วัดปริมาณสมมูลคายกลับแลนทาไนด์ในเตรด ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยกระบวนการแบบกะเป็นจำนวน 6 รอบ รอบละ 10 นาที ในช่วงเวลาการดูดซับ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
- 1.3.5 วัดปริมาณสมมูลคายกลับแลนทาไนด์ในเตรด ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยกระบวนการแบบกะเป็นจำนวน 6 รอบ รอบละ 10 นาที ในช่วงอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลาย แลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ
- 1.3.6 วัดปริมาณสมมูลคายกลับแลนทาไนด์ในเตรด ด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ด้วยกระบวนการแบบกะเป็นจำนวน 6 รอบ รอบละ 10 นาที ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 10, 25, 50, 100, 150, 200 และ 250 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

- 1.3.7 วัดปริมาณการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรคของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรค ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรคเป็น 25 กรัมต่อลิตร และ เวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลการดูดซับและคายกลับเป็น 10 นาที โดยทำการวัดซ้ำจำนวน 10 รอบ วัฏจักร
- 1.3.8 หาแบบจำลองสมดุลดูดซับแลนทาไนด์ในเตรคของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงค่าคงที่ของสมดุลดูดซับและคายกลับของแลนทาไนด์ในเตรค เมื่อทำการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต
- 1.4.2 ทำให้ลดปริมาณการใช้สารสกัดไตรบิวทิลฟอสเฟตในกระบวนการแยกแลนทาไนด์ในเตรค เมื่อเทียบกับกระบวนการสกัดด้วยของเหลว
- 1.4.3 ลดการใช้พลังงานในการกวนผสมและไม่เกิดอิมัลชันของสารสกัดไตรบิวทิลฟอสเฟต และสารละลายแลนทาไนด์ในเตรคในระหว่างการสกัด ทั้งยังไม่เกิดอิมัลชันของสารสกัดไตรบิวทิลฟอสเฟตและสารละลายกรดไนตริกในระหว่างการสกัดกลับ
- 1.4.4 เป็นข้อมูลการออกแบบและพัฒนากระบวนการแยกแลนทาไนด์ในเตรคด้วยกระบวนการดูดซับและคายกลับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตในระดับอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ธาตุอนุกรมแลนทาไนด์

คำว่า “ธาตุหายาก” (rare earths) โดยทั่วไปหมายถึงอนุกรมแลนทาไนด์ (lanthanides) ซึ่งมาจากชื่อของธาตุชนิดแรกของอนุกรม คือ ธาตุแลนทานัม ซึ่งอยู่ในคาบที่ 6 ของตารางธาตุ โดยอนุกรมแลนทาไนด์ (เลขอะตอม 57-71) เป็นธาตุที่คล้ายคลึงกันในกลุ่มทั้งในสภาวะที่เป็นธาตุ และ สารประกอบ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติขึ้นอยู่กับสภาวะออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงเลขอะตอมเป็นหลัก โดยสภาวะออกซิเดชันของอนุกรมแลนทาไนด์เสถียรที่เลขออกซิเดชัน +3 ตลอดอนุกรม การมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกันตลอดอนุกรมจึงทำให้การแยกธาตุให้บริสุทธิ์จากอนุกรมกระทำได้ยากและต้องผ่านกระบวนการหลายขั้นตอน

##### 2.1.1 ประวัติการค้นพบ [1]

กลุ่มธาตุหายากเป็นธาตุตามธรรมชาติกลุ่มใหญ่ที่สุดในตารางธาตุ แม้ว่าในความเป็นจริงธาตุกลุ่มนี้สามารถค้นพบได้ง่ายและมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีใกล้เคียงกัน ดังนั้นการแยกธาตุดังกล่าวให้มีความบริสุทธิ์เป็นเรื่องที่กระทำได้ยากในด้านของเคมีอนินทรีย์

ในปี ค.ศ. 1794 ได้มีการแยกธาตุอิตเทรียม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับธาตุหายากได้สำเร็จ และต่อมาในปี ค.ศ. 1907 ได้มีการค้นพบธาตุลูทีเซียม และในปี ค.ศ. 1913 Moseley ได้แสดงถึงธาตุ 14 ตัวที่อยู่ระหว่าง แลนทาอิมและฮาฟเนียม ซึ่งนำไปสู่การค้นพบธาตุหายาก แต่การแยกธาตุแต่ละตัวออกมานั้นกระทำได้ยาก จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1948 Marinsky และ Coryell ได้ริเริ่มใช้กระบวนการโครมาโทกราฟีแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ได้กลุ่มธาตุหายากซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสลายตัวของยูเรเนียม ถึงแม้ว่า อิตเทรียม และ สแกนเดียม จะไม่จัดอยู่ในกลุ่มธาตุหายาก แต่ก็มีความสัมพันธ์กันในตารางธาตุ เนื่องจากธาตุทั้งสองเป็นธาตุที่มีลำดับก่อนหน้าธาตุหายาก ในหมู่ IIIB ดังนั้น ธาตุทั้งสองจึงถูกพบในแร่ที่มีธาตุหายาก แม้ว่า สแกนเดียม จะถูกค้นพบในปริมาณน้อย

ธาตุหายากได้มีการจัดแบ่งประเภทเพื่อความสะดวก และ ไม่สับสนเมื่อกล่าวถึงกลุ่มของธาตุหายาก โดยได้มีการแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ธาตุน้ำหนักเบา ธาตุน้ำหนักปานกลาง และ ธาตุน้ำหนักสูง ซึ่งธาตุน้ำหนักเบา (Light Rare Earth Elements) ได้แก่ แลนทานัม (La), ซีเรียม (Ce), เพอร์ซีโอดีเมียม (Pr) นีโอดีเมียม (Nd) และ โพรมีเทียม (Pm) ธาตุน้ำหนักปานกลาง (Middle Rare Earth Elements) ได้แก่ ซาแมเรียม (Sm), ยูโรเพียม (Eu) แกโดลิเนียม (Gd) เทอร์เบียม (Tb), ดิสโพรเซียม (Dy) และ โฮลเมียม (Ho) ธาตุน้ำหนักสูง (Heavy Rare Earth Elements) ได้แก่ เออร์เบียม (Er), ทูเลียม (Tm), อิตเทอร์เบียม (Yb) และ ลูทีเซียม (Lu)

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดการค้นพบธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ [1]

ชื่อธาตุ	สัญลักษณ์ธาตุ	ปีที่ค้นพบ	ชื่อผู้ค้นพบ
อิตเทรียม	Y	1843	Nilson
แลนทานัม	La	1839	Mosander
ซีเรียม	Cs	1841	Mosander
เพอร์ซีโอดีเมียม	Pr		
นีโอดีเมียม	Nd	1885	Auer v. Welsbach
ซาแมเรียม	Sm		
ยูโรเพียม	Eu	1901	Demarcay
แกโดลิเนียม	Gd	1880	de Marignac
เทอร์เบียม	Tb	1878	de Marignac Delafontaine
ดิสโพรเซียม	Dy	1886	Lecoq De Boisbaudran
โฮลเมียม	Ho	1879	Cleve
เออร์เบียม	Er	1879	Cleve
ทูเลียม	Tm	1879	Cleve
อิตเทอร์เบียม	Yb	1878	de Marignac
ลูทีเซียม	Lu	1907	Auer v. Welsbach



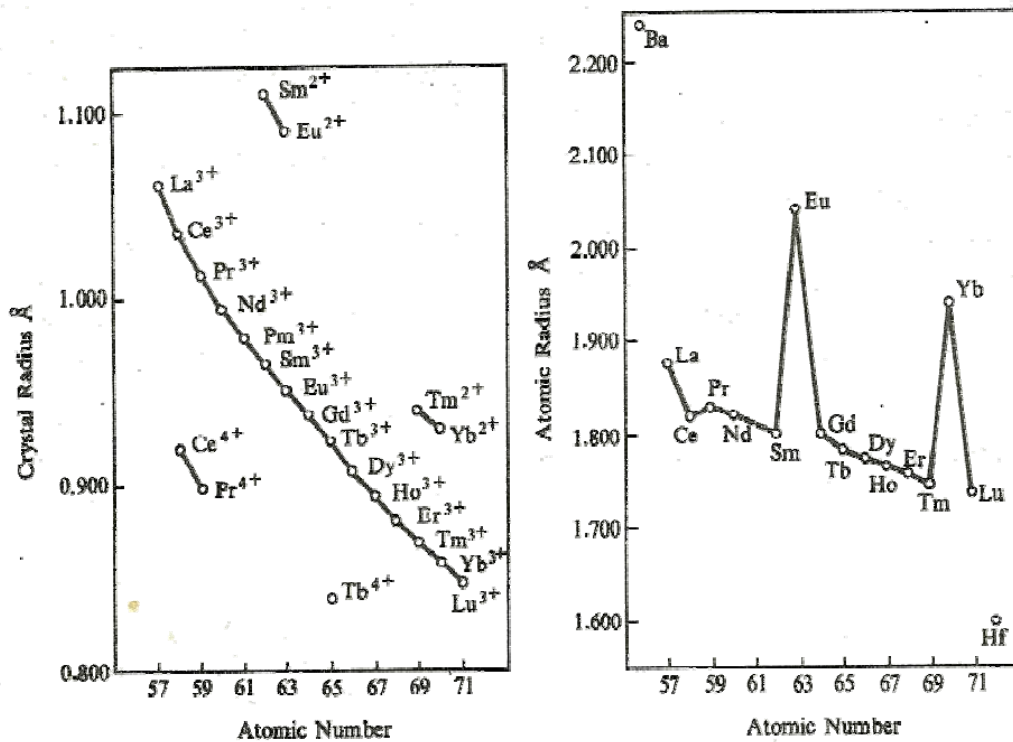
ในส่วนของ อิตเทรียม มักพบบ่อยครั้งในแร่ที่มีธาตุหายาก และมักอยู่บนอยู่ในกลุ่มของธาตุหายากน้ำหนักปานกลางและน้ำหนักสูง ซึ่ง อิตเทรียม มีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายคลึงกับธาตุหายากน้ำหนักสูง ส่วน สแกนเดียม มีคุณสมบัติบางอย่าง ต่างจากอิตเทรียม และ แลนทาไนด์ ซึ่งในปีค.ศ. 1794 Gadolin ได้ทำการแยกแร่ แกโดลิไนต์ (Gadolinite) และค้นพบ “yttria” ซึ่งมีธาตุอิตเทรียมและธาตุหายากน้ำหนักปานกลางและน้ำหนักสูงในปริมาณมาก หลังจากนั้นในปีค.ศ. 1804 Berzelius และ Hisinger นำแร่ซีไรต์ (Cerite) มาทำการแยก “yttria” ออกจากของผสมซิลิเกต แต่พบธาตุกลุ่มใหม่รู้จักในชื่อของ “ceria” ซึ่งภายหลังพบว่า “ceria” อุดมไปด้วยธาตุหายากน้ำหนักเบา การค้นพบ “yttria” ของ Gadolin และการค้นพบ “ceria” ของ Berzelius ซึ่งต่อมามีการตรวจพบว่าสารทั้งสองชนิดเป็นสารประกอบออกไซด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ในการแยกธาตุหายากโดยจะทำการแยกธาตุน้ำหนักเบา และ น้ำหนักสูง ออกมาตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1

#### 2.1.2 การจัดเรียงอิเล็กตรอนและรัศมีของอนุภาค [6]

อนุกรมแลนทาไนด์มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนใน ออร์บิทัล-4f ซึ่งแลนทานัมจัดเรียงใน ออร์บิทัล-5d ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า ออร์บิทัล-4f ดังนั้นแลนทานัมมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น  $[Xe] 6s^2 5d^1$  และเมื่อจำนวนโปรตอนภายในนิวเคลียสเพิ่มขึ้น ออร์บิทัล-4f จะเกิดการหดตัวของอะตอมเป็นผลให้รัศมีอะตอมมีแนวโน้มลดลง

การจัดเรียงอิเล็กตรอนของซีเรียมเป็น  $[Xe] 6s^2 5d^1 4f^1$  และแนวโน้มการจัดเรียงเป็นไปอย่างต่อเนื่องเริ่มจากเพอร์ซีโอเดเนียมจนถึงยูโรเพียม ด้วยรูปแบบ  $[Xe] 6s^2 4f^n$  ( $n=3-7$ ) หลังจากยูโรเพียม อิเล็กตรอนตัวต่อไปจะทำการบรรจุลงใน ออร์บิทัล-5d ดังนั้น แกโดลิเนียม มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น  $[Xe] 6s^2 5d^1 4f^7$  หลังจากนั้นการจัดเรียงอิเล็กตรอนจะเข้าสู่รูปแบบเดิมตั้งแต่เทอร์เบียมจนถึงอิตเทอร์เบียม ด้วยรูปแบบ  $[Xe] 6s^2 4f^n$  ( $n=10-14$ ) โดย ลูทีเซียม เป็นธาตุตัวสุดท้ายมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น  $[Xe] 6s^2 5d^1 4f^{14}$  จากตารางที่ 2.2

รัศมีอะตอมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตลอดอนุกรม ยกเว้น ธาตุยูโรเพียม และ ธาตุอิตเทอร์เบียม แลนทาไนด์มีรัศมีอะตอมอยู่ระหว่าง ธาตุแบเรียมในหมู่ 2A และ ธาตุฮาฟเนียมในหมู่ 4B ยกเว้นในกรณีที่อยู่ในรูปของไอออน  $\text{Ln}^{+3}$  กรณีที่อิเล็กตรอนรอบนอกถูกดึงออกไป ทำให้ค่าประจุภายในนิวเคลียสเพิ่มมากขึ้นและเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม เป็นผลทำให้ค่ารัศมีไอออนลดลงตามเลขอะตอมที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นกรณีที่อยู่ในรูปของไอออน  $\text{Ln}^{+2}$  ธาตุยูโรเพียม และ ธาตุอิตเทอร์เบียม จะมีขนาดรัศมีไอออนที่ใหญ่กว่าไอออนอื่นในอนุกรม แต่เมื่ออยู่ในรูปของ  $\text{Ln}^{+3}$  ขนาดไอออนจะมีแนวโน้มลดลงตลอดอนุกรม แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงขนาดอะตอมและไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ [7]

ตารางที่ 2.2 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของอะตอมและไอออนของธาตุกลุ่มแลนทาไนด์ [6]

ธาตุ	การจัดเรียงอิเล็กตรอน			
	อะตอม	$\text{Ln}^{3+}$	$\text{Ln}^{4+}$	$\text{Ln}^{2+}$
La	$[\text{Xe}] 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}]$		
Ce	$[\text{Xe}] 4f^1 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^1$	$[\text{Xe}]$	
Pr	$[\text{Xe}] 4f^3 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^2$	$[\text{Xe}] 4f^1$	
Nd	$[\text{Xe}] 4f^4 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^3$	$[\text{Xe}] 4f^2$	$[\text{Xe}] 4f^4$
Pm	$[\text{Xe}] 4f^5 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^4$		
Sm	$[\text{Xe}] 4f^6 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^5$		$[\text{Xe}] 4f^6$
Eu	$[\text{Xe}] 4f^7 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^6$		$[\text{Xe}] 4f^7$
Gd	$[\text{Xe}] 4f^7 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^7$		
Tb	$[\text{Xe}] 4f^9 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^8$	$[\text{Xe}] 4f^7$	
Dy	$[\text{Xe}] 4f^{10} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^9$	$[\text{Xe}] 4f^8$	$[\text{Xe}] 4f^{10}$
Ho	$[\text{Xe}] 4f^{11} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{10}$		
Er	$[\text{Xe}] 4f^{12} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{11}$		
Tm	$[\text{Xe}] 4f^{13} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{12}$		$[\text{Xe}] 4f^{13}$
Yb	$[\text{Xe}] 4f^{14} 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{13}$		$[\text{Xe}] 4f^{14}$
Lu	$[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^1 6s^2$	$[\text{Xe}] 4f^{14}$		
Y	$[\text{Xe}] 4d^1 5s^2$	$[\text{Kr}]$		

### 2.1.3 กระบวนการแยกธาตุบริสุทธิ์ [6]

แร่แบสทีไนต์  $\text{LnFCO}_3$ , โมนาไซต์  $(\text{Ln}, \text{Th})\text{PO}_4$  มีกลุ่มธาตุแลนทาไนด์น้ำหนักเบาปริมาณมาก และ ซีโนไทม์  $(\text{Y}, \text{Th})\text{PO}_4$  มีกลุ่มธาตุแลนทาไนด์น้ำหนักสูงปริมาณมาก ประเทศจีนมีปริมาณธาตุหายากคิดเป็นร้อยละ 70 ของปริมาณทั้งหมดที่ค้นพบบนผิวโลกซึ่งมาจากทางใต้ของประเทศจีน โดยประเทศจีนทำการแยกธาตุแลนทาไนด์จากหินแกรนิตโดยการใช้อะลูมิเนียมซิลิเกตในการดูดซับธาตุแลนทาไนด์ ซึ่งแร่จากแต่ละแหล่งก็มีปริมาณธาตุแตกต่างกัน เช่น บางแห่งมีซีเรียมปริมาณน้อยแต่มีกลุ่มธาตุแลนทาไนด์น้ำหนักสูงปริมาณมาก ในขณะที่บางแห่งกลุ่มธาตุแลนทาไนด์น้ำหนักเบาปริมาณมาก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้จีนเป็นผู้นำในกลุ่มโลหะแลนทาไนด์

กระบวนการแยกแร่แลนทาไนด์แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ การแยกด้วยสารเคมี การตกผลึก การแลกเปลี่ยนไอออน และการสกัดด้วยตัวทำละลาย ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้การสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น ในการแยกซีเรียมออกจากสารละลายเริ่มต้น การแยกด้วยสารเคมีมักใช้ในสถานะที่ธาตุเกิดการออกซิเดชันต่างออกไปเป็นกรณีพิเศษ เช่น  $\text{Eu}^{+2}$  ผ่านการรีดักชันด้วยซิงค์อะมัลกัมและทำการตกตะกอนในรูปยูโรเพียมซัลเฟต ( $\text{EuSO}_4$ ) การตกผลึกมักใช้แยกสารที่มีการละลายแตกต่างกันออกจากเกลือของแลนทาไนด์ เช่น โบรเมต หรือ เอทิลซัลเฟต เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนไม่นิยมทำในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ แต่เป็นกระบวนการแยกได้ความบริสุทธิ์สูงและรวดเร็ว ไอโซโทปของแลนทาไนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญจากการสลายตัวของ  $^{235}\text{U}$  จึงต้องทำการแยกแลนทาไนด์ออกจากยูเรเนียม ซึ่งพบว่าแลนทาไนด์ไอออน ( $\text{Ln}^{+3}$ ) ถูกดูดซับบนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน นอกจากนั้นยังพบว่าสามารถเกิดสารเชิงซ้อนได้และเมื่อทำการล้างกลับไอออนจะถูกชะออกมาตามเลขอะตอม เกิดจากความแข็งแรงพันธะของสารเชิงซ้อนซึ่งแปรผันกับความหนาแน่นประจุ โดยข้อเสียเปรียบของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นจะเกิดการเลื่อมซ้อนของพีคซึ่งภายหลังได้ค้นพบว่า เอมีน โพลีคาร์บอกซิเลต เช่น  $\text{EDTA}^{4-}$  สารมาเกิดสารเชิงซ้อนกับแลนทาไนด์ได้อย่างดีทำให้เกิดการแยกดีขึ้น ได้มีการทดลองโดยการเติม คอปเปอร์ไอออนลงไปเพื่อป้องกันการตกตะกอนของกรดอิสระ ( $\text{H}_4\text{EDTA}$ ) หรือ สารเชิงซ้อนแลนทาไนด์ ( $\text{HLn}(\text{EDTA}) \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) บนเรซิน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแยกกระบวนการจะใช้เวลาในการสกัดด้วยตัวทำละลายมากใช้ในลำดับแรกของการแยกเพื่อให้ได้สารที่มีความบริสุทธิ์ 99.9% ในปี 1949 ได้มีการแยกซีเรียมไอออนออกจากแลนทาไนด์ไอออน โดยการสกัดไอออนจาก

สารละลายกรดไนตริก ไปยังไตรบิวทิลฟอสเฟตภายหลังนิยมนแยกแลนทาไนด์ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น น้ำมันก๊าด ละสารสกัดไตรบิวทิลฟอสเฟตหรือ bis(2-ethylhexyl) phosphinic สำหรับการสกัดแลนทาไนด์จากสารละลายกรดไนตริก โดยเมื่อชั้นของสารละลายกรดและสารสกัดอินทรีย์ถูกกวนเข้าด้วยกันและทำการแยกชั้น ชั้นของสารอินทรีย์จะมีความเป็นกรด และมีปริมาณของแลนทาไนด์ที่สกัดได้เพิ่มมากขึ้น โดยสารอินทรีย์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับแลนทาไนด์ที่กระจายตัวระหว่าง 2 วัฏภาค กำหนดด้วยค่า สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution Coefficient)

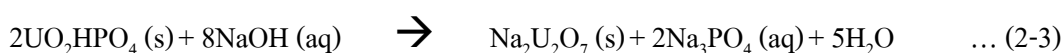
กระบวนการสกัดแบบไหลสวนทางซึ่งสารละลายอินทรีย์จะไหลสวนทางกับสารละลายกรดที่เต็มไปด้วยแลนทาไนด์ โดยที่สถานะสมดุลจะได้ค่าความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในแต่ละเฟสตามที่ต้องการ แต่เนื่องจาก การแยกแลนทาไนด์ที่มีความคล้ายคลึงกันในแต่ละขั้นตอนทำได้ยากจึงต้องใช้กระบวนการแยกกว่าพันขั้นตอนซึ่งสามารถแยกแลนทาไนด์ได้สูงสุดถึง 99.9% ซึ่งเหมาะในการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม

#### 2.1.4 การแยกธาตุกัมมันตรังสีออกจากแร่โมนาไซต์ [3]

เนื่องจากในแร่โมนาไซต์มียูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีผสมอยู่ด้วยจึงต้องแยกธาตุดังกล่าวออกก่อนการแยกธาตุหายากแต่ละชนิดออกจากกันกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักปรมาณูเพื่อสันติ เป็นกระบวนการแยกธาตุกัมมันตรังสีและธาตุซีเรียมออกจากธาตุหายากตามลำดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 1. การแปรสภาพแร่เป็นสารละลายด้วยต่าง

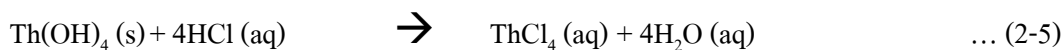
บดแร่โมนาไซต์ให้มีขนาดเล็กจนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช ได้ หลังจากนั้นย่อยแร่โดยใช้สารละลายโซดาไฟเข้มข้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



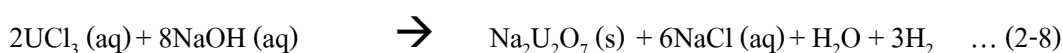
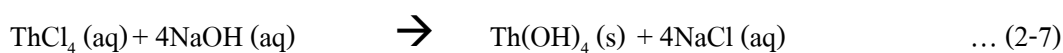
แยกส่วนที่เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ออกจากสารละลายเกลือไตรโพรเทียมฟอสเฟต ด้วยการกรอง สารละลายเกลือไตรโพรเทียมที่ได้ จะนำไปตกผลึกสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการชักล้างได้

## 2. การแยกธาตุกัมมันตรังสี

ละลายสารประกอบไฮดรอกไซด์ด้วยกรดเกลือเข้มข้นร้อยละ 35 ซึ่งจะทำให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของละลายออกมา ตามสมการ 2-4 ถึง 2-6



หลังจากนั้นตกตะกอนยูเรเนียมและทอเรียม โดยใช้สารละลายโซดาไฟเข้มข้นร้อยละ 20 ที่ค่าความเป็นกรดค่าไม่เกิน 4.5 ดังแสดงในสมการ 2-7 และ 2-8 ทำให้สารละลายเกลือที่เหลือมีเฉพาะธาตุหายาก ที่จะนำไปแยกสกัดต่อไป ตะกอนของยูเรเนียมและทอเรียมจะถูกสกัดแยกออกจากกัน เพื่อนำไปผลิตเป็นวัสดุนิวเคลียร์ต่อไป



## 3. การแยกสารประกอบซีเรียมออกจากธาตุหายาก

ตกตะกอนสารประกอบธาตุหายากในรูปของคลอไรด์ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวล ดังสมการ



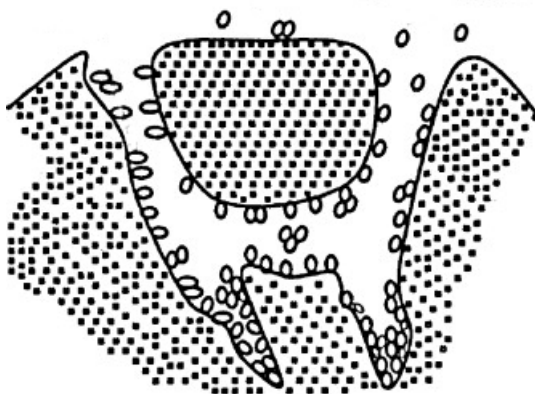
หลังจากนั้นนำตะกอนไปชะละลาย (leaching) ด้วยกรดอินประสิ่วเข้มข้นร้อยละ 68 จนได้ค่าความเป็นกรดต่างไม่น้อยกว่า 5.5 ธาตุหายากทุกตัวยกเว้นซีเรียมไฮดรอกไซด์ จะละลายและอยู่ในรูปสารละลายเกลือไนเตรต ทำให้สามารถแยกธาตุหายากชนิดแรกออกมาได้



สารละลายเกลือไนเตรตของธาตุหายากที่ได้จากกระบวนการจะมีความเข้มข้นประมาณ 20 – 25 กรัมต่อลิตร และจะนำไปประเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของธาตุหายากเป็น 200-250 กรัมต่อลิตร

## 2.2 ทฤษฎีการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ คือ กระบวนการแยกสารที่มีสถานะเป็นของเหลวหรือก๊าซออกไป โดยของเหลวหรือก๊าซเหล่านั้นจะไปสะสมที่ผิวของแข็งที่เรียกว่า ตัวดูดซับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 ซึ่งโดยทั่วไปตัวดูดซับจะมีอนุภาคขนาดเล็ก ในกระบวนการแยกสารตัวดูดซับจะถูกบรรจุในคอลัมน์และเมื่อมีของไหลไหลผ่านตัวดูดซับ จะเกิดการดูดซับสารที่ถูกดูดซับออกจากของไหลและเมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสารที่ถูกดูดซับจนกระทั่งไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่อไป จึงต้องทำการคายกลับสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับเพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ โดยตัวดูดซับจะทำการดูดซับและคายกลับเป็นวัฏจักร เรียกว่า วัฏจักรของการดูดซับ [8]



รูปที่ 2.2 การดูดซับของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ [9]

### 2.2.1 ประเภทการดูดซับ [10]

การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดึงดูดสารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกันแรงทางกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ได้แก่ แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารที่ถูกดูดซับกับขั้วบนผิวของสารที่ถูกดูดซับ, แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารที่ถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ และ แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ซึ่งลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิบรรยากาศ และ เกิดได้ดียิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ



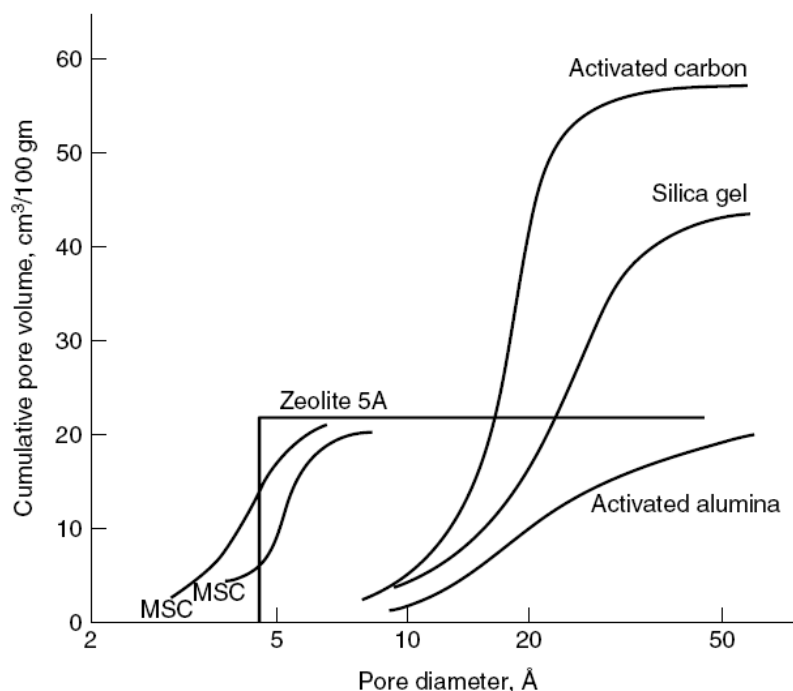
ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรงหรือเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ซ้อนทับกันมักเรียกการดูดซับชนิดนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)

การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงและการดูดซับจะเกิดที่เฉพาะผิวของตัวดูดซับเท่านั้น กล่าวคือ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นและมักเรียกการดูดซับชนิดนี้ว่า การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

### 2.2.2 ตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพโดยหลักเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงไฟฟ้าสถิตระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับอะตอมที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นพื้นผิวของตัวดูดซับควรมีลักษณะพิเศษ เช่น พื้นผิวและความเป็นขรุขระ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้ปริมาณการดูดซับสารสูงขึ้น แต่การที่มีพื้นที่ภายในโพรงสูงมากที่ปริมาตรคงที่ จะทำให้ขนาดของโพรงหรือระยะระหว่างผิวที่ทำการดูดซับน้อยลงเช่นกัน ดังนั้น ตัวดูดซับที่มีโพรงขนาดใหญ่ทำให้สารถูกดูดซับเข้าไปได้ง่าย ขณะเดียวกันตัวดูดซับที่มีโพรงขนาดเล็กก็เป็นคุณสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับซึ่งมีความสำคัญต่างกัน พื้นผิวที่มีความเป็นขรุขระเหมาะกับการดูดซับสารที่มีขี้ผึ้ง เช่น น้ำ เป็นต้น มักเรียกตัวดูดซับชนิดนี้ว่า “ไฮโดรฟิลิก” หรือตัวดูดซับจำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น ซีโอไลต์, อะลูมินา และ ซิลิกาเจล เป็นต้น ในกรณีที่ตัวดูดซับพื้นที่ผิวไม่มีขี้ผึ้ง มักเรียกตัวดูดซับชนิดนี้ว่า “ไฮโดรโฟบิก” ซึ่งเป็นตัวดูดซับจำพวก ถ่านกัมมันต์, พอลิเมอร์ และ ซิลิกาไลต์ ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าน้ำ [11]

ถ่านกัมมันต์ เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มีโพรงขนาดเล็กทำให้มีปริมาณพื้นที่จำเพาะสูง การกระจายตัวของขนาดโพรงของถ่านกัมมันต์ เทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับชนิดต่างๆ [12]

ถ่านกัมมันต์ เตรียมจากวัสดุที่ธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุธรรมชาติ เช่น ถ่านหินลิกไนต์, ถ่านน้ำมันปิโตรเลียม, วัสดุชีวมวล และ พอลิเมอร์ด้อยคุณภาพ เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก อาจยังมีธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และ กำมะถัน เป็นต้น ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ เริ่มจาก การเปลี่ยนวัสดุตั้งต้นให้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเพียงชนิดเดียว เรียกว่า “ถ่าน” ด้วยความร้อนที่บรรยากาศไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับวัตถุดิบ การผลิตถ่านจากวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่และมีลักษณะแข็งมาก เช่น กะลามะพร้าว และ ถ่านหิน เป็นต้น จำเป็นต้องเผาที่อุณหภูมิสูง เพื่อระเหยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย สลายพันธะสารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบและลดความแข็งของวัตถุดิบ ลำดับต่อมาคือ การสร้างโพรง เป็นขั้นตอนเปลี่ยนอะตอมคาร์บอนบางส่วนให้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน เพื่อสร้างโพรงให้ถ่านเหล่านั้น และ สร้างหมู่สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น หมู่แอลกอฮอล์, หมู่อีเทอร์, หมู่แอลดีไฮด์, หมู่คีโตน และ

หมุ่คาร์บอกซาลิก เป็นต้น การสร้างโพรงของถ่านจำแนกออกเป็น การสร้างโพรงด้วยก๊าซ ออกซิไดซ์ เช่น ไอ้ น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น หรือ การสร้างโพรงด้วยสารละลายกรด เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก หรือ สารละลายเกลือที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น ซิงค์คลอไรด์ เป็นต้น [10]

### 2.2.3 แบบจำลองสมดุลดูดซับของเหลว [10]

โมเลกุลของสารประกอบใดๆ ในสถานะของเหลวที่อยู่ติดกันอย่างต่อเนื่องด้วยแรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลและแรงดึงดูดระหว่างขั้วของโมเลกุล การดูดซับสารถูกดูดซับที่ปนอยู่ในของเหลวจึงมีลักษณะแตกต่างจากการดูดซับสารถูกดูดซับที่ปนอยู่ในก๊าซผสม แรงดึงดูดของของเหลวมีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับของเหลว โดยอาจช่วยให้ของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับได้ หรือ อาจขัดขวางการเคลื่อนที่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ การดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวเปียกของโพรงในตัวดูดซับ หรือ บนผิวโพรงที่ของเหลวสามารถไหลเข้าได้ แต่ของเหลวดังกล่าวไหลออกจากโพรงของตัวดูดซับไม่ได้ การคายกลับของเหลวในโพรงของตัวดูดซับออกจากโพรงอาจใช้พลังงานความร้อนเพื่อระเหยของเหลวในโพรงของตัวดูดซับ ซึ่งต้องใช้พลังงานมากกว่าพลังงานความร้อนแฝงของการระเหยของเหลวดังกล่าวหรือต้องระเหยของเหลวในโพรงที่อุณหภูมิที่สูงกว่าจุดน้ำค้าง (dew point) ของของเหลวดังกล่าว ของเหลวที่ถูกดูดซับในโพรงของตัวดูดซับมีลักษณะต่อเนื่องจากของเหลวรอบๆตัวดูดซับผ่านปากโพรงของตัวดูดซับจนถึงผิวเปียกในโพรงของตัวดูดซับดังกล่าว ดังนั้นวัฏภาคดูดซับของระบบดูดซับของเหลว คือ ของเหลวทั้งหมดภายในโพรงของตัวดูดซับ ปริมาตรจำเพาะของวัฏภาคดูดซับ ซึ่งมักมีค่าน้อยกว่าปริมาตรจำเพาะของการดูดซับก๊าซหรือไอ จะแปรตามสมบัติแรงดึงดูดของของเหลวเริ่มต้นก่อนการดูดซับ

แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q$ ) ของตัวดูดซับที่กำหนดกับความดันสมดุล ( $P$ ) ของก๊าซหรือไอของสารถูกดูดซับนั้น หรือ ความเข้มข้นสมดุล ( $C$ ) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสมที่อุณหภูมิของระบบดูดซับที่กำหนดไว้

ระบบดูดซับของเหลวที่มีสารถูกดูดซับอยู่ในปริมาณน้อย เช่น ไอออนโลหะหนักในน้ำ หรือ ความชื้นในน้ำมัน เป็นต้น ปริมาณสมดุลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะแปรผันเป็นสัดส่วนความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับในของเหลว แบบจำลองสมดุลดูดซับของระบบดูดซับของเหลวนี้จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงในลักษณะเดียวกับแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี (Henry's isotherm) ดังสมการที่ 2.11

$$q = K_H \cdot C \quad \dots (2.11)$$

ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี ( $K_H$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดลักษณะเฉพาะของระบบสมดุลดูดซับของสารถูกดูดซับในของเหลว แม้ว่าการดูดซับจะเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน แต่ของเหลวมีค่าความจุความร้อนสูงกว่าก๊าซหลายเท่า การดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวก็ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิของระบบดูดซับดังกล่าวเพิ่มขึ้นจากเดิม ดังนั้น ความร้อนของการดูดซับของเหลวจึงเป็นปัจจัยรองที่มักไม่พิจารณาในการคำนวณออกแบบตัวดูดซับ

เมื่อปริมาณสมดุลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะของระบบดูดซับของเหลวมีลักษณะโค้งคว่ำ แบบจำลองสมดุลดูดซับจึงมีลักษณะเดียวกับแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงมัวร์ (Langmuir's isotherm) ดังสมการที่ 2.12

$$q = \frac{q_{\max} \cdot K_L \cdot C}{1 + K_L \cdot C} \quad \dots (2.12)$$

เมื่อ  $K_L$  คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงมัวร์ และ  $q_{\max}$  คือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุด ซึ่ง ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงมัวร์ ( $K_L$ ) และ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{\max}$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดลักษณะเฉพาะของระบบสมดุลดูดซับของสารถูกดูดซับในของเหลว คำนวณจากจุดตัดแกนและความชันของความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างส่วนกลับของปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $1/q$ ) กับ ส่วนกลับของความเข้มข้นสมดุลของสารถูกดูดซับ ( $1/C$ ) ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.13

$$\frac{1}{q} = \left( \frac{1}{q_{\max} \cdot K_L} \right) \cdot \frac{1}{C} + \frac{1}{q_{\max}} \quad \dots (2.13)$$

เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของเหลวดังกล่าวลดลงเหลือน้อยมาก หรือระบบของเหลวเป็นของเหลวผสมที่มีสารถูกดูดซับเจือจาง แบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงมัวร์ จะเปลี่ยนเป็นแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรี โดยค่าคงที่สมมูลของเฮนรี ( $K_L$ ) คือ ผลคูณของปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{\max}$ ) กับค่าคงที่สมมูลดูดซับของแลงมัวร์ ( $K_L$ ) ของระบบดูดซับของเหลวดังกล่าวตามสมการ 2.14

$$\lim_{C \rightarrow 0} q = \lim_{C \rightarrow 0} \left( \frac{q_{\max} \cdot K_L \cdot C}{1 + K_L \cdot C} \right) = q_{\max} \cdot K_L \cdot C \quad \dots (2.14)$$

แม้ว่าปริมาณสมมูลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{\max}$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดลักษณะเฉพาะของแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงมัวร์ของระบบดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลวดังกล่าวแต่ค่าปริมาณสมมูลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ดังกล่าว อาจไม่ใช่ค่าปริมาณสมมูลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ที่เกิดขึ้นจริงในระบบดูดซับสารในของเหลวนั้นเมื่อความเข้มข้นสมมูลของสารถูกดูดซับในของเหลวมีค่าจำกัด เช่น ความเข้มข้นของไอออนชนิดต่างๆ ในน้ำ มักมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบของไอออนชนิดนั้นๆ นั่นคือปริมาณสมมูลดูดซับของสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุดของระบบดูดซับสารถูกดูดซับในของเหลว อาจถูกจำกัดด้วยความสามารถในการละลายของสารถูกดูดซับในของเหลวนั้น หรือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารละลายดังกล่าว ที่อุณหภูมิของระบบดูดซับของเหลวนั้น เมื่อความเข้มข้นสมมูลของสารที่ถูกดูดซับสมนัยกับปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของแลงมัวร์ มีค่าสูงกว่าการละลายของสารถูกดูดซับในของเหลวชนิดนั้นที่อุณหภูมิเดียวกัน

เมื่อความเข้มข้นสมดุลของสารดูดซับในของเหลวเพิ่มมากขึ้นความสัมพันธ์ของปริมาณสมดุลดูดซับสารดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับนั้นกับความเข้มข้นสมดุลของสารดูดซับในของเหลวดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง แม้ว่าเส้นโค้งของสมดุลระบบดูดซับสารดูดซับในของเหลวส่วนใหญ่มีลักษณะโค้งคว่ำ แบบจำลองสมดุลดูดซับของของเหลวของฟรุนดลิช (Freundlich's isotherm) เป็นแบบจำลองเส้นโค้งสมดุลดูดซับสารดูดซับในของเหลวที่สามารถประยุกต์ใช้กับสมดุลดูดซับของสารดูดซับในของเหลวที่มีลักษณะโค้งคว่ำ หรือ ลักษณะโค้งหงาย ดังสมการที่ 2.15

$$q = K_F \cdot C^n \quad \dots (2.15)$$

ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเหลวของฟรุนดริช ( $K_F$ ) และ ดัชนีชี้กำลัง ( $n$ ) ของแบบจำลองการดูดซับของเหลวของฟรุนดริชนี้คำนวณจากจุดตัดแกนตั้งและความชันของความสัมพันธ์เส้นตรงของค่าลอการิทึมของปริมาณสมดุลดูดซับสารดูดซับจำเพาะ ( $\ln q$ ) กับ ค่าลอการิทึมของความเข้มข้นสมดุลสารดูดซับ ( $\ln C$ ) ตามลำดับ ดังสมการที่ 2.16

$$\ln q = n \cdot \ln C + \ln K_F \quad \dots (2.16)$$

นั่นคือเมื่อดัชนีชี้กำลัง ( $n$ ) ของแบบจำลองสมดุลดูดซับมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง แบบจำลองสมดุลดูดซับของเหลวของฟรุนดริชนี้มีลักษณะโค้งคว่ำ แต่ถ้าดัชนีชี้กำลัง ( $n$ ) ของแบบจำลองสมดุลดูดซับมีค่ามากกว่าหนึ่ง แบบจำลองของสมดุลดูดซับของฟรุนดริชนี้จะมีลักษณะโค้งหงาย และ ค่าคงที่ของสมดุลดูดซับของเหลวของฟรุนดริช ( $K_F$ ) จะเปลี่ยนเป็นค่าคงที่สมดุลดูดซับของเหลวของเฮนรี ( $K_H$ ) เมื่อดัชนีชี้กำลัง ( $n$ ) ของแบบจำลองสมดุลดูดซับของฟรุนดริชมีค่าใกล้เคียงหนึ่ง

#### 2.2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ [13]

จลนพลศาสตร์การดูดซับแสดงถึงความสัมพันธ์ของอัตราการดูดซับกับเวลา โดยปกติแล้วอัตราเร็วของการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงระยะเริ่มต้นของการดูดซับ และอัตราเร็วจะลดลงอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งสมการที่นิยมใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ได้แก่ จลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่ง (First order kinetic) จลนพลศาสตร์อันดับที่หนึ่งเสมือน (Pseudo first order kinetic) และจลนพลศาสตร์อันดับที่สองเสมือน (Pseudo second order kinetic)

จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.17 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $1/q$  และ  $1/t$  ได้ตามสมการที่ 2.18

$$q = \frac{q_c \cdot k_1 \cdot t}{1 + k_1 \cdot t} \quad \dots (2.17)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{k_1}{q_c} \cdot \frac{1}{t} + \frac{1}{q_c} \quad \dots (2.18)$$

เมื่อ  $q$  และ  $q_c$  คือ ปริมาณดูดซับจำเพาะที่เวลาใด ๆ และปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลตามลำดับ  $k_1$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ และ  $t$  คือระยะเวลาของการดูดซับ

จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.19 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $\ln(q_c - q)$  และ  $\ln q_c$  ได้ตามสมการที่ 2.20

$$q = q_c (1 - e^{-k_1 t}) \quad \dots (2.19)$$

$$\ln(q_c - q) = \ln q_c - k_1 t \quad \dots (2.20)$$

จลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน มีรูปแบบของสมการตามสมการที่ 2.21 และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $t/q$  และ  $t$  ได้ตามสมการที่ 2.22

$$q = \frac{q_c^2 \cdot k_2 \cdot t}{1 + q_c \cdot k_2 \cdot t} \quad \dots (2.21)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{1}{q_c} \cdot t \quad \dots (2.22)$$

เมื่อ  $k_2$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

### 2.2.5 การดูดซับสารอินทรีย์จากสารละลาย [14]

น้ำทิ้งหรือน้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากที่ต่างๆ เป็นของผสมที่ประกอบด้วย สารแขวนลอย คอลลอยด์ และ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ที่ละลายอยู่ ซึ่งสารเจือปนดังกล่าวที่ปล่อยจากแหล่งอุตสาหกรรมมีความเข้มข้นระดับสูง ซึ่งการแยกสารดังกล่าวออกทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอน การกรอง การดูดซับ เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์ดังกล่าวมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม จึงต้องมีกระบวนการควบคุมและจำกัดปริมาณการปล่อยออก โดยกระบวนการกำจัด ไอออนโลหะออกจากสารละลายนั้นทำได้หลายกระบวนการ เช่น การตกตะกอน การใช้เยื่อเลือกผ่าน การออกซิเดชัน การแลกเปลี่ยนไอออน และ การดูดซับไอออน เป็นต้น ตัวดูดซับที่นิยมใช้คือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีหลายรูปแบบเช่น แบบผง แบบเม็ด และ แบบเส้นใย ซึ่งถ่านดูดซับดังกล่าวสามารถดูดซับไอออนจากสารละลายได้

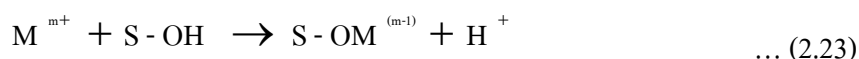
โลหะหนักเป็นมลพิษที่เกิดจากกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและชีวิตมนุษย์ เมื่อระดับของโลหะหนักสูงเกินกำหนด ซึ่งกระบวนการหลักที่ใช้ในการแยกไอออนโลหะออกจากสารละลาย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน ตลอดจนการดูดซับด้วยถ่านดูดซับซึ่งจะใช้ในกรณีความเข้มข้นของไอออนอยู่ในระดับต่ำ เช่น การแยกไอออนโลหะออกจากน้ำดื่ม เป็นต้น ซึ่งการดูดซับไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ นั้นมีต้นทุนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน ซึ่งโดยปกตินั้นการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ใช้ในการแยกสารอินทรีย์ แต่ไม่ค่อยพบในการใช้แยกไอออนโลหะในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งการดูดซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์นั้นสามารถศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่มีความคล้ายคลึงกัน เช่น การดูดซับ, การเกิดตะกอนที่ผิวของแข็ง, การเกิดสารเชิงซ้อนของ



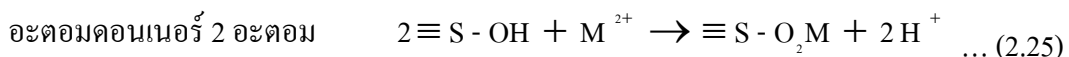
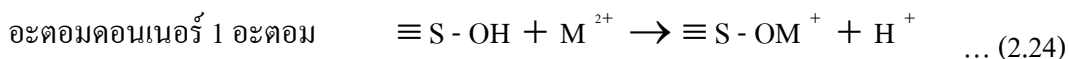
โลหะ และ การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ซึ่งการดูดซับดังกล่าวมีปัจจัยขึ้นกับ ชนิดของ ไอออนโลหะภายในสารละลาย และ หมู่ฟังก์ชันเคมีบนผิวของถ่านดูดซับ เป็นต้น

#### 2.2.6 การดูดซับสารอนินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ [14]

ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การดูดซับ (ทางกายภาพและทางเคมี), การเกิดตะกอนที่ผิวถ่านกัมมันต์, การเกิดสารเชิงซ้อนของโลหะ และ การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น การดูดซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์มีกลไกซับซ้อน หลายขั้นตอน ซึ่งเกี่ยวข้องกับชนิดของวัสดุและเงื่อนไขที่ใช้ในการดูดซับ นั่นคือ เมื่อถ่านกัมมันต์ทำการดูดซับไอออนโลหะจะทำให้ค่า pH ของสารละลายลดลง เมื่อเทียบปริมาณของ ไอออน  $H_3O^+$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับโดยการแลกเปลี่ยนไอออนของหมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านดูดซับกับไอออนโลหะ ซึ่งอธิบายได้จากสมการ 2.23 เมื่อ  $M^{m+}$  คือ ไอออนโลหะ และ S-OH คือ หมู่ฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ ดังนี้



กลไกการดูดซับเริ่มจากการเปลี่ยนสภาพไอออนของออกซิเจนที่ผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการออกซิไดซ์ จากนั้นเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนโลหะกับฟังก์ชันบนผิวถ่านกัมมันต์ อีกนัยหนึ่งคือ การดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีสภาพผิวเป็นสารออกซิไดซ์ ตัวอย่างเช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซาลิก จะดูดซับไอออนของ  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  และ  $Na^+$  เป็นต้น การเกิดสารเชิงซ้อนเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ถ่านดูดซับมีคุณสมบัติเป็นกรดหรือเบส ตามสมการ 2.24 และ 2.25



ในสถานะที่อัตราส่วนของไอออนโลหะต่อถ่านกัมมันต์มีค่าสูง และ ไอออนโลหะมีความเข้มข้นสูง บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อิมมัวด้วยไอออนโลหะและสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนเป็นของแข็งชนิดใหม่ หรือ เจลของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งจะเกาะอยู่ที่ผิวของถ่านดูดซับ ส่วนในกระบวนการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไอออนลบบนผิวของถ่านกัมมันต์กับไอออนบวกของโลหะโดยปราศจากการแลกเปลี่ยนไอออนหรืออิเล็กตรอนกลไกดังกล่าวข้างต้น ล้วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์ปัจจัยในการควบคุมกระบวนการดูดซับให้มีประสิทธิภาพ ได้แก่ ปริมาณสารเชิงซ้อนของออกซิเจนบนผิวถ่านกัมมันต์, ค่า pH ขณะที่ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์, รูปแบบโพรงของถ่านดูดซับ, ค่า pH และความเข้มข้นของไอออนภายในสารละลาย, อุณหภูมิของการดูดซับ และ คุณสมบัติการละลายและขนาดไอออนโลหะ

#### 2.2.7 การดูดซับในกระบวนการแบบกะ [14]

การดูดซับไอออนองค์ประกอบเดียว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะได้เช่นกัน ซึ่งค่าปริมาณการดูดซับขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สภาพของกระบวนการดูดซับ, ลักษณะของถ่านดูดซับ และ ลักษณะของไอออนโลหะ เป็นต้น โดยปริมาณการดูดซับจะอยู่ในช่วง 2-200 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งดูดซับได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการดูดซับด้วยดินดูดซับ ซึ่งถ่านดูดซับส่วนใหญ่พัฒนามาจากวัสดุชีวมวล ไคโตซานและลิกนิน เป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับไอออน  $Hg^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ได้มากกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นต้น

การดูดซับไอออนหลายองค์ประกอบ การแข่งขันในการดูดซับของไอออนโลหะขึ้นกับชนิดของไอออนโลหะ และ ชนิดของตัวดูดซับ ซึ่งมีความสำคัญต่อกลไกการดูดซับ ดังนั้นเมื่อมีการแข่งขันระหว่างไอออนที่ถูกดูดซับ ดังนั้นไอออนที่ถูกดูดซับได้ดีกว่าจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วเมื่อพิจารณาในกรณีของไอออนองค์ประกอบเดียวที่คุณสมบัติถ่านคงเดิม จากการพิจารณาการดูดซับของ  $Cu^{2+}$  แข่งกับ  $Pb^{2+}$  บนถ่านดูดซับ เมื่อไอออนโลหะทั้งสองในสภาพสารละลายไม่ทำปฏิกิริยาบริเวณพื้นผิวดูดซับ และ การดูดซับไอออนทั้งสองต้องไม่ส่งผลกระทบต่อการดูดซับแข่งกัน เมื่อเทียบกับการดูดซับไอออนองค์ประกอบเดียวของไอออนแต่ละตัว ซึ่งค่า pH ถือเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับไอออนหลายองค์ประกอบ

## 2.2.8 อิทธิพลที่มีผลต่อสภาวะคูคซับ [14]

อิทธิพลที่สำคัญของการคูคซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์ คือ ค่า pH ที่เหมาะสม ซึ่งมีผลต่อการเกิดสารเชิงซ้อนของไอออนโลหะบนผิวของถ่านกัมมันต์ โดยเมื่อค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลง ไอออนของโลหะจะเปลี่ยนรูปแบบการเกิดสารเชิงซ้อน นอกจากนี้ ประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นั้น กำหนดด้วยค่า pH ของสารละลาย นั่นคือ พื้นผิวจะมีค่าประจุเป็นบวกก็ต่อเมื่อค่า pH ต่ำกว่าจุดสมมูล ( $pH_{pzc}$ ) และเป็นลบเมื่อค่า pH สูงกว่าจุดสมมูล พบว่าเมื่อค่า pH สูงขึ้นทำให้ปริมาณการคูคซับไอออนสูงขึ้นด้วย นั่นคือเมื่อสภาพของสารละลายมีความเป็นด่างมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาดัง สมการ 2.23 มีการดำเนินการจากด้านขวาไปซ้ายทำให้ได้  $S-OM^{(m-1)+}$  เป็นผลิตภัณฑ์ หรือ คูคซับไอออนโลหะได้ปริมาณมากขึ้น กลไกการแลกเปลี่ยนไอออน หรือ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนั้น จะต้องคำนึงถึงไอออนชนิดอื่นที่เจือปนอยู่ภายในสารละลายด้วย ถ้าสารละลายมีค่าความแรงไอออนสูงขึ้น จะส่งผลต่อแรงผลักและแรงคูคซับไฟฟ้าระหว่างผิวถ่านคูคซับกับไอออนโลหะ นั่นคือถ้าเริ่มแรกแรงระหว่างถ่านคูคซับกับไอออนโลหะเป็นแรงผลัก การเพิ่มความแรงทางไอออนจะทำให้เกิดการคูคซับมากขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าเริ่มแรกแรงระหว่างถ่านกัมมันต์กับไอออนโลหะเป็นแรงคูคซับ การเพิ่มความแรงทางไอออนจะทำให้เกิดการคูคซับลดลง ยังมีปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการคูคซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์ คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะเริ่มต้น และ ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างไอออนโลหะต่อถ่านกัมมันต์ จะส่งผลให้การคูคซับลดลง รวมทั้งอิทธิพลของอุณหภูมิในการคูคซับ

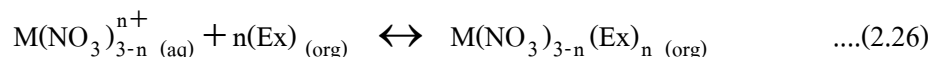
## 2.3 ทฤษฎีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ กระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากของผสม โดยการนำสารที่ต้องการจากวัฏภาคของเหลวชนิดหนึ่งนำไปสู่วัฏภาคของเหลวชนิดหนึ่ง โดยของเหลวทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติต่างกันซึ่งทำให้สามารถแยกสารที่ต้องการให้มีความบริสุทธิ์ขึ้นได้ โดยจะขึ้นกับสมดุลของการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาค 2 วัฏภาคที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน [8]

### 2.3.1 การสกัดโลหะด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ [15]

สารละลายจำพวกสารอิเล็กโทรไลต์ส่วนใหญ่ไม่ละลายในสารอินทรีย์แต่มีไอออนโลหะบางชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ได้ซึ่งทำให้ไอออนโลหะสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ ซึ่งสัดส่วนการละลายขึ้นกับปัจจัยของปฏิกิริยาทางเคมี จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1940 – 1950 ได้มีการศึกษาและพัฒนากฎการแยกธาตุ นิวเคลียร์และธาตุหายาก เพื่อศึกษาสารสกัดที่มีประสิทธิภาพในการแยกสูงและต้นทุนต่ำ กระบวนการแยกด้วยตัวทำละลายอินทรีย์มีหลักการคล้ายคลึงกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะได้ โดยในการเลือกใช้ตัวทำละลายหรือสารสกัดนั้นควรพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การแยกตัวของสารที่ต้องการเป็นหลัก อีกทั้งยังประกอบด้วยปัจจัยหลายประการเช่น ความคงตัวของสารสกัด, ความสามารถในการละลาย, จลนศาสตร์เคมี และ ต้นทุน เป็นต้น ซึ่งข้อดีของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ คือ เมื่อทำการแยกไอออนโลหะที่ต้องการออกไปสามารถนำสารสกัดกลับมาใช้ในกระบวนการต่อไปได้

การสกัดเกลือโลหะจากสารละลายด้วยตัวทำละลายสกัดอินทรีย์ ทำให้เกิดการแพร่ของเกลือโลหะจากสารละลายไปสู่ตัวทำละลายอินทรีย์ และเมื่อเกิดปฏิกิริยากับสารสกัดจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายในตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่ง ไม่ละลายในตัวทำละลายเดิม โดยเกลือของโลหะสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมเท่านั้น และตัวทำละลายทั้งสองชนิดจะไม่ละลายซึ่งกันและกัน หรือละลายกันได้น้อยมาก ทำให้ภายหลังการสกัดจะเกิดของเหลวสองเฟสแยกชั้นกัน ซึ่งปฏิกิริยาของการสกัดแยกแสดงดังสมการที่

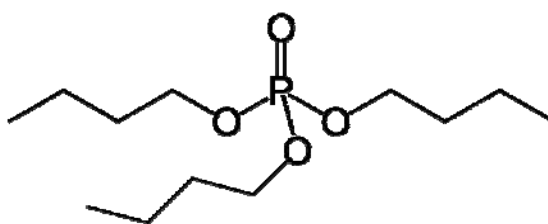


โดยที่  $M(NO_3)_3$  คือเกลือไนเตรดของธาตุที่มีเลขออกซิเดชัน +3 และ EX คือตัวทำละลายอินทรีย์ โดยการเลือกใช้ตัวทำละลายต้องคำนึงถึงต้นทุน, ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และค่าการละลายของสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นหลักสำคัญ แต่ในบางครั้งจำเป็นต้องทำการปรับแต่งสารสกัดอินทรีย์ โดยการเติมแต่สารอินทรีย์บางชนิด เพื่อการเจือจางหรือปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดความหนืดในการใช้งาน, เพื่อปรับสัดส่วนให้เหมาะสม และ ลดค่าการละลายของสารละลายอินทรีย์สารสกัดอินทรีย์ เป็นต้น

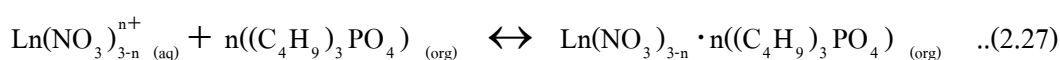
### 2.3.2 ตัวทำละลายอินทรีย์ [15]

การเลือกตัวสกัดที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างอาทิเช่น ประสิทธิภาพของสารสกัด ความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งสารสกัดที่นิยมใช้การในสกัดธาตุหายากโดยใช้วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย แบ่งตามความเป็นกรดและด่างได้ดังนี้

1. สารสกัดชนิดเป็นกลาง ที่นิยมใช้ที่สุดคือ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-*n*-butyl phosphate, TBP) สารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของกรดโอโทฟอสฟอริก (orthophosphoric) มีสูตรโครงสร้าง  $[CH_3(CH_2)_3O]_3PO$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยจะสกัดแยกสารละลายธาตุหายากรูปของเกลือไนเตรดแสดงดังสมการที่ 2.27

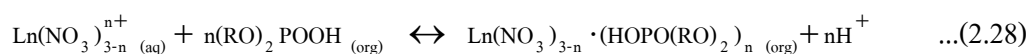


รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของไตรบิวทิลฟอสเฟต [16]

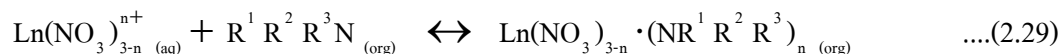


ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อน  $\text{Ln}(\text{NO}_3)_{3-n}((\text{C}_4\text{H}_9)_3\text{PO}_4)_n$  ละลายในน้ำมันเท่านั้น ทิศทางของปฏิกิริยาจะถูกกำหนดได้ด้วยสภาพความเป็นกรดของสารละลาย นั่นคือ ปฏิกิริยาข้างต้นสามารถเกิดได้ดีเมื่อสภาพความเป็นกรดน้อย แต่การมีธาตุหายากหลายชนิดรวมกันอาจมีผลต่อการสกัดโดยรวมได้

2. สารสกัดชนิดเป็นกรด ได้แก่ ออแกโนฟอสฟอริก (Organophosphoric acids) เช่น di-2-ethylhexyl phosphoric acid (DEHPA) มีสูตรโครงสร้าง คือ  $(\text{C}_8\text{H}_{17}\text{O}_2)_n\text{POOH}$  โดยจะสกัดแยกสารละลายธาตุหายากรูปของเกลือไนเตรตแสดงดังสมการที่ 2.28



3. สารสกัดชนิดเป็นด่าง ได้แก่ เอมีนและอนุพันธ์ของเกลือแอมโมเนีย เป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 8 ถึง 12 ตัว โดยสารที่ให้ผลการสกัดดีที่สุด คือสารประกอบอนุพันธ์ลำดับที่ 4 ซึ่งปฏิกิริยาเคมี เป็นดังสมการที่ 2.29



## 2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hoque M Mozammela และ คณะ [17] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์ถ่านดูดซับจากกะลามะพร้าว โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และ อัตราส่วนสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่ใช้เป็นสารกระตุ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเผาที่อุณหภูมิต่ำจะสังเคราะห์ถ่านดูดซับได้ปริมาณมากแต่ถ่านจะมีความพรุนต่ำซึ่งชี้วัดจากค่าการดูดซับไอโอดีน และที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส จะให้ถ่านดูดซับคุณภาพดีมีค่าการดูดซับไอโอดีน 964 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ถ่านดูดซับที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณน้อยกว่าเดิม เนื่องจากถ่านส่วนใหญ่เปลี่ยนสภาพเป็นขี้เถ้า จากการเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผาพบว่ากะลามะพร้าวจะเปลี่ยนเป็นถ่านอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และในการแช่ถ่านด้วยซิงค์คลอไรด์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าสังเคราะห์ถ่านดูดซับได้ปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงของความเข้มข้นซิงค์คลอไรด์ประมาณร้อยละ 50 โดยมวล โดยสรุปสถานะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ถ่านดูดซับ คือ แช่ถ่านในสารละลายซิงค์คลอไรด์ร้อยละ 40 โดยมวลเนื่องจากผลได้ของผลิตภัณฑ์ปริมาณใกล้เคียงกัน และทำการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที ทำให้ได้ถ่านดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซจากอุตสาหกรรม

A. Hanafi [18] ได้ทำการศึกษาศึกษาการดูดซับไอออน  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Ti}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  และ  $\text{Co}^{2+}$  จากสารละลายโดยดูดซับด้วยถ่านดูดซับ 3 ชนิด โดยสองชนิดแรกสังเคราะห์ขึ้นจากเปลือกเมล็ดแอลมอลด์ คือ ชนิด A-8 (เผา 8 ชั่วโมง) และ ชนิด A-14 (เผา 14 ชั่วโมง) พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการเผาจาก 8 เป็น 14 ชั่วโมง เป็น 1150 และ 1288  $\text{m}^2/\text{g}$  ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าชนิด M โดยถ่านดูดซับชนิด A-8 และ A-14 พื้นที่ผิวมีค่าความเป็นเบส แต่ชนิด M พื้นที่ผิวมีค่าความเป็นกรด การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุลที่ 40 นาทีเป็นต้นไป จากสมดุลการดูดซับพบว่า  $\text{Cs}^+$  ถูกดูดซับได้น้อยเนื่องจากอัตราส่วนระหว่างประจุต่อรัศมีไอออนมีค่าน้อย และ  $\text{Ti}^+$  ถูกดูดซับได้ดีที่สุด อาจเนื่องมาจาก  $\text{Ti}^+$  เปลี่ยนเป็นตะกอนในสถานะดูดซับทำให้  $\text{Ti}^+$  แยกตัวออกจากสารละลายได้มาก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าถ่านดูดซับชนิด A-8 มีความสามารถในการแยก  $\text{Ti}^+$  ออกจาก  $\text{Cs}^+$  ซึ่งสามารถแยก  $\text{Ti}^+$  ออกจากสารละลายได้ 98 % เมื่อวิเคราะห์จากขนาดรูพรุนของถ่านดูดซับพบว่า ปริมาณการดูดซับ  $\text{Ti}^+$  เพิ่มขึ้นเมื่อถ่านดูดซับมีปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางเพิ่มขึ้น จากอิทธิพลของค่า pH โดยเมื่อค่า pH สูงขึ้น ถ่านดูดซับชนิด M แยก  $\text{Cs}^+$  และ  $\text{Ti}^+$  ออกจากสารละลายได้ 85%

และถ่านดูดซับชนิด A-8 และ A-14 แยก  $Cs^+$  ออกมาได้ 90% จากอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ ในช่วง 50-1000 มิลลิกรัม พบว่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านดูดซับชนิด A-8 และ A-14 และขึ้นกับชนิดไอออนที่ดูดซับ แต่ถ้าปริมาณถ่านดูดซับมากเกินไปอาจทำให้ปริมาณการดูดซับลดลง เป็นสาเหตุจากการอุดตันของถ่านดูดซับ แต่ ปริมาณการดูดซับของถ่านดูดซับชนิด M ไม่ขึ้นกับปริมาณถ่านดูดซับ จากอิทธิพลของไอออนลบที่เติมลงไปพบว่า ทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดของไอออนลบ และขนาดของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นและขนาดรูพรุนของถ่านดูดซับที่ทำการดูดซับสารเชิงซ้อน

Kardia Ramirez-Muñiz และ คณะ [19] ทำการศึกษาการดูดซับสารเชิงซ้อนของทองคำ ( $Au(CN)_2^-$ ) ด้วยถ่านดูดซับปกติ (GRC-22) และถ่านดูดซับที่พื้นผิวอิมมัลด้วยซัลเฟอร์ (SIAC 8.0) ซึ่งเตรียมจากถ่านหิน ประกอบด้วยซัลเฟอร์ 7% โดยน้ำหนัก โดยทำการดูดซับที่ pH 10.5 การดูดซับที่ผิวเกิดจากแรงไฟฟ้าสถิตของพื้นผิวดำกับไอออนเชิงซ้อนในสารละลาย การเพิ่มความเข้มข้นของทองคำจะทำให้การดูดซับเพิ่มได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงมัวร์ คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว อีกทั้งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 องศาเซลเซียส ไปยัง 35 องศาเซลเซียส ค่าปริมาณการดูดซับทองคำมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณดูดซับของถ่านดูดซับ 2 ประเภท พบว่า SIAC 8.0 สามารถดูดซับทองคำได้ดีกว่า GRC-22 โดยปริมาณการดูดซับทองคำสูงสุดเป็น 126.77 และ 56.17 mg/g ลำดับ เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนของทองคำยึดเกาะกับผิวของ SIAC 8.0 ด้วยพันธะที่แข็งแกร่งกว่า GRC-22 การคายกลับของทองคำพบว่าเมื่อปริมาณการดูดซับเป็น 48 และ 124 mg/g ปริมาณคายกลับคิดเป็น 28% และ 38% ของปริมาณการดูดซับไอออนทองคำที่ดูดซับไว้ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการดูดซับมีทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี เนื่องจากส่วนของทองคำที่เกิดพันธะกับซัลเฟอร์เป็นพันธะโควาเลนต์ของไอออนทองคำกับซัลเฟอร์ ส่วนอื่นที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์เป็นแรงทางกายภาพซึ่งเป็นส่วนที่คายกลับได้ จากการศึกษากลไกการดูดซับพบว่าขึ้นกับ ค่า pH ของสารละลาย คือ ที่ค่า pH 3.9 ค่าประจุที่พื้นผิวมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งที่ pH ที่ทำการดูดซับอยู่ที่ 10.5 ซึ่งค่าประจุที่ผิวมีค่าประมาณ -100 C/g ซึ่งออกแรงผลักกับไอออนลบของสารเชิงซ้อนของทองคำ ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนว่าการดูดซับสารเชิงซ้อนของทองคำกับซัลเฟอร์ที่ผิวของถ่านจึงเป็นการดูดซับเชิงเคมี ด้วยพันธะพันธะโควาเลนต์ (S-Au-CN)



Mohamed Kheireddine Aroua และ คณะ [20] ได้ทำการศึกษาการดูดซับโดยทำการสังเคราะห์ถ่านดูดซับจากเปลือกของผลปาล์ม แล้วทำให้พื้นผิวอิมมัวด้วย polyethyleneimine (PEI) เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับไอออนปรอท พบว่า ถ่านดูดซับที่อิมมัวด้วย PEI 16.68 และ 29.82 wt% PEI/AC มีปริมาณการดูดซับปรอทเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน 4.76 และ 8.41 wt% PEI/AC มีปริมาณการดูดซับปรอทลดลง เมื่อเทียบกับปริมาณการดูดซับเดิมของถ่านดูดซับ ที่อัตราส่วน 16.68 และ 29.82 wt% PEI/AC เกิดการเติมเต็ม PEI ภายในโพรงของถ่านดูดซับซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับปรอทยิ่งขึ้น จากแบบจำลองทางจลศาสตร์พบว่า พฤติกรรมทางการดูดซับมีความเหมาะสมกับแบบจำลอง pseudo-second-order มากกว่า pseudo-first-order และเมื่อทำการศึกษาค่าปริมาณการดูดซับและปริมาณการคายกลับ ที่ อัตราส่วน 16.68 และ 29.82 wt% PEI/AC พบว่า เกิดการคายกลับในปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณการดูดซับ จึงระบุว่าเกิดการดูดซับเชิงเคมี และกระบวนการแพร่ผ่าน เข้าไปในอนุภาคขึ้นกับกระบวนการดูดซับ ค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในห้านาทีแรก และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที โดยถ่านที่ทำให้อิมมัวด้วย PEI มีค่า pH เพิ่มขึ้นจนถึง 8.5 และคงที่ ส่วนถ่านปกติค่า pH ค่อยๆลดลงจนถึง 7.5 เนื่องจากที่  $Pb^{2+}$  เกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับไฮดรอกไซด์ ได้แก่  $Pb_4(OH)_4^{4+}$ ,  $Pb(OH)$  และ  $Pb_3(OH)_4^{2+}$

Yongsheng Zhao และ คณะ [7] ทำการศึกษาการสกัดยูเรเนียมด้วยเบนโซอิลโทโอยูเรียที่ตรึงบนผิวถ่านกัมดูดซับ (BT-AC) ซึ่งพัฒนามาจาก เบนโซอิล ไอโซโทโอไซยานาตทำปฏิกิริยา ไฮดรอกซิเลชัน และ แอมมิเนชัน ตามลำดับ ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ยูเรเนียมไอออน ที่ศึกษา คือ เวลาดูดซับ, pH ของสารละลาย, ความเข้มข้นของไอออนเริ่มต้น, ปริมาณถ่านดูดซับ และ อุณหภูมิของการดูดซับ โดยเบนโซอิลโทโอยูเรียที่ตรึงบนผิวถ่าน มีอัตราส่วน 1.2 mmol ต่อกรัมถ่าน ซึ่งจะมีซัลเฟอร์อยู่ 3.81% ของถ่านตอนเริ่ม ในการทดสอบการดูดซับยูเรเนียมไอออนบนถ่าน BT-AC ที่ค่า pH ในช่วง 1.0 - 5.0 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับยูเรเนียมไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ค่า pH ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ในการระบุปริมาณการแยก  $UO_2^{2+}$  อิทธิพลของปริมาณถ่าน BT-AC ที่ทำการทดสอบดูดซับยูเรเนียมไอออน ในกระบวนการแบบกะ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมไอออน อยู่ที่ 10 ถึง 30 mg ของปริมาณถ่าน BT-AC เมื่อเกินจาก 30 mg ปริมาณการดูดซับยูเรเนียมไอออน จะลดลงอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของแข็ง-ของเหลวที่เหมาะสม

คือ อัตราส่วน 1 ต่อ 1 จากอิทธิพลของเวลาพบว่า ปริมาณของยูเรนิลที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และมีแนวโน้มลดลงที่ละน้อย จนเข้าสู่สมดุล โดยค่าการดูดซับภายใน 5 นาทีแรก มีค่าประมาณ 90% ของปริมาณการดูดซับสูงสุด คำนวนค่าคงที่ของปฏิกิริยาการดูดซับยูเรนิลไอออน มีค่าเท่ากับ  $0.441 \text{ min}^{-1}$  ค่าพลังงานกระตุ้นคำนวณจากสมการของอาีเนียส มีค่าเท่ากับ  $8.5 \text{ kJ mol}^{-1}$  ปริมาณการดูดซับของยูเรนิลไอออนจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ โดยพฤติกรรมของการดูดซับดังกล่าว สอดคล้องกับแบบจำลองของ แลงมัวร์ และ ฟรุนดลิช ที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาณการดูดซับยูเรนิลไอออน สูงสุดอยู่ที่  $82 \text{ mg/g}$  ตามเงื่อนไขการดูดซับที่กำหนด ค่าตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ประกอบด้วย  $\Delta H^0 = -46.2 \text{ kJ/mol}$ ;  $\Delta S^0 = -98.0 \text{ J/mol K}$ ;  $\Delta G^0 = -17.5 \text{ kJ/mol}$  ซึ่งแสดงว่าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และสามารถเกิดขึ้นได้เอง

O.S. Amuda และ คณะ [21] ทำการศึกษาการดูดซับสังกะสีโดยใช้ถ่านดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านที่ทำกรปรับสภาพด้วยกรด (ACSC) , ถ่านที่ทำกรปรับสภาพด้วยไคโตซาน (CCSC) และ ถ่านที่ทำกรปรับสภาพด้วยไคโตซานและกรด (CACSC) พบว่า การดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นในช่วง pH 2-6 CACSC ดูดซับได้สูงสุด 93%, CCSC ดูดซับได้สูงสุด 55% และ ACSC ดูดซับได้สูงสุด 50% เมื่อค่า pH สูงเกิน 6 ค่าการดูดซับสังกะสีจะค่อยๆลดลง เป็นผลจากแรงประจุนประจุตัวดูดซับกับไอออนโลหะ ปริมาณตัวดูดซับ 1-30 g/L เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับพบว่า การดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่การดูดซับเพิ่มขึ้น โดย CACSC ดูดซับได้สูงสุด 50% ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับเป็น 18 g/L, CCSC ดูดซับได้สูงสุด 58% ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับเป็น 21 g/L และ ACSC ดูดซับได้สูงสุด 52% ที่ความเข้มข้นของตัวดูดซับเป็น 27 g/L การดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการดูดซับ โดย CACSC และ CCSC เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 120 นาที ดูดซับได้ 90% และ 75% ตามลำดับ และ ACSC เข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 300 นาที ดูดซับได้ 52% การดูดซับสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น จนถึงที่  $25 \text{ mg/L}$  การดูดซับสังกะสีเริ่มคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ( $k_d$ ) ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี โดยค่า  $k_d$  จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีลดลง โดย CACSC, CCSC และ ACSC สามารถดูดซับสังกะสี ได้ 97%, 89% และ 78% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น  $25 \text{ mg/L}$  ตามลำดับ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับศึกษาเฉพาะ CACSC เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุด พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคจะทำให้ปริมาณการดูด

ชั้นลดลง โดยค่าการดูดซับมากที่สุดที่ขนาด 1.00 - 1.25 mm. แบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ที่เหมาะสมกับแบบจำลองของแลงมัวร์มากกว่าของฟรุนดริช แสดงถึงพฤติกรรมของไอออนสังกะสีถูกดูดซับชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ โดยค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ ( $q_e$ ) ของ CACSC, CCSC และ ACSC มีค่า 60.4, 50.93 และ 45.14 mg/g การคายกลับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.08 – 0.10 M สามารถคายกลับสังกะสีที่ดูดซับไว้ได้สูงที่สุด

N.S. Awwad และ คณะ [22] ทำการสังเคราะห์ที่ถ่านดูดซับจากแกลบโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวช่วย โดยทำการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.125 mm. ค่า pH มีผลต่อประจุที่ผิวของถ่านดูดซับและการเป็นไอออนของสารละลาย โดยค่าปริมาตรการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH เปลี่ยนแปลงจาก pH 1-4 ซึ่งการดูดซับเกิดจากแรงทางไฟฟ้าสถิต หรือ เกิดเป็นสารเชิงซ้อน จากผลของเวลาในการดูดซับพบว่าเออร์เบียมและแลนทานัมเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ จากผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 50 ถึง 300 mg/L พบว่า ค่าปริมาณการดูดซับของแลนทานัมเปลี่ยนแปลงจาก 9.6 เป็น 57 mg/g และเออร์เบียมเปลี่ยนแปลงจาก 12.2 เป็น 72.3 mg/g นั่นคือประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนไม่มากเกินไปเกินความสามารถของพื้นที่ผิวของถ่านดูดซับที่สามารถดูดซับได้ จากแบบจำลองทางจลนศาสตร์พบว่า การดูดซับไอออนของเออร์เบียมและแลนทานัมด้วยถ่านดูดซับ เหมาะสมกับแบบจำลอง pseudo-second-order มากกว่า first-order ค่าคงที่ของการแพร่ผ่านเข้าไปในโพรงของถ่านดูดซับพบว่า ทั้งเออร์เบียมและแลนทานัม แพร่ผ่านเข้าไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและคงที่ในช่วงท้าย โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ( $k_{d1}$ ) ช่วงแรกของเออร์เบียมและแลนทานัมเป็น 3.4 และ 3.0 mg/L. min<sup>0.5</sup> ตามลำดับ และช่วงหลังค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน ( $k_{d2}$ ) ช่วงหลังของเออร์เบียมและแลนทานัมเป็น 0.0035 และ 0.003 mg/L. min<sup>0.5</sup> ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแบบจำลองการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ของเออร์เบียมและแลนทานัม ด้วยแบบจำลองของแลงมัวร์และฟรุนดริช พบว่า เนื่องจากขนาดไอออนของทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันมาก การดูดซับของทั้งเออร์เบียมและแลนทานัม จึงให้ผลใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากค่าปริมาตรการดูดซับสูงสุด อุณหภูมิระหว่างการดูดซับอยู่ในช่วง 30–60 องศาเซลเซียส โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายทำให้เกิดการแพร่เพิ่มขึ้น พบว่าการดูดซับเออร์เบียมและแลนทานัมมีปริมาตรเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ดังนั้นการดูดซับจึงขึ้นกับการแพร่ผ่านโพรงไอออน ค่าพลังงานกระตุ้นของเออร์เบียมและแลนทานัม มีค่า 3.6 kJ/mol และ 5.84 kJ/mol ตามลำดับ ค่า  $\Delta G^0$  มีค่าลบดังนั้นการดูดซับดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นเองได้ โดยค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดของ แลนทานัมและเออร์เบียม เป็น 175 และ 250 mg/g ตามลำดับ

Nafaa Adhoum และ คณะ [23] ได้ทำการศึกษาการดูดซับกรดพาทาลิก โดยถ่านดูดซับทำการดูดซับกรดพาทาลิกแบบกะที่ค่า pH 1.5, 4, 6 และ 9 พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองของแลงมัวร์ โดยการดูดซับสูงสุดที่ pH 1.5 ที่ค่าปริมาณการดูดซับเป็น 126.6 mg/g โดยปริมาณการดูดซับกรดพาทาลิกจะลดลงเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลจากแรงผลักทางไฟฟ้าที่ผิวของถ่านดูดซับกับประจุลบในสารละลาย และทดสอบการปรับสภาพผิวถ่านดูดซับด้วยทองแดงและเตตระบิวทิลแอมโมเนีย (TBA) โดยถ่านดูดซับสามารถดูดซับทองแดงได้ 100 mg/g และ ดูดซับ TBA ได้ 12 mg/g และถ่านดังกล่าวนำไปใช้ดูดซับพาทาลิก (phthalate) ที่ความเข้มข้น 500 mg/L ด้วยการดูดซับแบบคอลัมน์ โดยใช้ถ่านจำนวน 2.5 กรัม จากถ่านที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิวพบว่า มีค่าปริมาณการดูดซับแบบกะ 92 mg/g ค่าปริมาณการดูดซับแบบคอลัมน์ 55 mg/g ซึ่งพบว่าแบบคอลัมน์ ดูดซับได้น้อยกว่าแบบกะ ถ่านที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยทองแดง และ TBA พบว่าสามารถดูดซับพาทาลิกแบบคอลัมน์ ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 117 mg/g (2.12 เท่า) และ 92 mg/g (1.67 เท่า) ตามลำดับ จากการดูดซับแบบคอลัมน์สามารถดูดซับพาทาลิกได้ 98% จากสารละลาย ที่ปริมาตร 320 ml และ 240 ml ตามลำดับ

### บทที่ 3

#### การดำเนินการทดลอง

การดำเนินงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรต [Ln(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>] โดยใช้ถ่าน กัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ศึกษาสมมูลดูดซับและสมมูลการคายกลับของแลนทาไนด์ในเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต และ การนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

- 3.1 สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์
  - 3.1.1 สารละลายเกลือแลนทาไนด์ในเตรต จาก ศูนย์วิจัยพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
  - 3.1.2 ไตรบิวทิลฟอสเฟต (Tri-n-butyl phosphate)
  - 3.1.3 กรดไนตริกเจือจาง 0.05 โมลาร์
  - 3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลาย (ICP-OES)
  - 3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์พื้นผิว (BET)
  - 3.1.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- 3.2 ศึกษาปริมาณการดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว
  - 3.2.1 ตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิว (BET)
  - 3.2.2 นำถ่านกัมมันต์ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตโดยแช่ถ่านกัมมันต์ลงในไทรบิวทิลฟอสเฟต ที่อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อไทรบิวทิลฟอสเฟต เป็น 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก ทิ้งให้เกิดการดูดซับเป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากไทรบิวทิลฟอสเฟต
  - 3.2.3 นำถ่านกัมมันต์ในข้อ 3.2.3 ผสมกับกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ที่อัตราส่วนถ่านกัมมันต์ต่อกรดไนตริก เป็น 1 ต่อ 5 โดยน้ำหนัก ทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และ ทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากสารละลายกรดไนตริก
  - 3.2.4 นำถ่านกัมมันต์ในข้อ 3.2.4 ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
  - 3.2.5 นำถ่านกัมมันต์ในข้อ 3.2.5 ไปชั่งน้ำหนัก พร้อมทั้งหาคำนวณปริมาณการดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์
  - 3.2.6 ตรวจสอบลักษณะทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

- 3.3 ศึกษาสมมูลดูดซับและคายกลับแลนทาไนด์ในเตรตด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต
- 3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของเวลาการดูดซับต่อสมมูลดูดซับ
- 3.3.1.1 นำสารละลายแลนทาไนด์ในเตรตมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนสารละลายแลนทาไนด์ในเตรตเข้มข้นต่อน้ำกลั่นเป็น 1 ต่อ 10 ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 60 กรัมต่อลิตร
- 3.3.1.2 ทำการวัดและปรับค่า pH ด้วยกรดไนตริกให้สารละลายมีค่า pH ไม่เกิน 3
- 3.3.1.3 ตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุแต่ละตัวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy)
- 3.3.1.4 เติมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรต ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต ที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรต ร้อยละ 10 และทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลาย
- 3.3.1.5 นำสารละลายที่ผ่านการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรตจากหัวข้อ 3.3.1.4 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่เหลือจากการดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.1.6 เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านดูดซับที่ผ่านการดูดซับจากหัวข้อ 3.3.1.4
- 3.3.1.7 ทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลายกรดไนตริก จากนั้นทำซ้ำกัน 6 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
- 3.3.1.8 นำสารละลายที่ผ่านการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรตจากหัวข้อ 3.3.1.7 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่ถ่านดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.1.9 ทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.3.1.4 ถึง หัวข้อ 3.3.1.8 โดยเปลี่ยนเวลาที่ถ่านกัมมันต์ใช้ในการดูดซับเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ

### 3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อสมมูลดูดซับ

- 3.3.2.1 นำสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรดเข้มข้นต่อน้ำกลั่นเป็น 1 ต่อ 10 ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 60 กรัมต่อลิตร
- 3.3.2.2 ทำการวัดและปรับค่า pH ด้วยกรดไนตริกให้สารละลายมีค่า pH ไม่เกิน 3
- 3.3.2.3 ตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุแต่ละตัวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy)
- 3.3.2.4 เติมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อ สารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 5 และ ทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่อง เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการ แยกถ่านดูดซับออกจากสารละลาย
- 3.3.2.5 นำสารละลายที่ผ่านการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดจากหัวข้อ 3.3.2.4 ไป วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่เหลือจาก การดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.2.6 เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูป กรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านดูดซับที่ผ่านการดูดซับจากหัวข้อ 3.3.2.4
- 3.3.2.7 ทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลายกรดไนตริก จากนั้นทำซ้ำกัน 6 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
- 3.3.2.8 นำสารละลายที่ผ่านการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรดจากหัวข้อ 3.3.1.7 ไป วิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่ถ่านดูดซับ ได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.2.9 ทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.3.2.4 ถึง หัวข้อ 3.3.2.8 โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของ ถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 10, 15, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ



### 3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อสมดุลดูดซับ

- 3.3.3.1 นำสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน สารละลายแลนทาไนด์ในเตรดเข้มข้นต่อน้ำกลั่นเป็น 0.5 ต่อ 10 ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 30 กรัมต่อลิตร
- 3.3.3.2 ทำการวัดและปรับค่า pH ด้วยกรดไนตริกให้สารละลายมีค่า pH ไม่เกิน 3
- 3.3.3.3 ตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุแต่ละตัวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy)
- 3.3.3.4 เติมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต ที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 10 และทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลาย
- 3.3.3.5 นำสารละลายที่ผ่านการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดจากหัวข้อ 3.3.3.4 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่เหลือจากการดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.3.6 เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านดูดซับที่ผ่านการดูดซับจากหัวข้อ 3.3.3.4
- 3.3.3.7 ทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลายกรดไนตริกจากนั้นทำซ้ำกัน 6 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
- 3.3.3.8 นำสารละลายที่ผ่านการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรดจากหัวข้อ 3.3.3.7 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่ถ่านดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.3.9 ทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.3.3.4 ถึง หัวข้อ 3.3.3.8 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 30, 120, 240, 360, 480 และ 600 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

### 3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของวัฏจักรการดูดซับ

- 3.3.4.1 นำสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดเข้มข้นต่อน้ำกลั่นเป็น 1 ต่อ 10 ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 60 กรัมต่อลิตร
- 3.3.4.2 ทำการวัดและปรับค่า pH ด้วยกรดไนตริกให้สารละลายมีค่า pH ไม่เกิน 3
- 3.3.4.3 ตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของธาตุแต่ละตัวด้วยเครื่อง ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy)
- 3.3.4.4 เติมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต ที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด ร้อยละ 10 และทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลาย
- 3.3.4.5 เติมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 30 ml. ลงในขวดรูปกรวย พร้อมทั้งใส่ถ่านดูดซับที่ผ่านการดูดซับจากหัวข้อ 3.3.4.4
- 3.3.4.6 ทำการเขย่าของผสมด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบตามเวลาทำการแยกถ่านดูดซับออกจากสารละลายกรดไนตริก จากนั้นทำซ้ำกัน 6 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
- 3.3.4.7 นำสารละลายที่ผ่านการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรดจากหัวข้อ 3.3.4.6 ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP-OES เพื่อตรวจสอบความเข้มข้นของธาตุที่ถ่านดูดซับได้แต่ละตัว พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.3.4.8 ทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.3.4.4 ถึง หัวข้อ 3.3.4.7 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชุดเดิมทำการทดลองซ้ำกันเหมือนเดิมทุกประการ เป็นจำนวน 10 รอบวัฏจักร

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้นำสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 600 กรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในกระบวนการแยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต โดยทำการศึกษาสมดุลดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตและสมดุลการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดออกจากถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดไว้ โดยการตรวจสอบด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) ตลอดจนศึกษาวัฏจักรการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตที่นำกลับมาใช้ใหม่

สำหรับตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลดูดซับและสมดุลการคายกลับ, ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต, ความเข้มข้นเริ่มต้นเกลือแลนทาไนด์ในเตรด ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละขั้นตอนได้แสดงรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ศึกษาปริมาณการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว

##### 4.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว

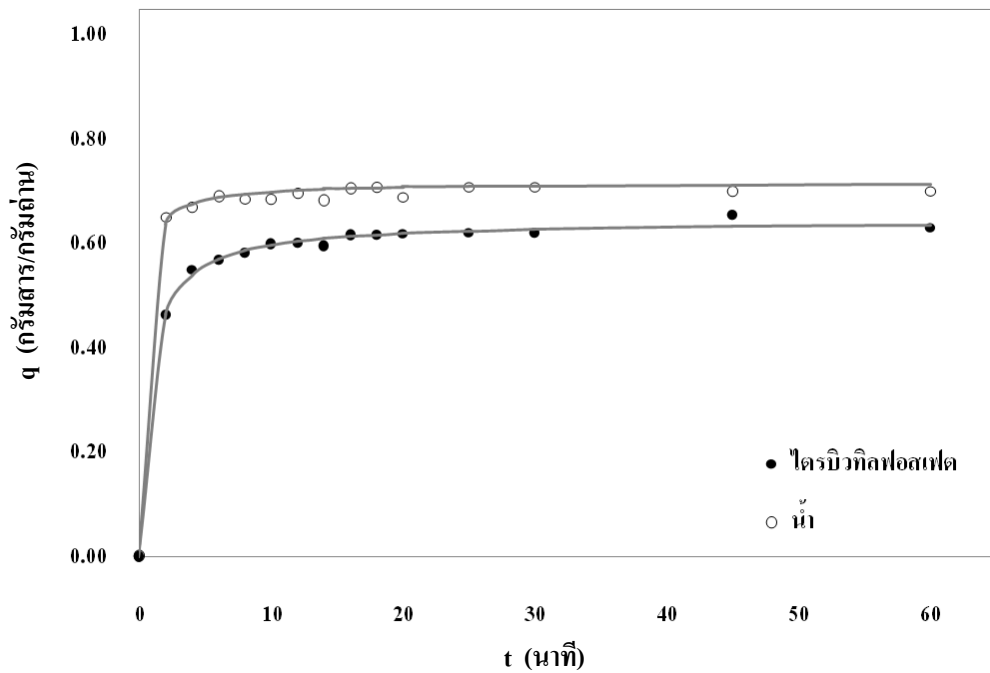
ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว มีลักษณะเป็นเม็ด โดยคุณสมบัติพื้นฐานถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ การกระจายตัวของเม็ดถ่าน, พื้นที่ผิวจำเพาะ, ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ, ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าว

การกระจายตัวของเม็ดถ่าน		
- มากกว่า 4.75 มิลลิเมตร	ร้อยละ 5	
- 4.75 - 2.35 มิลลิเมตร	ร้อยละ 90	
- น้อยกว่า 2.35 มิลลิเมตร	ร้อยละ 5	
พื้นที่ผิวจำเพาะ	1154.6	ตารางเมตร/กรัม
ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ	0.5196	ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย	2.5763	นาโนเมตร
ค่าความหนาแน่น	1.3	กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับไตริวทิลฟอสเฟตจำเพาะของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไตริวทิลฟอสเฟตและน้ำเข้าสู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ได้ด้วยแรงแคปิลารีเป็นผลทำให้ปริมาณการดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่วัดได้เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับจำเพาะของไตริวทิลฟอสเฟตและน้ำเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาการดูดซับ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 โดยปริมาณการดูดซับไตริวทิลฟอสเฟตจำเพาะจะเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และจะเริ่มคงที่หลังจากเวลาการดูดซับผ่านไป แล้ว 20 นาที แต่ปริมาณการดูดซับน้ำจำเพาะเริ่มคงที่ในช่วง 10 นาทีแรก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความหนืดของของเหลว เนื่องจากน้ำมีความหนืดอยู่ที่ 1.00 มิลลิปาสคาลวินาที (20 องศาเซลเซียส) แต่ไตริวทิลฟอสเฟตมีความหนืดอยู่ที่ 3.80 มิลลิปาสคาลวินาที (20 องศาเซลเซียส) เป็นผลทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารทั้งสองได้ในปริมาณต่างกันที่ระยะเวลาเท่ากัน

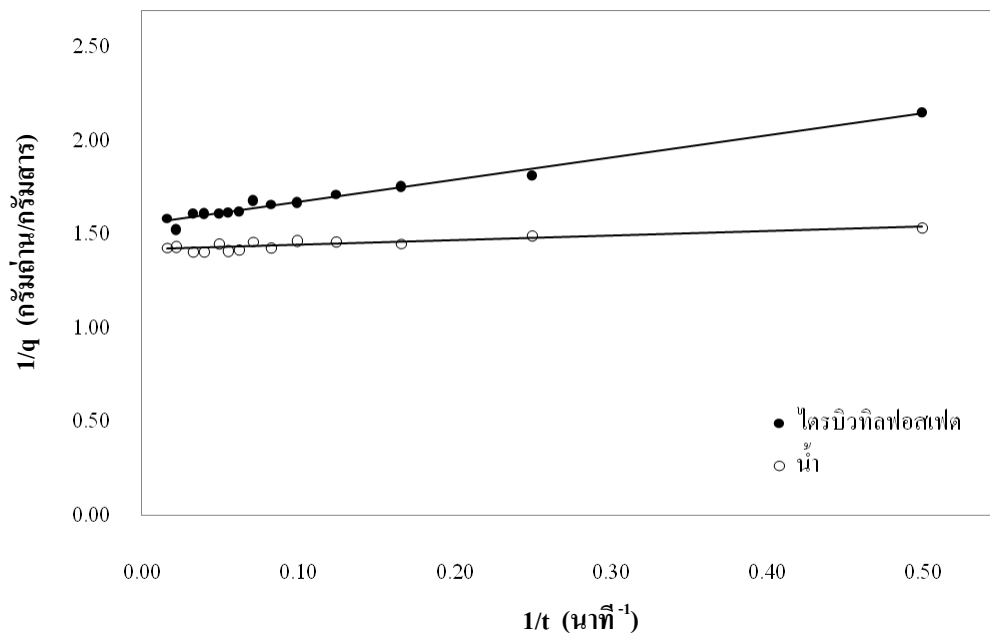


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับกับปริมาณการดูดซับจำเพาะของไตรบิวทิลฟอสเฟตและน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 พบว่าสอดคล้องตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งตามสมการที่ 2.8 ซึ่งอธิบายได้เป็นสมการเส้นตรง จากสมการที่ 4.1 สามารถหาค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุล ( $q_e$ ) ค่าคงที่ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับลำดับที่หนึ่ง ( $k_1$ ) ของไตรบิวทิลฟอสเฟตและน้ำ ความหนาแน่นของสารถูกดูดซับ ( $\rho$ ) และปริมาตรของรูพรุน ( $V_p$ ) ที่คำนวณได้จากปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลตามสมการที่ 4.2

$$\frac{q}{q_e} = \frac{k_1 \cdot t}{1 + k_1 \cdot t} \quad \dots(4.1)$$

$$V_p = \frac{q_e}{\rho} \quad \dots(4.2)$$



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของเวลาการดูดซับกับส่วนกลับของปริมาณการดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตและน้ำ ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส

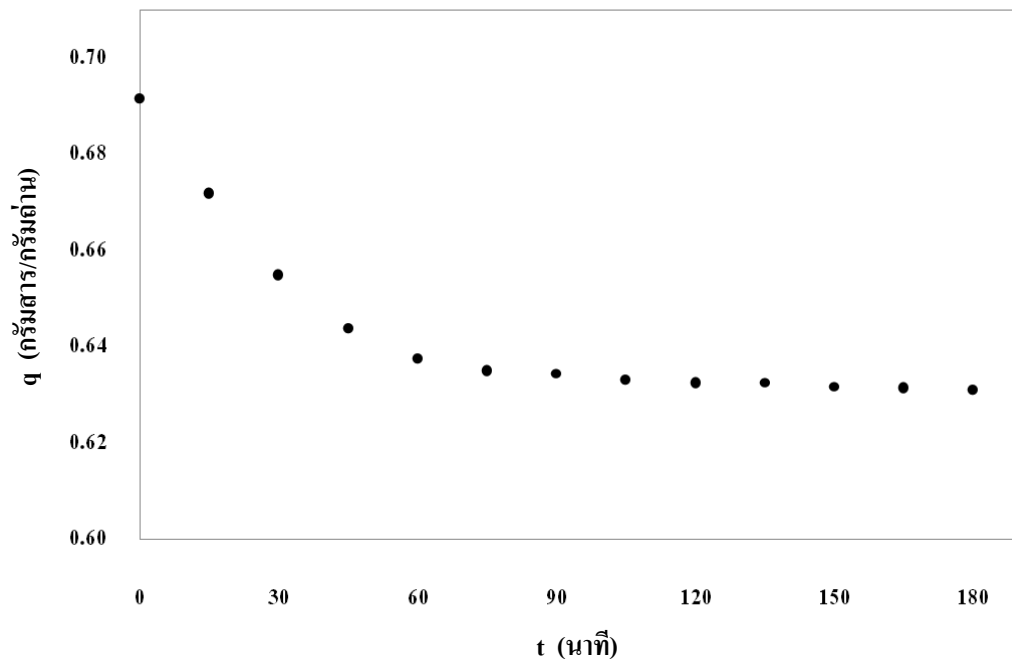
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์ดูดซับอันดับหนึ่ง

สารถูกดูดซับ	$q_c$	$k_1$	$R^2$	$V_p$
ไตรบิวทิลฟอสเฟต*	0.6425	1.3196	0.9779	0.6583
น้ำ**	0.7044	5.6200	0.8049	0.7004

\* ความหนาแน่นของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.9760 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

\*\* ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.00527 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

โดยถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยใช้เวลาในการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต 60 นาที เพื่อให้ใกล้เคียงกับปริมาณการดูดซับจำเพาะสูงสุด จากนั้นนำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยกรดไนตริกเจือจาง 0.05 โมลลาร์ เพื่อเป็นการชะล้างไตรบิวทิลฟอสเฟตส่วนเกินออกไปให้เหลือไว้แต่เพียงไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์เท่านั้น

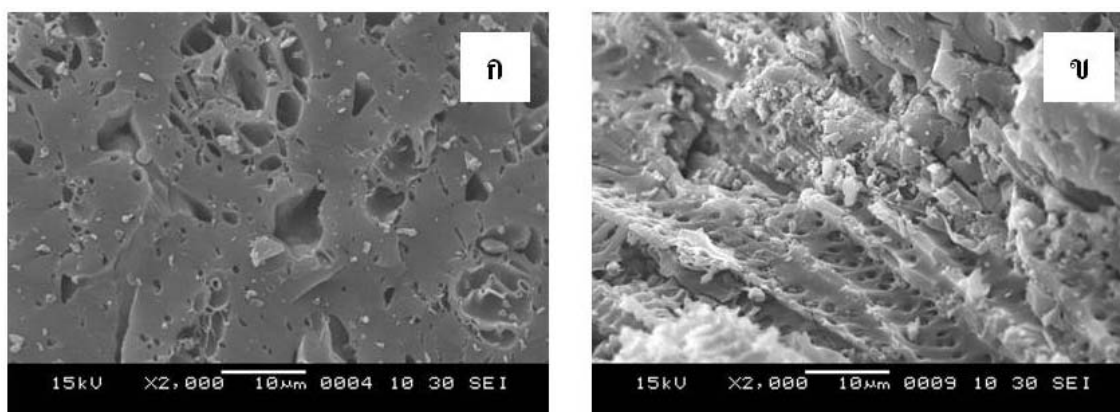


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสกับปริมาณดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อนำถ่านกัมมันต์ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพื่อทำการระเหยของเหลวส่วนที่เป็นน้ำออกไปโดยค่าปริมาณดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาการอบ โดยค่าปริมาณดูดซับจำเพาะจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก อธิบายว่าช่วง 60 นาทีแรก การลดลงของปริมาณดูดซับจำเพาะเกิดจากของเหลวที่ระเหยออกไปเป็นส่วนใหญ่เป็นน้ำ เนื่องจากไตรบิวทิลฟอสเฟตเป็นสารที่ระเหยได้ยากเพราะมีจุดเดือดสูงอยู่ที่ 289 องศาเซลเซียส และหลังจาก 60 นาทีเป็นต้นมา การลดลงของปริมาณดูดซับจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก อธิบายว่าการลดลงของปริมาณดูดซับจำเพาะเกิดจากของเหลวส่วนใหญ่ที่ระเหยเป็นไตรบิวทิลฟอสเฟตซึ่งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สารมีอัตราการระเหยต่ำเมื่อเทียบกับน้ำในปริมาตรที่เท่ากันและไตรบิวทิลฟอสเฟตถูกดูดซับอยู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์จึงต้องใช้พลังงานมากกว่าปกติในการระเหยไตรบิวทิลฟอสเฟตออกจากโพรงของถ่านกัมมันต์

#### 4.1.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

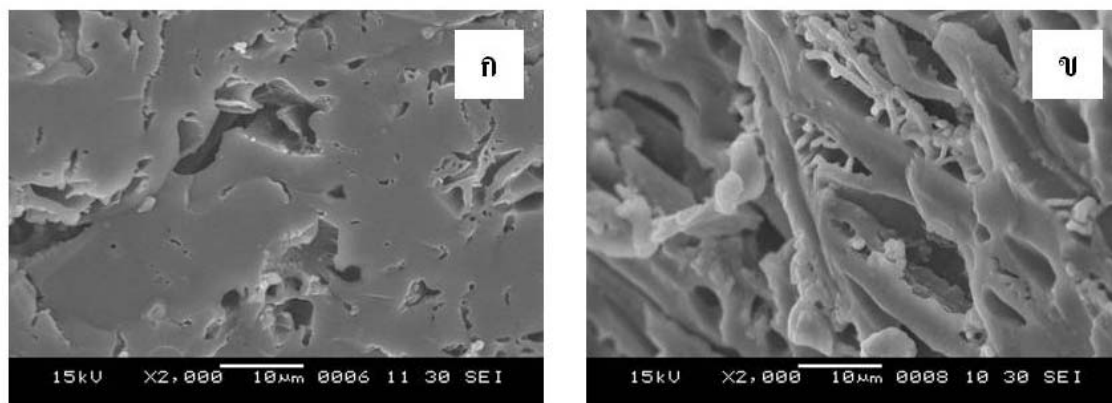
เมื่อถ่านกัมมันต์ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตเข้าไปภายในโพรงมีผลทำให้คุณสมบัติทางพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เปลี่ยนไป จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 2000 เท่าจากขนาดปกติ พบว่าถ่านกัมมันต์มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5



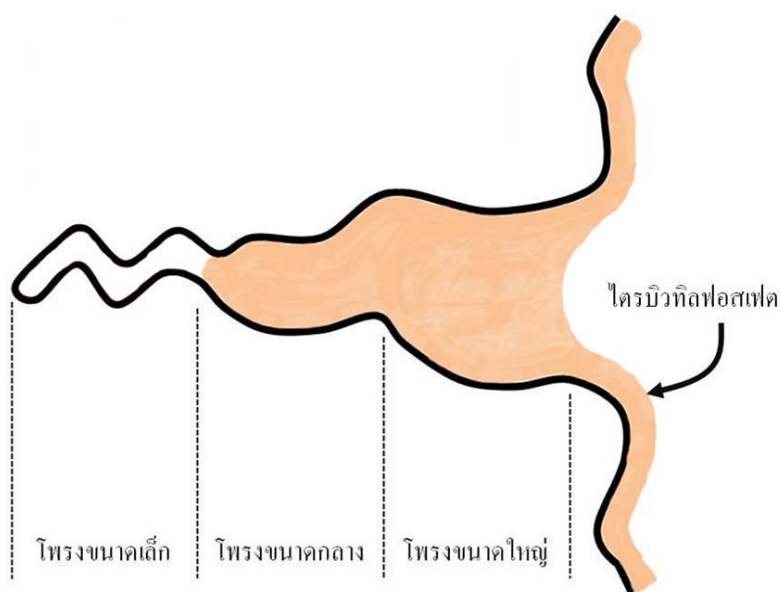
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวก่อนผ่านการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต (ก) ผิวรอบนอกของถ่านกัมมันต์ (ข) โพรงของถ่านกัมมันต์

จากการเปรียบเทียบรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 พบว่าผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีลักษณะพื้นผิวเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟสไว้ที่ผิวรอบนอกและภายในโพรง อีกทั้งรูพรุนภายนอกและภายในโพรงบางส่วนซึ่งตรวจพบ ในรูปภาพที่ 4.4 มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับรูปภาพที่ 4.5 ซึ่งเกิดจากไตรบิวทิลฟอสเฟตเข้าไปแทรกตัวระหว่างอยู่โพรงเหล่านั้น จึงทำให้ความพรุนของผิวรอบนอกและภายใน โพรงที่สังเกตได้มีปริมาณลดลง ซึ่งภาพจำลองที่แสดงการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตของถ่านกัมมันต์ตามขนาดโพรงเล็กและโพรงใหญ่ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.6





รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวเมื่อผ่านการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต (ก) ผิวรอบนอกของด้านกัมมันต์ (ข) โพรงของด้านกัมมันต์



รูปที่ 4.6 ความลักษณะของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับภายในด้านกัมมันต์ที่โพรงขนาดเล็ก ขนาดกลาง ขนาดใหญ่และบริเวณพื้นผิวรอบนอก

## 4.2 การวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรคจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

### 4.2.1 การเตรียมสารละลายแลนทาไนด์ในเตรคเริ่มต้น

จากการนำสารละลายเกลือแลนทาไนด์ในเตรคเข้มข้นมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่อัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 20, 40, 60, 80 โดยปริมาตร และไม่เจือจาง จากนั้นนำไปตรวจวัดค่าความเข้มข้นด้วยเทคนิค ICP-OES พบว่าสารละลายเกลือแลนทาไนด์ในเตรคประกอบด้วยเกลือในเตรคของแลนทาไนด์จำนวน 8 ธาตุ ได้แก่ แลนทานัม, นีโอดีเมียม, เพอร์ซีโอดีเมียม, ซาแมเรียม, แกโดลิเนียม, ดิสโพรเซียม, ยูโรเพียม และ เกลือของทราเชนซ์จำนวน 1 ธาตุ ได้แก่ อิตเทรียม โดยปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเกลือแลนทาไนด์ในเตรคเริ่มต้นแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งจากตารางพบว่ามีปริมาณของ แลนทานัมและนีโอดีเมียม มากที่สุด ประมาณร้อยละ 60 และ 30 ของปริมาณเกลือในสารละลายทั้งหมดตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.4

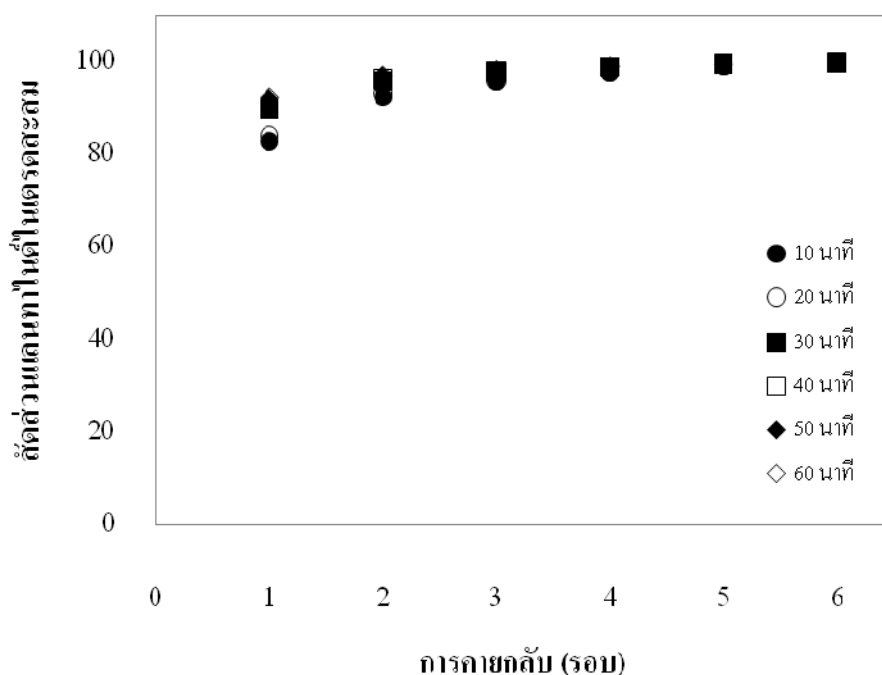
### ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดในสารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวม

เกลือ ในเตรค	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรค (กรัม/ลิตร)						
	La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	17.60	36.98	71.46	138.82	199.30	266.82
Nd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	8.05	16.00	34.00	66.05	94.72	127.14	159.97
Pr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	1.17	2.74	5.60	11.12	16.08	21.77	27.54
Sm(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.85	2.01	4.15	8.22	11.79	16.11	20.10
Y(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.42	1.47	2.75	5.80	8.46	11.60	14.69
Gd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.16	1.07	1.98	4.26	6.21	8.54	10.74
Dy(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.05	0.10	0.14	0.17	0.42	0.77	1.02
Eu(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	0.18
ความเข้มข้นรวม	28.29	60.39	120.10	234.47	337.03	452.82	569.95



#### 4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของเวลาการดูดซับ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตที่เวลาการดูดซับต่างกันตั้งแต่ 10 นาที จนถึง 60 นาที จากนั้นทำการคายเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ถูกดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง พบว่าปริมาณเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ได้จากการคายกลับแต่ละรอบมีปริมาณต่างกัน ซึ่งในการคายกลับแต่ละรอบสามารถนำมาหาค่าสัดส่วนการคายกลับสะสมได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7 และจะพบว่าตั้งแต่เวลาดูดซับ 10 นาที ถึง 60 นาที ให้ผลการคายกลับแต่ละรอบใกล้เคียงกันตลอด 6 รอบ โดยค่าปริมาณการคายกลับของแต่ละรอบ แสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของแลนทาไนด์ในเตรดสะสมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นของเกลือแวนทาไนต์ในเตรคในสารละลายแวนทาไนต์ในเตรค  
รวมที่คายกลับแต่ละรอบของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

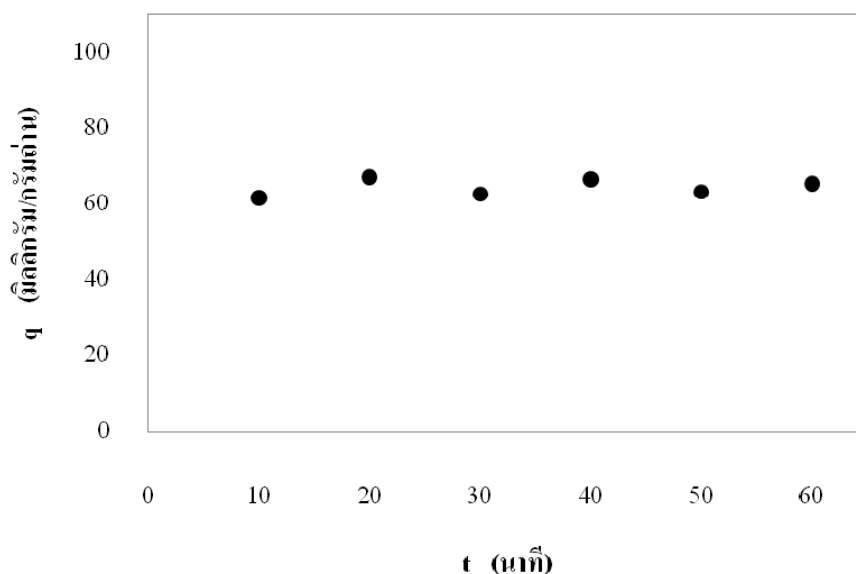
การคายกลับ (รอบ)	ความเข้มข้นเกลือแวนทาไนต์ในเตรคที่คายกลับ (มิลลิกรัม/ลิตร)					
	10	20	30	40	50	60
1	245.72	268.22	272.29	287.83	276.12	288.27
2	28.19	29.40	18.65	19.77	15.01	14.48
3	9.90	9.00	5.68	5.31	3.53	3.74
4	6.13	6.31	3.39	3.32	2.23	2.41
5	3.91	3.65	2.09	1.86	1.39	1.53
6	2.40	2.39	1.14	1.21	1.11	1.00

ตารางที่ 4.6 สัดส่วนการคายกลับเกลือแวนทาไนต์ในเตรคเฉลี่ยของแต่ละรอบการคายกลับ  
ของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

การคายกลับ (รอบ)	สัดส่วนโดยเฉลี่ย	สัดส่วนโดยเฉลี่ยสะสม
1	88.60	88.60
2	6.80	95.39
3	2.02	97.42
4	1.29	98.71
5	0.79	99.50
6	0.50	100.00

จากตารางที่ 4.6 พบว่าการคายกลับรอบแรกสามารถนำเกลือแลนทาไนด์ในเตรคกลับมาได้ถึงร้อยละ 88.60 ของปริมาณที่คายกลับที่ตรวจวัดได้ทั้งหมด คิดเป็นปริมาณการคายกลับจำเพาะเฉลี่ยได้ 57.13 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน จากที่ถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ 64.49 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน หลังจากการคายกลับรอบที่หนึ่ง ค่าร้อยละการคายกลับจะลดลง เนื่องมาจากเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับไตรบิวทิลฟอสเฟตในส่วนโพรงที่ลึกเข้าไปจึงทำให้เกลือแลนทาไนด์ในเตรคดังกล่าวแพร่ออกมาได้ช้ากว่าส่วนที่ถูกดูดซับอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากภายในโพรงถ่านกัมมันต์โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ได้ยากจึงอาจทำให้เกิดจากสะสมของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคภายในโพรงถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรคด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตที่เวลาการดูดซับต่างกันตั้งแต่ 10 นาที จนถึง 60 นาที จากนั้นทำการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรคที่ถูกดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ พบว่าค่าปริมาณการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรคของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มคงที่ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการดูดซับกับปริมาณการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรคจำเพาะของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

กล่าวคือ เมื่อเพิ่มเวลาการดูดซับขึ้นมากกว่า 10 นาที ไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณดูดซับจำเพาะของเกลือแลนทาไนด์ในเตรด แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 10 นาที ซึ่งกล่าวได้ว่าการที่ปฏิกิริยาการดูดซับเข้าสู่สมดุลดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการศึกษาการสกัดแบบของเหลวของสารละลายเกลือแลนทาไนด์ในเตรดโดยใช้ไตรบิวทิลฟอสเฟตเป็นสารสกัด พบว่า เวลาการเข้าสู่สมดุลการสกัดและเวลาการเข้าสู่สมดุลการสกัดกลับใช้เวลาไม่เกิน 1 นาที [24] โดยค่าปริมาณการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดจำเพาะแต่ละชนิดที่เวลาการดูดซับต่างกันตั้งแต่ 10 นาที ถึง 60 นาที แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดที่ได้จากการคายกลับทั้งหมดนั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณการดูดซับจำเพาะมีค่าเท่ากับ 64.49 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน

ตารางที่ 4.7 ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดรวมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

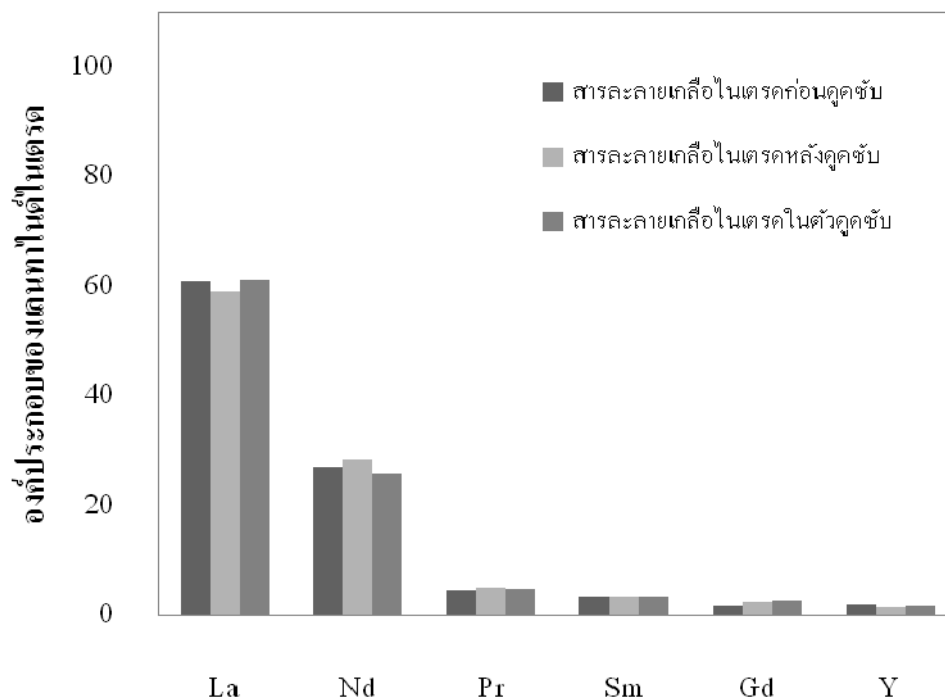
เวลาการดูดซับ (นาที)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	$q_T$ (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
10	38.30	15.33	3.17	2.09	1.67	1.02	0.12	0.03	61.73
20	41.35	17.34	3.10	2.31	1.80	1.13	0.14	0.04	67.20
30	38.00	16.53	3.03	2.15	1.70	1.06	0.14	0.04	62.65
40	40.69	17.23	3.11	2.36	1.87	1.16	0.15	0.04	66.61
50	38.19	16.80	3.03	2.19	1.76	1.09	0.14	0.04	63.25
60	40.02	16.92	3.00	2.36	1.85	1.15	0.15	0.04	65.48
$\bar{X}$	39.42	16.69	3.07	2.24	1.77	1.10	0.14	0.04	64.49
S.D.	1.45	0.73	0.06	0.11	0.08	0.05	0.01	0.00	2.25
C.V.	0.037	0.044	0.020	0.051	0.046	0.048	0.076	0.099	0.035

จากตารางที่ 4.8 พบว่าองค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคชนิดเดียวกันมีปริมาณใกล้เคียงกันเนื่องจาก คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตมีประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างคงที่ กล่าวคือองค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละตัวที่ได้จากการคายกลับมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับต่ำ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของสารละลายเกลือในเตรคก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และ ในตัวดูดซับ พบว่ามีความสัมพันธ์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าองค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบของสารละลายเกลือในเตรคก่อนดูดซับ เนื่องจากธาตุกลุ่มแลนทาไนด์มีขนาดอนุภาคและสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันจึงทำให้แยกออกจากกันเป็นธาตุอิสระได้ยาก จึงกล่าวได้ว่า การแยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรคด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตไม่สามารถคัดแยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดออกจากกันได้

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์  
ในเตรครวมของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

เวลาการดูดซับ (นาที)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	ร้อยละสุทธิ
10	62.04	24.84	5.13	3.38	2.70	1.66	0.20	0.05	100.00
20	61.54	25.80	4.61	3.44	2.68	1.68	0.20	0.06	100.00
30	60.65	26.38	4.84	3.44	2.71	1.70	0.22	0.07	100.00
40	61.09	25.87	4.66	3.54	2.81	1.74	0.22	0.06	100.00
50	60.38	26.56	4.80	3.47	2.78	1.73	0.23	0.07	100.00
60	61.11	25.83	4.58	3.60	2.83	1.75	0.23	0.06	100.00
$\bar{X}$	61.13	25.88	4.77	3.48	2.75	1.71	0.22	0.06	100.00
S.D.	0.60	0.60	0.20	0.08	0.06	0.04	0.01	0.01	0.00
C.V.	0.010	0.023	0.043	0.023	0.023	0.022	0.065	0.095	-

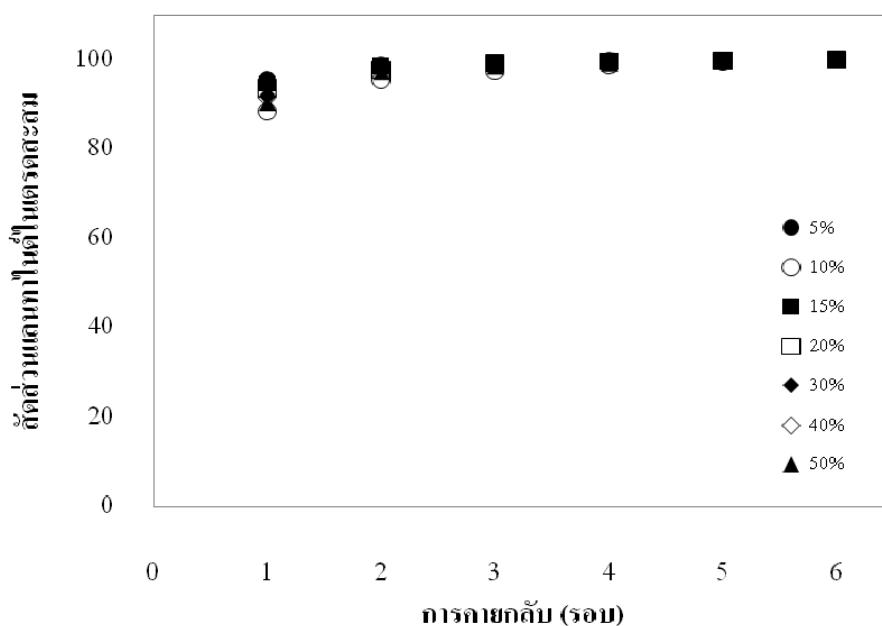




รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ในไตรต์ระหว่างสารละลายแลนทาไนด์ไนเตรดก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และ ในตัวดูดซับของการดูดซับ 10 ถึง 60 นาที

#### 4.2.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นทำการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ถูกดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง พบว่าปริมาณเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ได้จากการคายกลับแต่ละรอบมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายกรดไนตริกเจือจางได้ในอัตราที่ต่างกัน ซึ่งในการคายกลับแต่ละรอบสามารถนำมาหาค่าสัดส่วนการคายกลับสะสมได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10 และจะพบว่าตั้งแต่ที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรให้ผลการคายกลับแต่ละรอบใกล้เคียงกันตลอด 6 รอบการคายกลับ โดยค่าปริมาณการคายกลับของแต่ละรอบ แสดงดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของแลนทาไนด์ในเตรดสะสมของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร

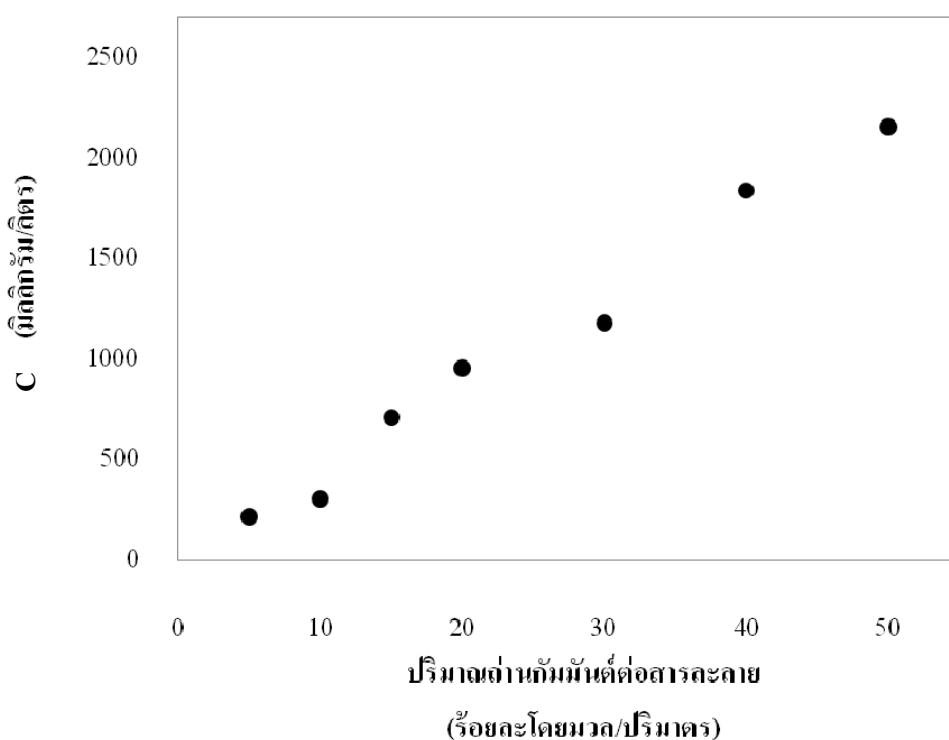
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของเกลือแวนทาไนต์ในเตรคในสารละลายแวนทาไนต์ในเตรครวมที่คายกลับแต่ละรอบของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

การคายกลับ (รอบ)	ความเข้มข้นเกลือแวนทาไนต์ในเตรคที่คายกลับ (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
1	207.18	273.08	674.05	897.95	1088.85	1685.61	1950.38
2	6.66	20.92	27.79	39.06	66.89	112.95	148.93
3	1.58	6.19	4.87	15.40	14.27	22.21	28.26
4	0.93	3.96	3.53	3.13	6.24	10.15	13.41
5	0.00	2.41	0.77	1.51	3.74	6.17	10.34
6	0.00	1.54	0.72	1.53	2.95	5.17	7.98

ตารางที่ 4.10 สัดส่วนการคายกลับเกลือแวนทาไนต์ในเตรคเฉลี่ยของแต่ละรอบการคายกลับของปริมาณถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

การคายกลับ (รอบ)	ร้อยละ โดยเฉลี่ย	ร้อยละ โดยเฉลี่ยสะสม
1	92.36	92.36
2	5.22	97.59
3	1.26	98.84
4	0.61	99.45
5	0.31	99.76
6	0.24	100.00

โดยปริมาณเกลือแลนทานาในดีในเตรคที่ได้จากการคายกลับแต่ละรอบสามารถนำมาหาค่าสัดส่วนการคายกลับได้ โดยแสดงดังตารางที่ 4.10 ซึ่งจากตารางจะพบว่า การคายกลับเกลือแลนทานาในดีในเตรครอบแรกสามารถนำเกลือแลนทานาในดีในเตรคกลับมาได้เฉลี่ยถึงร้อยละ 92.36 ของปริมาณที่คายกลับได้ทั้งหมด หลังจากการคายกลับรอบที่หนึ่ง ค่าสัดส่วนการคายกลับจะลดลง เนื่องมาจากเกลือแลนทานาในดีในเตรคแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยากับไตรบิวทิลฟอสเฟตในส่วนโพรงที่ลึกเข้าไปจึงทำให้เกลือแลนทานาในดีในเตรคดังกล่าวแพร่ออกมาได้ช้ากว่าส่วนที่ถูกดูดซับอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากภายในโพรงถ่านกัมมันต์โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ได้ยากจึงอาจทำให้เกิดจากสะสมของเกลือแลนทานาในดีในเตรคภายในโพรงถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของเกลือแลนทานาในดีในเตรคที่เวลาสมดุล

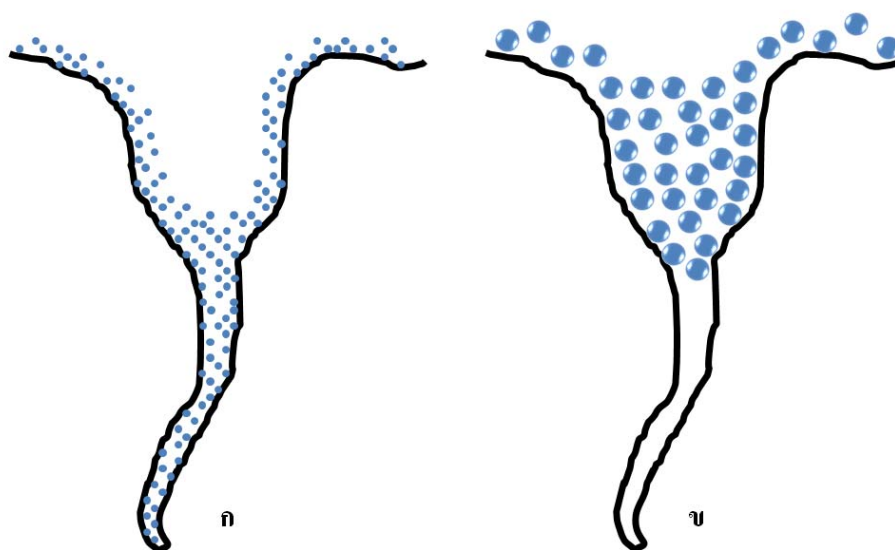
จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดต่างกัน ตั้งแต่ ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นทำการคายกลับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ถูกดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง พบว่าค่าปริมาณการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์เส้นตรง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ปริมาณดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต

น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ดูด ซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟต (กรัม)	น้ำหนัก ไตรบิวทิลฟอสเฟต (กรัม)	ปริมาตร ไตรบิวทิลฟอสเฟต* (มิลลิลิตร)	ปริมาณ การดูดซับจำเพาะ (มิลลิลิตร/กรัมถ่าน)
1.5188	2.5052	0.9864	0.9627	0.6339
3.0245	4.7994	1.7749	1.7323	0.5728
4.5162	7.0707	2.5545	2.4932	0.5521
6.0256	9.537	3.5114	3.4271	0.5688
9.0390	14.5883	5.5493	5.4161	0.5992
12.0771	18.9694	6.8923	6.7269	0.5570
15.0688	23.7092	8.6404	8.4330	0.5596
ปริมาตรการดูดซับเฉลี่ย				0.5776

\* ความหนาแน่นของไตรบิวทิลฟอสเฟต ที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.9760 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

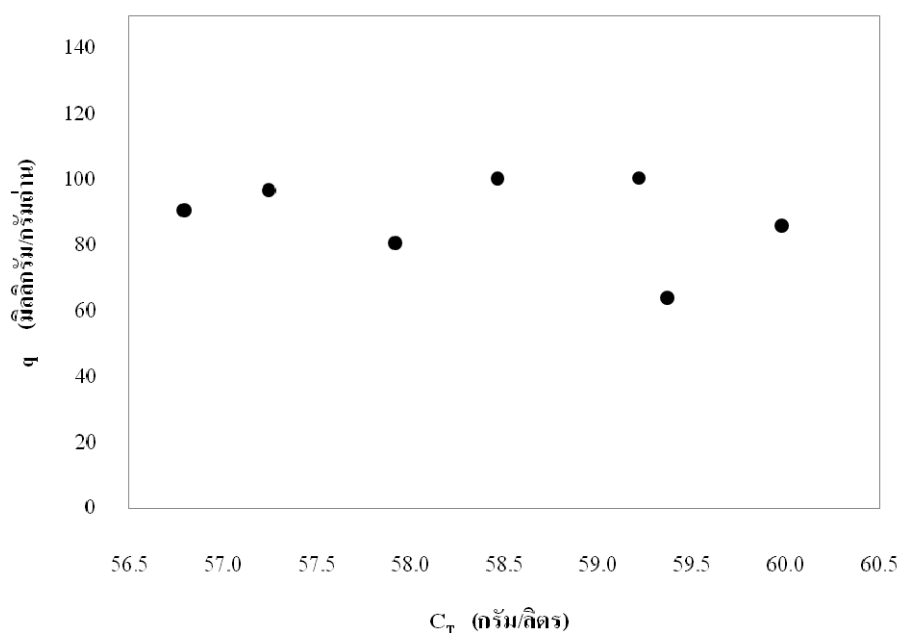
จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตในเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มปริมาณไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาเป็นไปตามสมการที่ 2.27 ดังนั้นสารเชิงซ้อนระหว่างเกลือแลนทาไนด์ในเตรดกับไตรบิวทิลฟอสเฟต จึงมีอัตราเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ใช้เกิดปฏิกิริยามีสัดส่วนน้อยกว่าปริมาณของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่มีอยู่ภายในสารละลาย แต่ระบบไม่สามารถเพิ่มถ่านกัมมันต์เข้าไปในระบบเกินกว่าร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตรได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดว่าสารละลายจะไม่ท่วมถ่านกัมมันต์ได้ทั้งหมดและระบบทำการผสมระหว่างถ่านกัมมันต์กับสารละลายไม่สมบูรณ์ จึงจำกัดปริมาณถ่านกัมมันต์มากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับก๊าซ (ก) และดูดซับของเหลว (ข) ที่ระดับโพรงขนาดใหญ่และโพรงขนาดเล็ก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับไว้ภายในถ่านกัมมันต์ แสดงดังตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ปริมาณไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ดูดซับได้เพิ่มขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต เมื่อพิจารณาผลการทดสอบหาปริมาตรรูพรุนจาก

หัวข้อ 4.1.1 พบว่ามีปริมาตร 0.5196 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม แต่ผลการทดลองการดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับได้ 0.5776 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม กล่าวคือผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5.31 ของผลการทดสอบทางพื้นผิว เนื่องจาก การวัดปริมาตรรูพรุนด้วยเครื่องตรวจวัดต้องใช้ก๊าซไนโตรเจนที่ 77 เคลวิน ซึ่งผลตรวจวัดคิดรวมปริมาตรโพรงขนาดเล็ก (ต่ำกว่า 2 นาโนเมตร) ซึ่งการวัดด้วยไตรบิวทิลฟอสเฟตซึ่งเป็นของเหลวไม่สามารถถูกดูดซับที่โพรงขนาดเล็กได้ โดยมีข้อจำกัดที่ขนาดโมเลกุลที่ต่างกันมากเมื่อเทียบกับการดูดซับด้วยก๊าซ ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับ ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับปริมาณการดูดซับจำเพาะของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับปริมาณการดูดซับจำเพาะ พบว่าค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลเพิ่มขึ้น กล่าวคือค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลดูดซับในช่วงที่ทำการศึกษาโดยค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะที่สมดุลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 88.67 มิลลิกรัม/กรัมถ่าน และมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 12.97 มิลลิกรัม/กรัม และ ค่าสัมประสิทธิ์การผันแปรอยู่ที่ 0.146 อธิบายว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณเกลือแลนทาไนด์ในเตรดที่ถูกดูดซับต่อปริมาณถ่านกัมมันต์มีอัตราส่วนที่คงที่แต่ข้อมูลมีความเบี่ยงเบนของสูงเนื่องจากสภาวะการดูดซับที่มีถ่านกัมมันต์ซ้อนทับในปริมาณที่ต่างกันทำให้การเคลื่อนที่ของสารละลายมีความอิสระในการแพร่เข้าไปในโพรงของถ่านกัมมันต์ได้ต่างกัน โดยค่าปริมาณเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดที่ได้จากการคายกลับทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดรวมของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

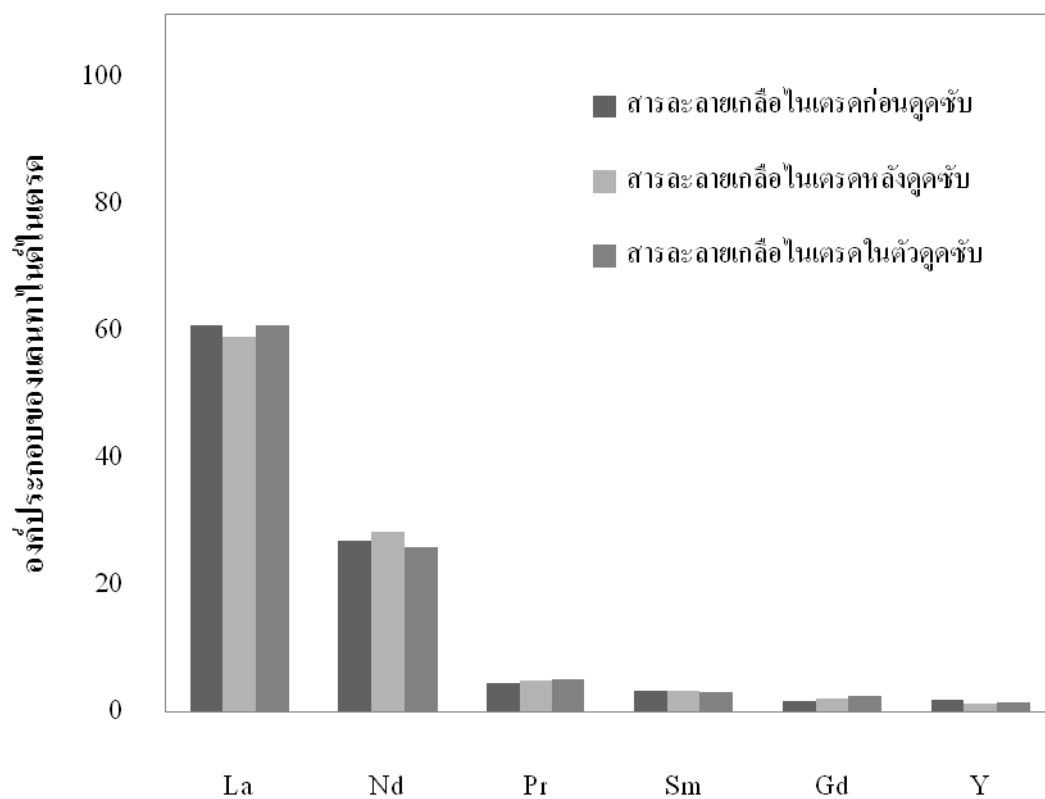
ปริมาณถ่าน (%wt/vol)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	$Q_T$ (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
5%	54.64	21.39	4.26	2.59	2.04	1.25	0.15	0.04	86.36
10%	39.42	16.69	3.07	2.24	1.77	1.10	0.14	0.04	64.49
15%	60.44	26.74	5.39	3.35	2.69	1.75	0.23	0.07	100.66
20%	61.03	25.86	5.75	3.26	2.60	1.70	0.22	0.07	100.51
30%	48.32	21.69	4.41	2.77	2.22	1.43	0.19	0.06	81.09
40%	59.64	25.05	4.96	3.08	2.48	1.62	0.22	0.07	97.12
50%	54.92	23.93	4.86	3.04	2.45	1.58	0.22	0.07	91.07
$\bar{X}$	54.06	23.05	4.67	2.90	2.32	1.49	0.20	0.06	88.76
S.D.	7.84	3.45	0.88	0.39	0.33	0.24	0.04	0.02	12.97
C.V.	0.145	0.150	0.188	0.135	0.142	0.161	0.188	0.267	0.146



ตารางที่ 4.13 ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดในสารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ปริมาณถ่าน (%wt/vol)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	ร้อยละสุทธิ
5%	63.27	24.77	4.93	3.00	2.36	1.45	0.18	0.04	100.00
10%	61.14	25.88	4.76	3.48	2.75	1.71	0.22	0.06	100.00
15%	60.04	26.56	5.36	3.33	2.67	1.74	0.23	0.07	100.00
20%	60.72	25.73	5.72	3.25	2.59	1.69	0.22	0.07	100.00
30%	59.59	26.75	5.44	3.41	2.73	1.76	0.24	0.08	100.00
40%	61.41	25.79	5.11	3.17	2.55	1.67	0.23	0.07	100.00
50%	60.31	26.27	5.34	3.33	2.69	1.74	0.24	0.08	100.00
$\bar{X}$	60.92	25.97	5.24	3.28	2.62	1.68	0.22	0.07	100.00
S.D.	1.21	0.66	0.33	0.16	0.14	0.10	0.02	0.01	0.00
C.V.	0.020	0.025	0.062	0.049	0.052	0.062	0.095	0.189	-

จากตารางที่ 4.13 พบว่าร้อยละของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดไม่เปลี่ยนแปลงกล่าวคือ คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต มีประสิทธิภาพในการดูดซับค่อนข้างคงที่ สัดส่วนของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละตัวที่ได้จากการคายกลับมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับต่ำแสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวต่ำหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของสารละลายเกลือไนเตรคก่อนดูดซับ หลังดูดซับ และ ในตัวดูดซับ พบว่าได้ความสัมพันธ์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัดส่วนของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละตัวไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของสารละลายเกลือไนเตรคก่อนดูดซับ เนื่องจากธาตุกลุ่มแลนทาไนด์มีขนาดอนุภาคและสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันจึงทำให้แยกออกจากกันเป็นธาตุอิสระได้ยาก จึงกล่าวได้ว่าการแยกแลนทาไนด์ในเตรคด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตไม่สามารถคัดแยกแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดออกจากกันได้

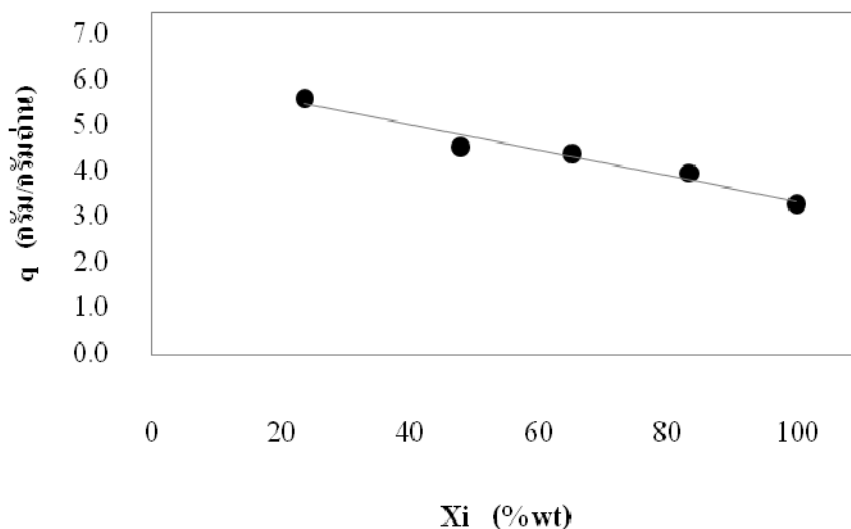


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ในแร่ระหว่างสารละลายแลนทาไนด์ในแร่ก่อนสุดสุด หลังสุดสุด และ ในตัวสุดสุดของปริมาณถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบการแยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยการสกัดด้วยของเหลว และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต

การเปรียบเทียบการแยกแลนทาไนด์ในเตรด	สัญลักษณ์	การสกัดด้วยตัวทำละลายเหลว [24]					การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต
สัดส่วนTBP ในน้ำมันก๊าด (%vol)		20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	-
น้ำหนักสารสกัดผสม (g)		12.36	12.24	13.47	14.06	14.64	4.8239
ปริมาตร TBP (ml)		3.00	6.00	9.00	12.00	15.00	-
น้ำหนัก TBP (g)		2.93	5.86	8.78	11.71	14.64	1.75
สัดส่วนTBP ในน้ำมันก๊าด (%wt)	Xi	23.69	47.84	65.21	83.33	100.00	36.32
ความเข้มข้นเริ่มต้น (g/L)		210.02	210.02	210.02	210.02	210.02	244.48
ความเข้มข้นที่แยกได้ (g/L)		16.46	26.74	38.68	46.51	48.33	2.16
ปริมาณสกัดจำเพาะ (g/g)	q	5.62	4.57	4.40	3.97	3.30	1.23
สัดส่วนการแยกเทียบกับเริ่มต้น (%)		7.84	12.73	18.42	22.15	23.01	0.88

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อสัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดเพิ่มขึ้นทำให้แยกเกลือแลนทาไนด์ในเตรดได้ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยที่สัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟตสูงสุดสามารถสกัดได้ร้อยละ 23.01 ของความเข้มข้นเริ่มต้น แต่เมื่อพิจารณาปริมาณที่สกัดได้จำเพาะ กล่าวคือ ปริมาณที่สกัดได้ต่อน้ำหนักของไตรบิวทิลฟอสเฟตที่น้ำหนักเท่ากัน พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟตในน้ำมันก๊าดทำให้ปริมาณที่สกัดได้จำเพาะลดลง ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพการสกัดเกลือแลนทาไนด์ในเตรดต่อน้ำหนักของไตรบิวทิลฟอสเฟตลดลง แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าปริมาณการสกัดจำเพาะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มสัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟต ซึ่งเมื่อเทียบกับกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต พบว่าถ่านกัมมันต์ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตได้ร้อยละ 36.32 จึงเทียบเท่ากับไตรบิวทิลฟอสเฟต 36.32 กรัม ละลายอยู่ในน้ำมันก๊าด 63.68 กรัม ในระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายเหลว ซึ่งสามารถหาค่าปริมาณสกัดจำเพาะได้จากสมการความสัมพันธ์ แสดงดังสมการที่ 4.3



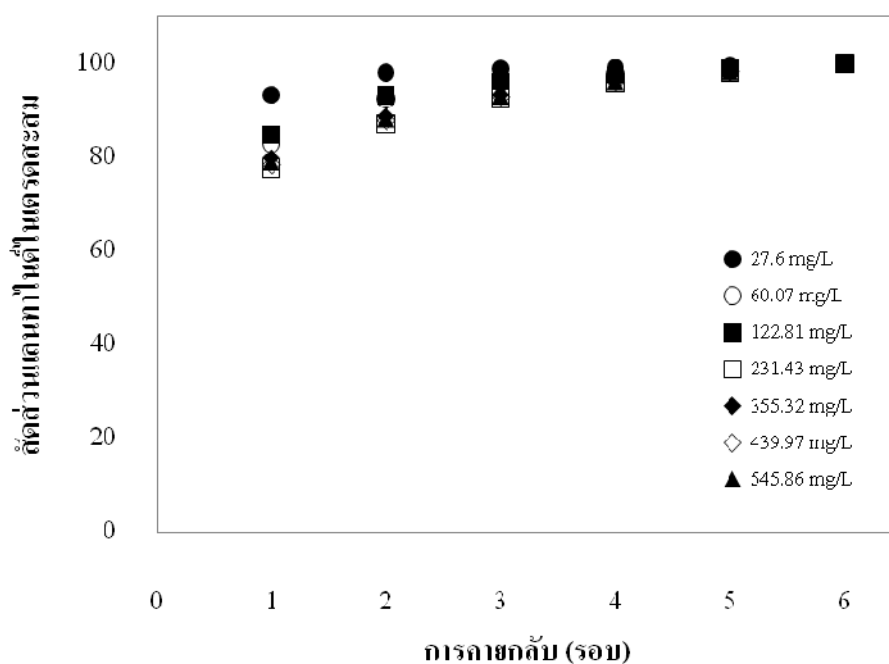
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนไตรบิวทิลฟอสเฟตกับปริมาณการสกัดจำเพาะในการสกัดเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยตัวทำละลายเหลว

$$q = -0.0281X_i + 6.1683 \quad \dots(4.3)$$

จากสมการ 4.3 สามารถใช้ทำนายผลในการเทียบหาปริมาณสกัดจำเพาะในกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเหลว ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยเชิงเส้น เท่ากับ 0.9623 จากค่าไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ถูกดูดซับภายในถ่านกัมมันต์เทียบกับระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายเหลว จะได้ค่าปริมาณสกัดจำเพาะเท่ากับ 5.15 กรัม/กรัมไตรบิวทิลฟอสเฟต แต่ในระบบการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟต ได้ค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะ เท่ากับ 1.23 กรัม/กรัมไตรบิวทิลฟอสเฟต ซึ่งต่ำกว่าค่าจากสมการความสัมพันธ์ร้อยละ 23.88 เหตุผลที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากการที่ไตรบิวทิลฟอสเฟตภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเมื่อเทียบกับระบบการสกัดด้วยตัวทำละลายเหลว

#### 4.2.4 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของเลนทาไนด์ในเตรด

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือเลนทาไนด์ในเตรดด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเลนทาไนด์ในเตรดแตกต่างกันตั้งแต่ 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร จากนั้นทำการคายกลับเกลือเลนทาไนด์ในเตรดที่ถูกดูดซับไว้ออกจากถ่านกัมมันต์ด้วยสารละลายกรดไนตริกเจือจาง พบว่าปริมาณเกลือเลนทาไนด์ในเตรดที่ได้จากการคายกลับแต่ละรอบมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายกรดไนตริกเจือจางได้ในอัตราที่ต่างกัน ซึ่งในการคายกลับแต่ละรอบสามารถนำมาหาค่าร้อยละการคายกลับสะสมได้ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.16 และจะพบว่าตั้งแต่ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือเลนทาไนด์ในเตรดแตกต่างกันตั้งแต่ 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร ให้ผลการคายกลับแต่ละรอบมีการกระจายตัวของข้อมูลต่างกัน



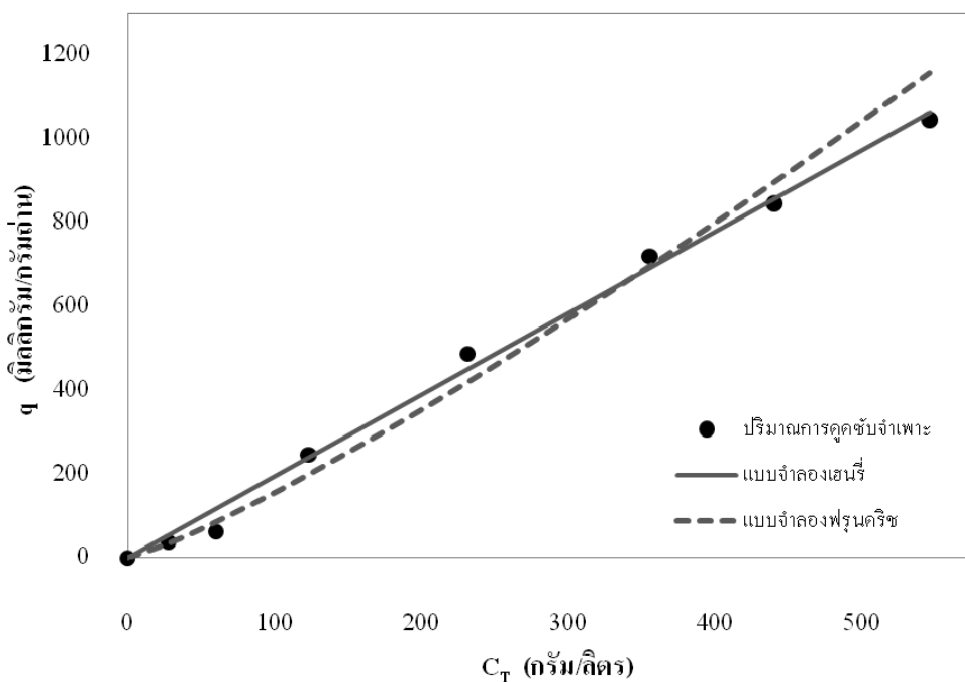
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคายกลับกับสัดส่วนของเลนทาไนด์ในเตรดสะสมของความเข้มข้นเริ่มต้นของเลนทาไนด์ในเตรด 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.15 ความเข้มข้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคในสารละลายแลนทาไนด์ในเตรครวมที่คายกลับแต่ละรอบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรค 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร

การคายกลับ (รอบ)	ความเข้มข้นเกลือแลนทาไนด์ในเตรคที่คายกลับ (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	27.6	60.07	122.81	231.43	355.32	439.97	545.86
1	164.73	245.74	982.98	1817.44	2724.81	3192.22	3986.15
2	8.58	28.19	96.43	219.05	307.09	383.03	470.15
3	1.42	9.90	35.05	126.81	157.43	202.16	244.73
4	0.70	6.13	14.74	77.69	96.47	124.36	151.01
5	0.65	3.91	18.43	59.35	74.61	96.38	114.22
6	0.58	2.40	11.59	40.37	56.30	70.51	80.69

จากตารางที่ 4.15 พบว่าความค่าปริมาณแลนทาไนด์ในเตรคที่ตรวจวัดได้จากการคายกลับในรอบที่หก มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรคที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการทดลองที่กำหนดการคายกลับ 6 รอบทำให้ไม่สามารถนำเกลือแลนทาไนด์ในเตรคที่ถูกดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง (60-600 มิลลิกรัม/ลิตร) ออกมาได้ทั้งหมดภายใน 6 รอบทำให้สัดส่วนเกลือแลนทาไนด์ในเตรคสะสมคลาดเคลื่อน ซึ่งจะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนที่การคายกลับรอบที่หก ซึ่งจะพบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 27.6 กรัมต่อลิตร เหลือไม่ถึง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ความเข้มข้นเริ่มต้น 545.86 กรัมต่อลิตร เหลือประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือว่ามีค่าแตกต่างกันมาก

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรคด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแตกต่างกันตั้งแต่ 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร จากนั้นทำการคายกลับแลนทาไนด์ในเตรคที่ถูกดูดซับไว้จากถ่านกัมมันต์ พบว่าความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรคที่สมดุลกับปริมาณการดูดซับจำเพาะ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรคที่สมดุล ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับปริมาณการดูดซับจำเพาะของความเข้มข้นแลนทานาไนด์ในเตรดเริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแลนทานาไนด์ในเตรดที่สมดุลกับปริมาณการดูดซับจำเพาะ พบว่าค่าปริมาณดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น กล่าวคือการเพิ่มความเข้มข้นของแลนทานาไนด์ในเตรดที่สมดุลมีผลต่อค่าปริมาณการดูดซับจำเพาะของถ่านกัมมันต์ โดยการปริมาณดูดซับจำเพาะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลดูดซับของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ของเฮนรีและฟรุนดริช ตามสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.5 โดยค่าตัวแปรและค่าคงที่ของแบบจำลองสมดุลดูดซับแสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าตัวแปรและค่าคงที่ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีและฟรุนดริช

แบบจำลอง \ ค่าคงที่	K	n	R <sup>2</sup>	( $\Delta q$ ) <sup>2</sup>
แบบจำลองของเฮนรี	1.9487	1.0000	0.9949	5851
แบบจำลองของฟรุนดริช	0.5597	1.1829	0.9817	22903

จากตารางที่ 4.16 พบว่าการเลือกใช้แบบจำลองการดูดซับ ตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยเชิงเส้น ( $R^2$ ) เนื่องจากแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรี มีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากกว่าแสดงว่าพิกัดสอดคล้องกับแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีมากกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดริช และ เมื่อพิจารณาค่าผลต่างของปริมาณดูดซับจำเพาะยกกำลังสอง ( $(\Delta q)^2$ ) ของแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดริช นั่นแสดงว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีสามารถใช้คำนวณปริมาณสมมูลดูดซับแลนทานาไนต์ในเตรดจำเพาะด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตตามสภาวะปกติได้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีมีความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรม การดูดซับแลนทานาไนต์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตมากกว่าแบบจำลองสมมูลดูดซับของฟรุนดริช โดยค่าคงที่การดูดซับของแลนทานาไนต์ในเตรดแต่ละชนิดตามแบบจำลองสมมูลดูดซับของเฮนรีและฟรุนดริช ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของสมการถดถอยเชิงเส้น ( $R^2$ ) และ ผลต่างของปริมาณดูดซับจำเพาะยกกำลังสอง ( $(\Delta q)^2$ ) แสดงดังตารางที่ 4.17 โดยปริมาณการดูดซับจำเพาะของแลนทานาไนต์ในเตรดแต่ละธาตุที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทานาไนต์ในเตรดแตกต่างกันตั้งแต่ 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร แสดงดังตารางที่ 4.18 และเมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นร้อยละของปริมาณแลนทานาไนต์ในเตรดแต่ละตัวจะพบว่า มีอัตราส่วนต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.19



ตารางที่ 4.17 ค่าคงที่แบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรีและฟรุนดริช ของเกลือแลนทาไนด์ใน  
 เกรดแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นสมดุลของแลนทาไนด์ในเตรครวม

เกลือไนเตรด	แบบจำลองของเฮนรี			แบบจำลองของฟรุนดริช			
	$K_H$	$R^2$	$(\Delta q)^2$	$K_F$	n	$R^2$	$(\Delta q)^2$
La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	4.3827	0.9716	121193.81	2.3684	1.1137	0.9752	295555.75
Nd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	3.3532	0.9897	31921.83	0.6573	1.2683	0.9726	21008.59
Pr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.4899	0.9809	1090.64	0.2216	1.1372	0.9678	2283.12
Sm(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.4588	0.9865	801.51	0.0740	1.3007	0.9798	265.92
Y(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.3971	0.9722	1317.05	0.0488	1.3419	0.9827	129.68
Gd(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.2304	0.9307	1223.97	0.0351	1.2961	0.9774	673.35
Dy(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.0387	0.9444	27.81	1.3568	1.3568	0.9965	5.51
Eu(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0.0089	0.9907	0.19	0.0029	1.1892	0.9704	0.12

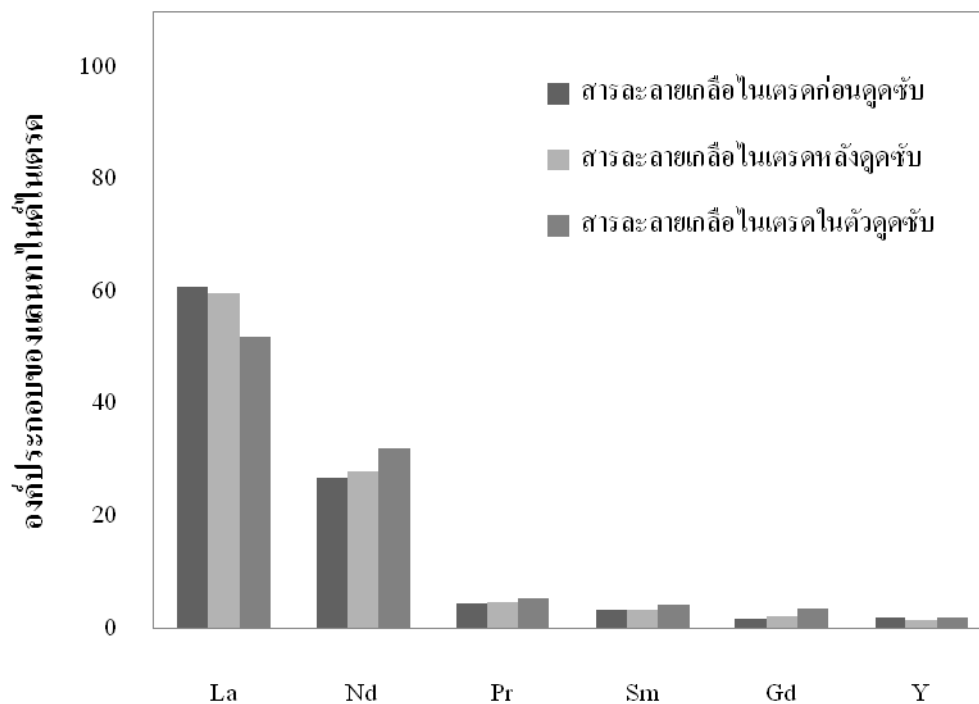
ตารางที่ 4.18 ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ไนเตรดแต่ละชนิดในสารละลาย  
 แลนทาไนด์ไนเตรดรวมของความเข้มข้นแลนทาไนด์ไนเตรดเริ่มต้น 30 ถึง 600  
 กรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น (g/L)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	$q_T$ (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน)
27.60	89.66	59.00	11.41	7.07	5.44	3.54	0.43	0.11	176.66
60.07	183.80	73.58	15.20	10.02	8.01	4.91	0.15	0.60	296.28
122.81	702.84	302.28	61.18	40.54	31.39	17.68	2.53	0.80	1159.23
231.43	1219.32	755.99	139.99	101.16	78.97	36.63	6.71	1.93	2340.71
355.32	1693.80	1182.41	179.15	155.14	126.47	65.09	11.67	2.98	3416.70
439.97	1856.90	1492.41	214.25	204.64	177.77	101.41	17.35	3.91	4068.65
545.86	2247.33	1871.41	255.29	261.29	235.28	147.30	24.00	5.05	5046.95

ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์  
ในเตรดรวมของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรดเริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อ  
ลิตร

ความเข้มข้น (g/L)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	ร้อยละสุทธิ
27.60	50.75	33.40	6.46	4.00	3.08	2.00	0.24	0.06	100.00
60.07	62.04	24.84	5.13	3.38	2.70	1.66	0.05	0.20	100.00
122.81	60.63	26.08	5.28	3.50	2.71	1.53	0.22	0.07	100.00
231.43	52.09	32.30	5.98	4.32	3.37	1.56	0.29	0.08	100.00
355.32	49.57	34.61	5.24	4.54	3.70	1.91	0.34	0.09	100.00
439.97	45.64	36.68	5.27	5.03	4.37	2.49	0.43	0.10	100.00
545.86	44.53	37.08	5.06	5.18	4.66	2.92	0.48	0.10	100.00
$\bar{X}$	52.18	32.14	5.49	4.28	3.51	2.01	0.29	0.10	100.00
S.D.	6.82	4.88	0.53	0.70	0.77	0.52	0.14	0.05	0.00
C.V.	0.131	0.152	0.096	0.163	0.220	0.259	0.485	0.471	-

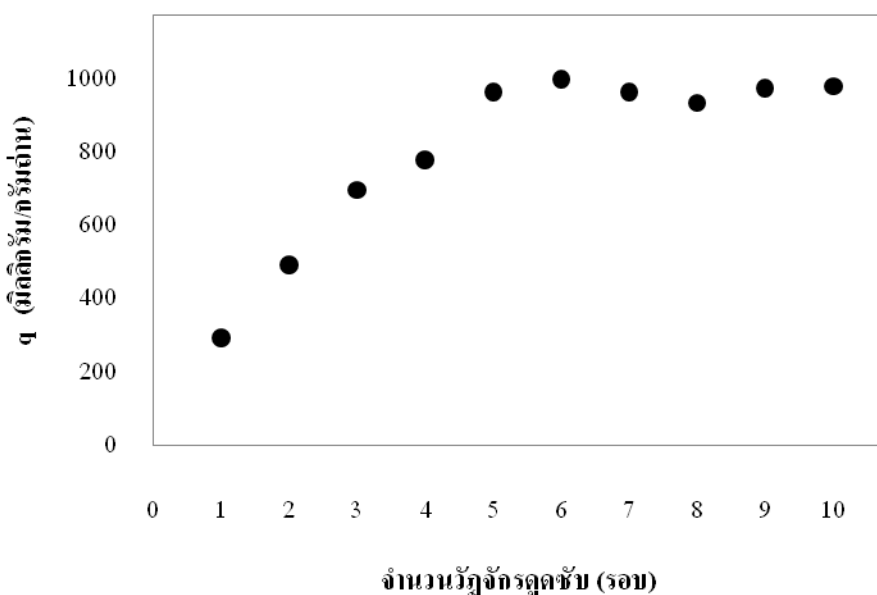
จากตารางที่ 4.19 พบว่าเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนอย่างชัดเจน โดยสารประกอบตัวที่มีปริมาณการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน คือ แลนทานัม และนีโอติเมียม โดยที่ร้อยละของแลนทานัมที่ได้จากการคายกลับ มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรด แต่ร้อยละของนีโอติเมียมที่ได้จากการคายกลับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า นีโอติเมียมมีความสามารถในการถูกดูดซับได้ดีกว่าแลนทานัม อาจเกิดจากที่ความเข้มข้นสูงขึ้นแลนทานัมแตกตัวได้น้อยลง ไตรบิวทิลฟอสเฟตจึงเกิดปฏิกิริยาเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับนีโอติเมียมได้ดีกว่าแลนทานัม จึงทำให้แลนทานัมมีสัดส่วนภายในสารละลายที่ได้จากการคายกลับลดลง ขณะที่นีโอติเมียมมีสัดส่วนภายในสารละลายที่ได้จากการคายกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณร้อยละของสารละลายเริ่มต้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบกับองค์ประกอบเฉลี่ยของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดระหว่างสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดก่อนลูดซั้บ หลังลูดซั้บ และ ในตั้บลูดซั้บของความเข้มข้นแลนทาไนด์ในเตรด เริ่มต้น 30 ถึง 600 กรัมต่อลิตร

#### 4.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีอิทธิพลต่อวัฏจักรการดูดซับ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตริวทิลฟอสเฟตที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อสารละลายแลนทาไนด์ในเตรดเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นเริ่มต้นของแลนทาไนด์ในเตรดเป็น 30 กรัมต่อลิตร โดยเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลการดูดซับเป็น 10 นาที จากนั้นทำการคายกลับรอบ 6 รอบ โดยเวลาที่ใช้เข้าสู่สมดุลการคายกลับเป็น 10 นาที ซึ่งถือเป็นหนึ่งรอบการดูดซับ โดยทำซ้ำกันเป็นจำนวน 10 รอบ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชุดเดิม พบว่าค่าปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นตรงตามความสัมพันธ์เชิงเส้นตั้งแต่รอบที่ 1 จนถึง รอบที่ 5 และเริ่มคงที่ตั้งแต่รอบที่ 6 จนกระทั่งถึงรอบที่ 10 ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.19 กล่าวคือ ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานตั้งแต่รอบที่ 5 ขึ้นไป ประสิทธิภาพการดูดซับจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดูดซับน้อยมากโดยปริมาณดูดซับจำเพาะของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 4.20 และ สัดส่วนของปริมาณดูดซับจำเพาะของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 4.21

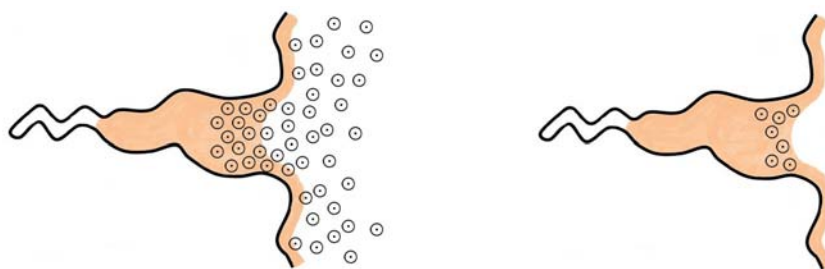


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนวัฏจักรการดูดซับกับปริมาณการดูดซับเกลือแลนทาไนด์ในเตรดจำเพาะ

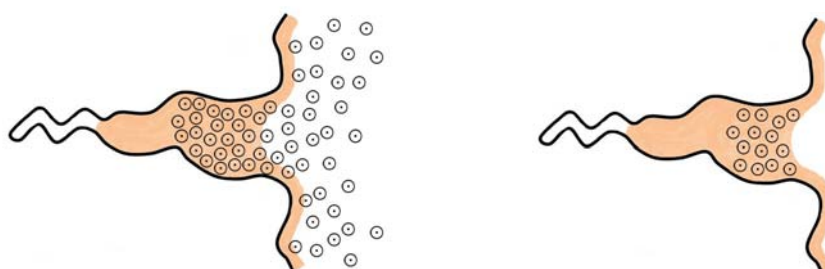
ตารางที่ 4.20 ปริมาณการดูดซับจำเพาะเกลือแลนทาไนด์ในเตรคแต่ละชนิดในสารละลาย  
แลนทาไนด์ในเตรครวมของวัฏจักรการดูดซับรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 10

วัฏจักร (รอบ)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	ปริมาณดูดซับจำเพาะ (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
1	183.80	73.58	15.20	10.02	8.01	4.91	0.15	0.60	296.28
2	304.05	128.37	25.96	15.84	12.62	7.86	1.05	0.31	496.06
3	416.63	189.75	37.89	23.65	18.55	11.96	1.48	0.47	700.38
4	469.70	208.02	42.46	26.02	20.78	13.47	1.72	0.53	782.70
5	533.56	305.85	52.66	32.50	25.54	15.80	2.04	0.62	968.59
6	596.36	280.51	51.27	31.45	25.14	16.04	1.99	0.62	1003.40
7	580.53	266.64	49.18	30.16	23.90	15.54	1.95	0.62	968.52
8	562.19	259.03	47.47	29.17	23.25	15.41	1.91	0.60	939.03
9	573.77	268.03	55.08	33.80	27.09	17.99	2.34	0.71	978.80
10	586.47	263.68	53.96	33.22	26.65	17.94	2.14	0.67	984.74

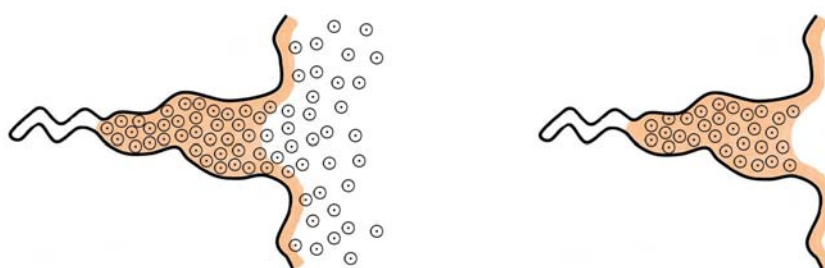
จากตารางที่ 4.20 พบว่าค่าการดูดซับที่ได้จากการคายกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 296.28 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ในรอบที่ 1 และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่า 968.59 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ในรอบที่ 5 หลังจากนั้นค่าปริมาณการดูดซับเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ที่ค่า 973.85 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเกิดจากการสะสมของแลนทาไนด์ในเตรคภายในถ่านกัมมันต์ระหว่างกระบวนการดูดซับ โดยปรากฏการณ์การสะสมของแลนทาไนด์ในเตรคภายในถ่านกัมมันต์ เกิดจากอัตราการแพร่ของแลนทาไนด์ในเตรคเข้าสู่วัฏภาคไตรบิวทิลฟอสเฟต มีค่ามากกว่า อัตราการแพร่แลนทาไนด์ในเตรคออกสู่วัฏภาคของกรดไนตริกเจือจาง โดยอัตราดังกล่าวจะดำเนินไปจนถึงจุดสมดุลของการดูดซับโดยอัตราการแพร่ของแลนทาไนด์ในเตรคเข้าสู่วัฏภาคไตรบิวทิลฟอสเฟต เท่ากับ อัตราการแพร่แลนทาไนด์ในเตรคออกสู่วัฏภาคของกรดไนตริกเจือจาง โดยปฏิกิริยาการดูดซับดังกล่าวจะเข้าสู่สมดุลดูดซับภายในวัฏจักรการดูดซับรอบที่ 5 ซึ่งขั้นตอนการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยาการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 4.20



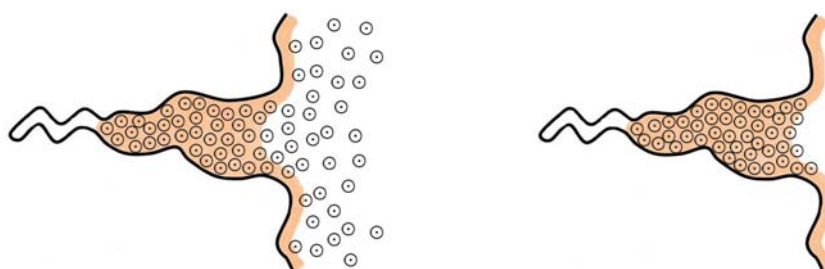
ก. การเริ่มต้นวัฏจักรการดูดซับและคายกลับ



ข. การดำเนินไปของวัฏจักรดูดซับและคายกลับ



ค. เริ่มเข้าสู่สมดุลวัฏจักรดูดซับและคายกลับ



ง. สมดุลวัฏจักรดูดซับและคายกลับ

ตารางที่ 4.21 องค์ประกอบของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิดในเกลือแลนทาไนด์  
ในเตรดรวมของวัฏจักรการดูดซับรอบที่ 1 ถึง รอบที่ 10

วัฏจักร (รอบ)	La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	q <sub>T</sub> (มิลลิกรัม/กรัมถ่าน)
1	62.04	24.84	5.13	3.38	2.70	1.66	0.05	0.20	100.00
2	61.29	25.88	5.23	3.19	2.54	1.58	0.21	0.06	100.00
3	59.49	27.09	5.41	3.38	2.65	1.71	0.21	0.07	100.00
4	60.01	26.58	5.42	3.32	2.65	1.72	0.22	0.07	100.00
5	55.09	31.58	5.44	3.36	2.64	1.63	0.21	0.06	100.00
6	59.43	27.96	5.11	3.13	2.51	1.60	0.20	0.06	100.00
7	59.94	27.53	5.08	3.11	2.47	1.60	0.20	0.06	100.00
8	59.87	27.59	5.05	3.11	2.48	1.64	0.20	0.06	100.00
9	58.62	27.38	5.63	3.45	2.77	1.84	0.24	0.07	100.00
10	59.56	26.78	5.48	3.37	2.71	1.82	0.22	0.07	100.00
$\bar{x}$	59.53	27.32	5.30	3.28	2.61	1.68	0.20	0.08	100.00
S.D.	1.84	1.76	0.20	0.13	0.11	0.09	0.05	0.04	0.00
C.V.	0.031	0.064	0.038	0.040	0.040	0.054	0.267	0.545	-

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.21 พบว่า ค่าสัดส่วนของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละตัว  
ไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนธาตุของสารละลาย  
เริ่มต้น เนื่องจากเกลือกลุ่มแลนทาไนด์มีขนาดอนุภาคและสมบัติทางเคมีใกล้เคียงกันจึงทำให้  
แยกออกจากกันได้ยาก หลังจากนั้นค่าปริมาณการคายกลับจะลดลงเนื่องมาจากการแพร่ของ  
เกลือแลนทาไนด์ในเตรดเข้าไปเกิดปฏิกิริยากับไตรบิวทิลฟอสเฟตในส่วนโพรงที่ลึกเข้าไป  
และภายในโพรงถ่านโมเลกุลเคลื่อนที่ได้ยากจึงทำให้แลนทาไนด์ในเตรดดังกล่าวแพร่ออกมา  
ได้ช้ากว่าส่วนที่ถูกดูดซับอยู่ภายนอกโพรงและรอบนอกของผิวถ่านกัมมันต์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากกะลามะพร้าวสามารถมีค่าปริมาณดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตที่สมดุล 0.65 กรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์
2. การดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตเข้าสู่สมดุลการดูดซับภายในเวลา 10 นาทีแรก
3. การคายกลับแลนทาไนด์ในเตรดออกจากถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไทรบิวทิลฟอสเฟตรอบแรก (10 นาทีแรก) สามารถนำแลนทาไนด์ในเตรดกลับมาได้มากกว่าร้อยละ 80 ของแลนทาไนด์ในเตรดที่ดูดซับทั้งหมด
4. ค่าปริมาณการดูดซับแลนทาไนด์ในเตรดจำเพาะแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้น ณ ภาวะความเข้มข้นของแลนทาไนด์ในเตรดที่สมดุลและสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรี โดยมีค่าคงที่ของสมดุลดูดซับรวมเท่ากับ 1.9487
5. ปริมาณการดูดซับของเกลือแลนทาไนด์ในเตรดจะคงที่เมื่อผ่านวัฏจักรของการดูดซับอย่างน้อย 5 วัฏจักร



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยเป็นการทดลองแบบกะ ดังนั้นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้จริงควรศึกษาปัจจัยต่างๆในกระบวนการแบบต่อเนื่องด้วย ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนากระบวนการแยกธาตุหายากเพื่อลดการใช้พลังงาน

2. เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีค่าปริมาณการดูดซับสูงขึ้น ควรทดลองเปลี่ยนสารสกัดอินทรีย์ หรือ เปลี่ยนตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง หรือ อาจทำการเปลี่ยนสภาวะการดูดซับเช่น การเพิ่มอุณหภูมิ หรือ เปลี่ยนตัวดูดซับ เป็นต้น

3. เพื่อให้เห็นค่าการดูดซับชัดเจนขึ้น ควรลองเปลี่ยนช่วงสารละลายเริ่มต้นให้อยู่ในระดับประมาณ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเครื่องตรวจวัดไม่สามารถวัดสารละลายที่มีความเข้มข้นมากๆได้โดยตรง เพื่อลดผลความคลาดเคลื่อนจากการเจือจางสารละลาย

## รายการอ้างอิง

- [1] N.E. Topp. The chemistry of the rare-earth elements. Amsterdam: Elsevier, 1965.
- [2] C.A. Morais, V.S.T. Ciminelli. Process development for the recovery of high-grade lanthanum by solvent extraction. Hydrometallurgy 73 (October 2004): 237–244.
- [3] สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. เอกสารกระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- [4] DUAN Wuhua, CAO Pijia, ZHU Yongjun. Extraction of rare earth elements from their oxides using organophosphorus reagent complexes with HNO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O in supercritical CO<sub>2</sub>. Journal of rare earths 28 (April 2010): 221-226.
- [5] Enghag, Per. Encyclopedia of the elements: technical data, history, processing, applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [6] Cotton Simon. Lanthanide and actinide chemistry. Chichester: John Wiley & Son, 2006.
- [7] Yongsheng Zhao, Chunxia Liu, Miao Feng, Zhen Chen, Shuqiong Li, Gan Tian, Li Wang. Solid phase extraction of uranium (VI) onto benzoylthiourea-anchored activated carbon. Hazardous Materials 176 (November 2009): 119–124.
- [8] Christie J. Geankoplis. Transport process and separation process principles. Prentice Hall Professional technical reference, 2003.
- [9] L. Zisheng, W. Ruzhu, W. Liwei and C. Chuanjuan. A study on multifunction heat pipe type high efficient adsorption refrigerator using compound adsorbent-ammonia. Chinese Science Bulletin 51 (2006): 239.

- [10] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [11] Motoyuki Suzuki. Adsorption Engineering. Kodansha: Tokyo, 1990.
- [12] Ralph T. Yang. Adsorbents: Fundamentals and applications. Hoboken, N.J: John Wiley, 2003.
- [13] Shaobin Wang, and Z.H. Zhu., Effect of acidic treatment of activated carbons on dye adsorption. Dyes and Pigments 75, 2007, 306-314
- [14] Tascon, JM. D. Adsorption by Carbons. Elsevier Science, 2005.
- [15] Philip A. Schweitzer. Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers. McGraw-Hill, Inc., 1979.
- [16] Wikipedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tributyl-phosphate-2D-skeletal.png>.
- [17] Hoque M Mozammel, Ota Masahiro, Bhattacharya SC. Activated charcoal from coconut shell using  $ZnCl_2$  activation. Biomass and Bioenergy 22 (December 2001): 397 – 400.
- [18] A. Hanafi. Adsorption of cesium, thallium, strontium and cobalt radionuclides using activated carbon. International Journal of Molecular Sciences 1 (August 2010): 292-300.
- [19] Kardia Ramírez-Muñiz, Shaoxian Song, Selene Berber-Mendoza, Shitang Tong. Adsorption of the complex ion  $Au(CN)_2^-$  onto sulfur-impregnated activated carbon in aqueous solutions. Journal of Colloid and Interface Science 349 (May 2010): 602–606.

- [20] Mohamed Kheireddine Aroua, Chun Yang Yin, F.N. Lim, W.L. Kan, Wan Mohd AshriWan Daud. Effect of impregnation of activated carbon with chelating polymer on adsorption kinetics of  $Pb^{2+}$ . Journal of Hazardous Materials 166 (November 2008): 1526–1529.
- [21] O.S. Amuda, A.A. Giwa, I.A. Bello. Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon. Biochemical Engineering Journal 36 (February 2007): 174–181.
- [22] N.S. Awwad, H.M.H. Gad, M.I. Ahmad, H.F. Aly. Sorption of lanthanum and erbium from aqueous solution by activated carbon prepared from rice husk. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 81 (August 2010): 593–599
- [23] Nafaa Adhoum, Lotfi Monser. Removal of phthalate on modified activated carbon: application to the treatment of industrial wastewater. Separation and Purification Technology 38 (November 2003): 233–239
- [24] Kalaya Changkrueng. Effect of Tributyl Phosphate Concentration in Kerosene on Extraction Equilibrium constants of Rare Earth ions. Master's Thesis, Department of Chemical Engineering Chulalongkorn University, 2006.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

ตารางที่ ก.1 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15180	7473	1274	920	447	440	42	4	25780
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	65.86	26.06	4.58	3.91	2.31	2.18	0.07	0.27	105.24
	2	6.93	3.72	0.70	0.45	0.22	0.07	0.00	0.00	12.10
	3	2.47	1.35	0.25	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	4.25
	4	1.62	0.87	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.63
	5	1.05	0.09	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
	6	0.65	0.05	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03
ผลรวมแต่ละธาตุ		78.58	32.15	6.55	4.49	2.59	2.25	0.07	0.27	126.93
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.91	25.33	5.16	3.53	2.04	1.77	0.06	0.21	100.00

ตารางที่ ก.2 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 20 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15490	7588	1322	920	478	451	45	6	26300
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	71.08	29.16	5.10	4.27	2.53	2.37	0.30	0.08	114.89
	2	7.27	3.85	0.72	0.46	0.23	0.08	0.00	0.00	12.61
	3	2.29	1.25	0.23	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	3.88
	4	1.64	0.87	0.15	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.72
	5	0.98	0.50	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57
	6	0.66	0.32	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03
ผลรวมแต่ละธาตุ		83.92	35.95	6.34	4.90	2.76	2.45	0.30	0.08	136.70
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.39	26.30	4.64	3.58	2.02	1.79	0.22	0.06	100.00

ตารางที่ ก.3 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 30 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15460	7504	1326	922	475	442	46	7	26182
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	70.91	30.65	5.55	4.28	2.52	2.36	0.31	0.09	116.67
	2	4.56	2.51	0.48	0.31	0.14	0.00	0.00	0.00	8.00
	3	1.42	0.81	0.15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	2.45
	4	0.87	0.50	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46
	5	0.55	0.30	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90
	6	0.32	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49
ผลรวมแต่ละธาตุ		78.63	34.94	6.32	4.66	2.66	2.36	0.31	0.09	129.97
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.50	26.88	4.86	3.59	2.05	1.82	0.24	0.07	100.00



ตารางที่ ก.4 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 40 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15320	7616	1359	931	482	444	47	6	26205
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	75.49	31.71	5.68	4.68	2.76	2.55	0.33	0.09	123.29
	2	4.88	2.66	0.49	0.31	0.14	0.00	0.00	0.00	8.48
	3	1.33	0.77	0.13	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29
	4	0.86	0.49	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43
	5	0.49	0.27	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
	6	0.34	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52
ผลรวมแต่ละธาตุ		83.39	36.08	6.42	5.05	2.90	2.55	0.33	0.09	136.81
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.95	26.37	4.69	3.69	2.12	1.86	0.24	0.07	100.00

ตารางที่ ก.5 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 50 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14190	6946	1247	847	432	398	42	6	24108
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	71.40	31.49	5.66	4.40	2.58	2.37	0.32	0.09	118.31
	2	3.70	2.01	0.38	0.24	0.11	0.00	0.00	0.00	6.44
	3	0.90	0.53	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.52
	4	0.57	0.33	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96
	5	0.39	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
	6	0.32	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48
ผลรวมแต่ละธาตุ		77.28	34.73	6.19	4.64	2.69	2.37	0.32	0.09	128.31
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.23	27.07	4.82	3.62	2.10	1.85	0.25	0.07	100.00

ตารางที่ ก.6 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 60 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14590	7316	1311	888	443	415	44	5	25012
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	75.52	31.85	5.63	4.79	2.77	2.50	0.33	0.09	123.49
	2	3.56	1.99	0.37	0.22	0.08	0.00	0.00	0.00	6.22
	3	0.95	0.57	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.62
	4	0.62	0.36	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04
	5	0.43	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66
	6	0.29	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43
ผลรวมแต่ละธาตุ		81.37	35.15	6.15	5.01	2.86	2.50	0.33	0.09	133.45
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.97	26.34	4.60	3.75	2.14	1.88	0.25	0.07	100.00

ตารางที่ ก.7 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 5 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15480	7190	1294	874	441	407	41	4	25731
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	56.09	22.17	4.40	2.83	1.64	1.44	0.18	0.04	88.79
	2	1.71	0.92	0.16	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	2.86
	3	0.44	0.21	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68
	4	0.28	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ผลรวมแต่ละธาตุ		58.52	23.41	4.61	2.90	1.64	1.44	0.18	0.04	92.73
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		63.10	25.24	4.97	3.13	1.77	1.56	0.19	0.04	100.00

ตารางที่ ก.8 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15180	7473	1274	920	447	440	42	4	25780
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	65.86	26.06	4.58	3.91	2.31	2.18	0.07	0.27	105.24
	2	6.93	3.72	0.70	0.45	0.22	0.07	0.00	0.00	12.10
	3	2.47	1.35	0.25	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	4.25
	4	1.62	0.87	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.63
	5	1.05	0.09	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
	6	0.65	0.05	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03
ผลรวมแต่ละธาตุ		78.58	32.15	6.55	4.49	2.59	2.25	0.07	0.27	126.93
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.91	25.33	5.16	3.53	2.04	1.77	0.06	0.21	100.00

ตารางที่ ก.9 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 15 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14870	7393	1328	895	454	421	42	5	25408
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	173.05	77.60	15.57	10.16	5.95	5.60	0.76	0.23	288.92
	2	6.94	3.62	0.67	0.42	0.20	0.07	0.00	0.00	11.90
	3	1.27	0.71	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.10
	4	0.96	0.48	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.52
	5	0.23	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
	6	0.24	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
ผลรวมแต่ละธาตุ		182.67	82.58	16.44	10.58	6.15	5.66	0.76	0.23	305.08
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.88	27.07	5.39	3.47	2.02	1.86	0.25	0.08	100.00

ตารางที่ ก.10 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 20 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14760	7363	1313	819	414	378	40	5	25091
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	234.94	100.40	20.06	13.15	7.72	7.28	1.00	0.31	384.86
	2	9.67	5.05	0.95	0.62	0.31	0.15	0.00	0.00	16.75
	3	2.55	1.39	2.56	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	6.64
	4	0.82	0.45	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.34
	5	0.43	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65
	6	0.44	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66
ผลรวมแต่ละธาตุ		248.85	107.73	23.64	13.91	8.03	7.43	1.00	0.31	410.89
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.56	26.22	5.75	3.38	1.95	1.81	0.24	0.08	100.00

ตารางที่ ก.11 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 30 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14610	7222	1273	864	435	402	43	4	24853
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	278.20	125.80	25.40	16.64	9.80	9.17	1.28	0.40	466.69
	2	16.37	8.58	1.65	1.10	0.58	0.37	0.03	0.00	28.68
	3	3.47	1.99	0.36	0.23	0.08	0.00	0.00	0.00	6.13
	4	1.57	0.89	0.16	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	2.68
	5	0.98	0.54	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.61
	6	0.78	0.42	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28
ผลรวมแต่ละธาตุ		301.37	138.21	27.73	18.04	10.46	9.54	1.32	0.40	507.06
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.43	27.26	5.47	3.56	2.06	1.88	0.26	0.08	100.00



ตารางที่ ก.12 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 40 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14340	7264	1185	871	445	410	43	5	24563
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	445.07	187.27	36.72	23.59	14.06	13.31	1.87	0.59	722.47
	2	27.77	14.21	2.74	1.86	1.00	0.75	0.09	0.01	48.43
	3	5.39	3.05	0.56	0.37	0.16	0.00	0.00	0.00	9.53
	4	2.54	1.43	0.26	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	4.38
	5	1.57	0.87	0.15	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	2.65
	6	1.33	0.72	0.13	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	2.22
ผลรวมแต่ละธาตุ		483.67	207.54	40.57	26.07	15.22	14.06	1.96	0.60	789.68
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.25	26.28	5.14	3.30	1.93	1.78	0.25	0.08	100.00

ตารางที่ ก.13 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 50 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14270	7087	1269	858	435	403	43	4	24368
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	505.45	220.72	44.59	28.80	17.16	16.16	2.30	0.73	835.90
	2	36.49	18.82	3.59	2.44	1.33	1.02	0.14	0.03	63.86
	3	6.82	3.85	0.73	0.50	0.22	0.00	0.00	0.00	12.12
	4	3.28	1.86	0.34	0.20	0.08	0.00	0.00	0.00	5.76
	5	2.64	1.42	0.26	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	4.46
	6	2.04	1.10	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.43
ผลรวมแต่ละธาตุ		556.72	247.77	49.71	32.18	18.79	17.18	2.44	0.76	925.53
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.15	26.77	5.37	3.48	2.03	1.86	0.26	0.08	100.00

ตารางที่ ก.14 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 10 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		7524	3516	503	379	135	72	21	3	25901
ปริมาณที่สมดุล		7326	3451	509	360	128	61	20	2	11858
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	35.05	24.22	4.71	3.06	1.76	1.62	0.20	0.05	70.66
	2	2.24	1.15	0.21	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.70
	3	0.41	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61
	4	0.22	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
	5	0.21	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28
	6	0.20	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
ผลรวมแต่ละธาตุ		38.33	25.78	4.92	3.16	1.76	1.62	0.20	0.05	75.81
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		50.57	34.00	6.49	4.16	2.32	2.13	0.26	0.06	100.00

ตารางที่ ก.15 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15180	7473	1274	920	447	440	42	4	25780
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	65.86	26.06	4.58	3.91	2.31	2.18	0.07	0.27	105.24
	2	6.93	3.72	0.70	0.45	0.22	0.07	0.00	0.00	12.10
	3	2.47	1.35	0.25	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	4.25
	4	1.62	0.87	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.63
	5	1.05	0.09	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
	6	0.65	0.05	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03
ผลรวมแต่ละธาตุ		78.58	32.15	6.55	4.49	2.59	2.25	0.07	0.27	126.93
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.91	25.33	5.16	3.53	2.04	1.77	0.06	0.21	100.00

ตารางที่ ก.16 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 50 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		30550	14850	2414	1854	888	906	67	11	25901
ปริมาณที่สมดุล		31270	15120	2529	1871	916	915	68	8	52697
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	257.20	109.90	21.82	14.77	8.55	7.57	1.10	0.35	421.25
	2	22.61	13.03	2.39	1.82	0.93	0.47	0.08	0.01	41.33
	3	8.21	4.92	0.87	0.66	0.31	0.06	0.00	0.00	15.02
	4	5.13	0.04	0.54	0.39	0.17	0.00	0.00	0.00	6.27
	5	4.48	2.53	0.46	0.31	0.13	0.00	0.00	0.00	7.90
	6	2.85	1.61	0.29	0.17	0.06	0.00	0.00	0.00	4.97
ผลรวมแต่ละธาตุ		300.48	132.02	26.36	18.11	10.15	8.09	1.18	0.36	496.74
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		60.49	26.58	5.31	3.65	2.04	1.63	0.24	0.07	100.00

ตารางที่ ก.17 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 100กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		59351	28850	4791	3674	1876	1951	79	15	25901
ปริมาณที่สมดุล		58716	28430	4757	3532	1826	1840	172	15	99288
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	423.00	247.80	44.80	30.36	17.46	12.98	2.31	0.70	779.41
	2	39.36	33.27	7.41	7.08	3.90	2.04	0.47	0.12	93.65
	3	24.48	20.35	3.38	3.25	1.79	0.83	0.19	0.04	54.30
	4	14.99	12.59	2.07	2.00	1.07	0.45	0.10	0.01	33.27
	5	11.53	9.61	1.60	1.53	0.79	0.31	0.06	0.00	25.43
	6	7.93	6.58	1.08	1.00	0.53	0.17	0.00	0.00	17.29
ผลรวมแต่ละธาตุ		521.29	330.20	60.34	45.21	25.54	16.77	3.13	0.87	1003.36
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		51.95	32.91	6.01	4.51	2.55	1.67	0.31	0.09	100.00

ตารางที่ ก.18 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 150 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		85207	41370	6933	5270	2736	2843	198	22	25901
ปริมาณที่สมดุล		89784	43570	7433	5516	2898	2973	220	23	152417
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	616.70	393.10	56.65	47.23	27.95	22.04	3.87	1.08	1168.62
	2	46.10	54.04	9.80	10.35	6.13	3.92	0.80	0.19	131.33
	3	24.83	28.31	4.42	4.88	2.85	1.67	0.35	0.07	67.37
	4	15.37	17.44	2.68	2.94	1.71	0.96	0.19	0.00	41.29
	5	11.99	13.39	2.10	2.27	1.32	0.72	0.14	0.00	31.91
	6	9.15	10.17	1.57	1.68	0.94	0.51	0.09	0.00	24.13
ผลรวมแต่ละธาตุ		724.14	516.45	77.21	69.35	40.89	29.83	5.44	1.34	1464.64
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		49.44	35.26	5.27	4.73	2.79	2.04	0.37	0.09	100.00

ตารางที่ ก.19 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 200 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		114071	55530	9385	7201	3750	3913	359	36	25901
ปริมาณที่สมดุล		111032	53930	9279	6818	3623	3694	318	28	188723
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	688.40	481.20	66.01	58.61	36.81	31.13	5.29	1.32	1368.76
	2	43.84	74.19	12.27	15.02	9.49	7.21	1.34	0.27	163.63
	3	25.22	39.40	5.75	7.32	4.61	3.40	0.62	0.11	86.44
	4	15.46	24.36	3.54	4.52	2.82	2.04	0.37	0.06	53.17
	5	12.06	18.84	2.77	3.49	2.19	1.57	0.28	0.00	41.20
	6	8.89	13.86	2.01	2.52	1.57	1.11	0.19	0.00	30.14
ผลรวมแต่ละธาตุ		793.87	651.85	92.35	91.48	57.49	46.46	8.08	1.76	1743.34
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		45.54	37.39	5.30	5.25	3.30	2.66	0.46	0.10	100.00



ตารางที่ ก.20 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 250 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		143528	69870	11870	8983	4751	4921	476	79	25901
ปริมาณที่สมดุล		141784	64010	10990	8114	4325	4412	413	60	234108
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	855.50	600.60	79.52	74.23	47.57	42.85	7.10	1.63	1708.99
	2	44.97	97.06	13.84	18.93	12.72	11.08	1.87	0.34	200.81
	3	25.05	49.44	6.92	9.79	6.56	5.64	0.95	0.16	104.50
	4	15.40	30.61	4.25	6.06	4.04	3.48	0.57	0.08	64.49
	5	11.65	23.19	3.23	4.57	3.05	2.61	0.42	0.06	48.77
	6	8.22	16.49	2.28	3.22	2.15	1.82	0.28	0.00	34.45
ผลรวมแต่ละธาตุ		960.79	817.39	110.03	116.79	76.09	67.48	11.18	2.26	2162.01
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		44.44	37.81	5.09	5.40	3.52	3.12	0.52	0.10	100.00

ตารางที่ ก.21 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 1

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15180	7473	1274	920	447	440	42	4	25780
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	65.86	26.06	4.58	3.91	2.31	2.18	0.07	0.27	105.24
	2	6.93	3.72	0.70	0.45	0.22	0.07	0.00	0.00	12.10
	3	2.47	1.35	0.25	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	4.25
	4	1.62	0.87	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.63
	5	1.05	0.09	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.69
	6	0.65	0.05	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03
ผลรวมแต่ละธาตุ		78.58	32.15	6.55	4.49	2.59	2.25	0.07	0.27	126.93
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.91	25.33	5.16	3.53	2.04	1.77	0.06	0.21	100.00

ตารางที่ ก.22 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 2

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14920	7414	1332	902	476	423	46	6	25519
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	120.74	51.16	10.31	6.69	3.92	3.59	0.49	0.14	197.04
	2	5.36	2.85	0.53	0.32	0.15	0.01	0.00	0.00	9.23
	3	1.73	0.96	0.17	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	2.94
	4	0.83	0.44	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35
	5	0.70	0.35	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10
	6	0.63	0.31	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98
ผลรวมแต่ละธาตุ		129.99	56.07	11.19	7.09	4.07	3.61	0.49	0.14	212.64
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		61.13	26.37	5.26	3.33	1.91	1.70	0.23	0.07	100.00

ตารางที่ ก.23 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 3

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)							ผลรวมสุทธิ	
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy		Eu
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14870	7393	1328	895	454	426	50	8	25424
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	155.00	70.83	14.09	9.26	5.43	5.18	0.69	0.21	260.69
	2	13.89	7.21	1.36	0.90	0.47	0.30	0.00	0.00	24.14
	3	4.09	2.17	0.40	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	7.00
	4	2.33	1.22	0.23	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	3.88
	5	1.66	0.87	0.15	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.73
	6	1.15	0.58	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84
ผลรวมแต่ละธาตุ		178.11	82.89	16.33	10.57	6.00	5.48	0.69	0.21	300.28
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.31	27.60	5.44	3.52	2.00	1.83	0.23	0.07	100.00

ตารางที่ ก.24 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 4

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14480	7185	1281	876	439	411	50	5	24727
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	179.00	80.23	16.28	10.61	6.25	5.90	0.80	0.24	299.32
	2	12.22	5.97	1.15	0.72	0.38	0.27	0.00	0.00	20.71
	3	4.22	2.08	0.40	0.21	0.09	0.00	0.00	0.00	7.00
	4	2.31	1.13	0.21	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	3.74
	5	1.66	0.79	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.59
	6	1.40	0.66	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.18
ผลรวมแต่ละธาตุ		200.81	90.85	18.30	11.62	6.73	6.17	0.80	0.24	335.53
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.85	27.08	5.46	3.46	2.01	1.84	0.24	0.07	100.00

ตารางที่ ก.25 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 5

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14440	7114	1271	870	445	411	50	2	24603
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	199.98	118.49	19.89	13.06	7.62	7.07	0.95	0.28	367.34
	2	14.01	7.24	1.38	0.86	0.42	0.17	0.00	0.00	24.08
	3	7.88	4.64	0.86	0.54	0.22	0.00	0.00	0.00	14.14
	4	2.46	1.30	0.23	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	4.06
	5	2.00	1.03	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.21
	6	1.78	0.89	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.83
ผลรวมแต่ละธาตุ		228.11	133.59	22.70	14.53	8.26	7.24	0.95	0.28	415.66
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		54.88	32.14	5.46	3.50	1.99	1.74	0.23	0.07	100.00

ตารางที่ ก.26 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 6

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15560	7510	1482	909	538	482	50	7	26538
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	219.50	105.10	18.72	12.11	7.18	6.80	0.93	0.28	370.62
	2	17.37	8.58	1.68	1.05	0.57	0.45	0.00	0.00	29.70
	3	7.49	3.68	0.71	0.42	0.21	0.10	0.00	0.00	12.60
	4	4.36	2.13	0.41	0.21	0.10	0.00	0.00	0.00	7.22
	5	3.63	1.77	0.34	0.17	0.07	0.00	0.00	0.00	5.98
	6	2.61	1.26	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	4.21
ผลรวมแต่ละธาตุ		254.96	122.53	22.09	14.06	8.13	7.35	0.93	0.28	430.33
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.25	28.47	5.13	3.27	1.89	1.71	0.22	0.07	100.00

ตารางที่ ก.27 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 7

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		14680	7149	1405	861	507	425	50	6	25083
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	219.20	102.20	18.43	11.94	7.03	6.70	0.91	0.28	366.70
	2	16.25	8.00	1.56	0.97	0.54	0.42	0.00	0.00	27.73
	3	4.90	2.40	0.47	0.25	0.12	0.00	0.00	0.00	8.14
	4	2.91	1.43	0.27	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	4.74
	5	2.64	1.29	0.25	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	4.32
	6	2.29	1.14	0.22	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	3.73
ผลรวมแต่ละธาตุ		248.19	116.46	21.19	13.48	7.72	7.13	0.91	0.28	415.35
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.75	28.04	5.10	3.25	1.86	1.72	0.22	0.07	100.00



ตารางที่ ก.28 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 8

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15200	7349	1450	886	525	468	50	7	25935
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	213.70	100.10	17.93	11.68	6.87	6.60	0.89	0.27	358.04
	2	15.28	7.49	1.47	0.90	0.50	0.40	0.00	0.00	26.04
	3	5.77	2.84	0.55	0.31	0.15	0.06	0.00	0.00	9.67
	4	2.50	1.21	0.23	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	4.05
	5	1.75	0.85	0.16	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	2.81
	6	1.35	0.65	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.12
ผลรวมแต่ละธาตุ		240.36	113.14	20.45	13.04	7.52	7.06	0.89	0.27	402.73
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.68	28.09	5.08	3.24	1.87	1.75	0.22	0.07	100.00

ตารางที่ ก.29 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 9

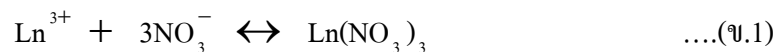
ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15030	7288	1436	880	518	462	50	5	25669
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	212.52	101.20	20.66	13.35	7.92	7.62	1.03	0.32	364.62
	2	21.73	10.50	2.07	1.30	0.72	0.62	0.06	0.00	37.00
	3	4.92	2.39	0.46	0.25	0.12	0.00	0.00	0.00	8.14
	4	2.69	1.30	0.25	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	4.35
	5	1.73	0.84	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77
	6	1.71	0.84	0.15	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	2.75
ผลรวมแต่ละธาตุ		245.31	117.06	23.74	15.10	8.76	8.24	1.09	0.32	419.62
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		58.46	27.90	5.66	3.60	2.09	1.96	0.26	0.08	100.00

ตารางที่ ก.30 ปริมาณธาตุแลนทาไนด์แต่ละชนิดที่เริ่มต้น ที่สมดุลและที่คายกลับได้ของเวลาการดูดซับ 10 นาที ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับ ไตรบิวทิลฟอสเฟตร้อยละ 10 และความเข้มข้นเริ่มต้น 25 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง วัฏจักรที่ 10

ธาตุ		ปริมาณความเข้มข้นที่ตรวจวัด (มิลลิกรัม/กรัม)								ผลรวมสุทธิ
		La	Nd	Pr	Sm	Gd	Y	Dy	Eu	
ปริมาณที่เริ่มต้น		15810	6987	1183	898	475	492	48	8	25901
ปริมาณที่สมดุล		15250	7350	1446	888	525	470	50	6	25985
ปริมาณที่คายกลับ (รอบ)	1	214.12	97.77	19.85	12.88	7.61	7.37	0.99	0.30	360.89
	2	24.86	11.85	2.33	1.47	0.82	0.74	0.01	0.00	42.08
	3	7.00	3.38	0.66	0.37	0.19	0.11	0.00	0.00	11.71
	4	2.47	1.19	0.23	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	3.97
	5	1.58	0.75	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50
	6	0.70	0.23	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98
ผลรวมแต่ละธาตุ		250.72	115.17	23.25	14.86	8.62	8.22	1.00	0.30	422.13
ร้อยละของธาตุที่คายกลับ		59.39	27.28	5.51	3.52	2.04	1.95	0.24	0.07	100.00

### ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณแปลงค่า ความเข้มข้นธาตุแลนทาไนด์ที่ได้จากการตรวจวัด เป็นความเข้มข้นของสารละลายแลนทาไนด์ในเตรด จากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบแลนทาไนด์ในเตรดจากสมการ (ข.1)



เมื่อความเข้มข้นของไอออนแลนทาไนด์ที่ได้จากการตรวจวัด = Ln g/L

เมื่อ  $M_{\text{Ln}}$  คือ มวลอะตอมของไอออน Ln จะได้ =  $\frac{\text{Ln}}{M_{\text{Ln}}}$  mol/L

ซึ่งจากสมการ (ข.1)  $3\text{NO}_3^-$  สมมูลกับ  $\frac{3\text{Ln}}{M_{\text{Ln}}}$  และเมื่อ มวลโมเลกุลของ  $\text{NO}_3^- = 62$  g/gmol

เมื่อคิดกลับไปเป็นมวล จะได้มวลของ  $3\text{NO}_3^-$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{3\text{Ln}}{M_{\text{Ln}}} \times 62$

ดังนั้น การคำนวณมวลของแลนทาไนด์ในเตรดแต่ละชนิด สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (ข.2)

$$\text{มวลของ } \text{Ln}(\text{NO}_3)_3 = \left( \frac{3\text{Ln}}{M_{\text{Ln}}} \times 62 \right) + \text{Ln} \quad \dots(\text{ข.2})$$

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาสกร ธรรมสัจจกุล เกิดที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับชั้นปริญญา  
บัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาระดับชั้นปริญญาโท  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554