

การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากเรโมนาไซด์ โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรูยึดติดคงที่
และป้อนสารเป็นช่วงๆ



นายสุภัทร สัมมากสิพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-3508-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF URANIUM AND THORIUM FROM MONAZITE
USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN

Mr. Supat Summakasipong

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2006


ISBN 974-14-3508-8

Copyright of Chulalongkorn University

490059


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซด์ โดยใช้หอสกัดแบบจานมีรูยึด
ติดคงที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ
โดย นายสุภัทร สัมมากสิพงษ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ

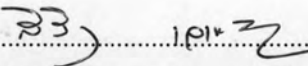
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

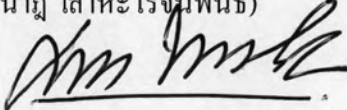

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. สิรินาถ เลาะห์โรจนพันธ์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มล. สุขกนก ทองใหญ่)

สุภัทร สัมมาภักดิ์: การสกัดยูเรเนียมและทอเรียมจากแร่โมนาไซต์ โดยใช้หอสกัดแบบจันมีรูยี่ดัดคองที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ. (EXTRACTION OF URANIUM AND THORIUM FROM MONAZITE USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN)

อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. อูรา ปานเจริญ. 85 หน้า. ISBN 974-14-3508-8

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก จากแร่โมนาไซต์ที่อยู่ในรูปเล็กของสารประกอบของโลหะ และถูกเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการสกัดด้วยเครื่องสกัดของเหลวด้วยของเหลวแบบจันมีรูยี่ดัดคองที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ (pulse sieve plate column) การสกัดยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก ใช้สารไตรบิวทิวฟอสเฟสที่ละลายในน้ำมันก๊าดเป็นสารสกัด โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตั้งแต่ 5% ถึง 20% โดยปริมาตร สารละลายป้อนเข้าคือสารละลายของสารประกอบของโลหะ ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก โดยการเตรียมให้อยู่ในภาวะที่เป็นกรด กำหนดให้ความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลายป้อนเข้าคองที่ เท่ากับ 3 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของอัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้าต่อสารสกัดคองที่ เท่ากับ 1 ต่อ 1 และศึกษาผลของการสกัดโดยปรับเปลี่ยนค่าจังหวะการเขย่า (pulse setting number) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ 3, 5, 7 และ 10

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดยูเรเนียม ทอเรียมออกจากธาตุหายาก โดยใช้หอสกัดแบบจันมีรูยี่ดัดคองที่และป้อนสารเป็นช่วงๆ คือความเข้มข้นของไตรบิวทิวฟอสเฟสในน้ำมันก๊าด สำหรับการสกัดยูเรเนียมเท่ากับ 10% โดยปริมาตร และความเข้มข้นของไตรบิวทิวฟอสเฟสในน้ำมันก๊าด สำหรับการสกัดทอเรียมเท่ากับ 20% โดยปริมาตร ความเป็นกรดของสารละลายป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 3 โมลต่อลิตร อัตราส่วนการของอัตราการไหลของสารละลายป้อนเข้าต่อสารสกัดคองที่ เท่ากับ 1 ต่อ 1 จังหวะการเขย่า (pulse setting number) เท่ากับ 7 ซึ่งความสามารถของหอสกัดในการสกัดยูเรเนียมและทอเรียม เท่ากับ ร้อยละ 89.46 และ ร้อยละ 76.08 ตามลำดับ และเวลาที่เหมาะสมสำหรับการสกัด เท่ากับ 40 นาที

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2549.....

4670567721 : MOJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: URANIUM / THORIUM / RARE EARTHS / MONAZITE / PULSE SIEVE-
PLATE COLUMN / NANO TECHNOLOGY

SUPAT SUMMAKASIPONG : (EXTRACTION OF URANIUM AND THORIUM
FROM MONAZITE USING PULSE SIEVE PLATE COLUMN). THESIS ADVISOR:
ASSOC. PROF. URA PANCHAROEN, D.Eng.Sc., 85 pp. ISBN 974-14-3508-8

This research is to study the extraction of uranium, thorium and rare earths from hydrous oxide cake obtained by alkaline digestion of monazite using perforated pulse sieve plate column. The separation was studied using tri-n-butyl phosphate as extractant at concentration in range 5% to 20% (by vol.) in kerosene. Feed solution containing uranium, thorium and rare earths. It was supplied with 3 molar nitric acid. The flow rate ratio of organic solution per feed solution was 1:1 and pulse setting number in the range 3-10. This research was to require the optimum conditions of process such as concentration of organic solvent, pulse setting number and times of extractions. The optimum condition was show while a high efficiency of uranium and thorium were extracted.

The results were found that the optimum condition for extracted uranium was 10% vol. TBP in organic solvent, pulse setting number 7 and 1:1 for flow rate of feed solution to organic solvent ratio. And the optimum condition for extracted thorium was 20% vol. TBP in organic solvent, pulse setting number 7 and 1:1 for flow rate of feed solution to organic solvent ratio. The efficiency of extraction on Uranium, Thorium and Rare earths were 89.46%, 76.08% and 54.26% respectively. The optimum time for extracted was 40 minutes.

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

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

Academic Year :2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยความอนุเคราะห์จากผู้ที่มิมีพระคุณทุกท่าน ซึ่งทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อูรา ปานเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและวินิจฉัย อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ หม่อมหลวง ดร. ศุภกนก ทองใหญ่ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. สิรินาถ เลาหะโรจนพันธ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาชี้แนะแนวทางอย่างดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร. พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์ ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก คุณประพัศสร ใจใส เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับทุกท่าน ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างแร่โมนาไซด์เพื่อใช้ในการทำวิจัย และให้คำแนะนำ ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่กรุณาให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และที่สำคัญคือห้องปฏิบัติการระบบเฉพาะหน่วย สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องสกัดแบบของเหลวด้วยของเหลวแบบ pulse sieve plate column ที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย ขอขอบคุณกองทุนอุดหนุนทั่วไปในการทำวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมารดาและพี่น้องของผู้วิจัย ที่เป็นกำลังใจให้อยู่ตลอดเวลา รวมทั้งกำลังใจที่อบอุ่นจากครอบครัวของผู้วิจัย และขอส่งความรักถึงดวงวิญญาณของบิดาล่วงลับ อันเป็นที่เคารพภักดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบาย.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 แร่โมนาไซต์.....	5
2.1.1 ยูเรเนียม.....	6
2.1.2 ทอเรียม.....	10
2.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction).....	12
2.2.1 กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	13
2.2.2 ขั้นตอนของกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	15
2.3 การสกัด.....	16
2.3.1 หลักการเลือกสารสกัด.....	16
2.3.2 การเลือกสารสกัดที่เหมาะสม.....	16
2.3.3 ชนิดของสารสกัด.....	17
2.3.4 ไตรบิวทิลฟอสเฟส.....	21
2.3.5 น้ำมันก๊าด.....	22

สารบัญ

	หน้า
2.4 เครื่องมือในการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	22
2.4.1 หลักการเลือกใช้เครื่องมือในการสกัด.....	22
2.4.2 หลักการทำงานของเครื่องสกัด.....	22
2.4.3 ชนิดของหอสกัด.....	24
2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Mass Transfer Coefficient).....	28
2.5.1 อัตราการถ่ายเทมวล.....	28
2.5.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉพาะที่.....	29
2.6 เครื่องมือวิเคราะห์.....	31
2.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน.....	31
2.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP.....	32
2.7 ประสิทธิภาพของการสกัด.....	33
2.7.1 ร้อยละของสารที่สกัดได้.....	33
2.7.2 ค่าการคัดเลือก.....	33
2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว.....	33
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	35
3.2 สารเคมี.....	35
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	35
3.3.1 การเตรียมสารละลายสารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะ จากเค็กละลายของแร่โมนาไซด์.....	36
3.3.2 การเตรียมสารละลายอินทรีย์สำหรับสกัด โดยใช้ไตรบิวทิล ฟอสเฟส(TBP) ละลายในน้ำมันก๊าด.....	37
3.3.3 การทดลองเพื่อศึกษาผลของการปรับจังหวะของการเขย่า (Pulse setting number) 4 ค่า คือ 3, 5, 7 และ 10	37
3.3.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสาร ละลายอินทรีย์ 4 ค่าคือ 5%, 10%, 15% และ 20% โดยปริมาตร ที่มีต่อผลต่อการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก	38
3.3.5 การทดลองเพื่อศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการสกัด โดยการ วิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองในทุกๆภาวะของการทดลอง.....	39

สารบัญ

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของจังหวะการเขย่าที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียม และทอเรียม โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ เท่ากับ ร้อยละ 5 โดยปริมาตร.....	41
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียม และทอเรียม โดยให้จังหวะการเขย่าคงที่ เท่ากับ 7	44
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของเวลาของการสกัด ที่มีผลต่อการสกัดยูเรเนียม และทอเรียม โดยให้จังหวะการเขย่าคงที่ เท่ากับ 7	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
รายการอ้างอิง.....	53
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ.....	57
ภาคผนวก ข การป้องกันอันตรายจากรังสี.....	68
ภาคผนวก ค คำนิยาม.....	69
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงไอโซโทปของยูเรเนียมธรรมชาติ.....	8
2.2 คุณสมบัติของทอเรียม.....	10
2.3 คุณสมบัติของ TBP.....	21
2.4 คุณสมบัติของน้ำมันก๊าด.....	21
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก.....	48
ก-1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก ในสารละลายป้อนเข้า.....	57
ก-2 ความเข้มข้นของยูเรเนียม ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5% ค่าการเขย่า (pulse setting no) เท่ากับ 3, 5, 7 และ 10	58
ก-3 ความเข้มข้นของทอเรียม ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5% ค่าการเขย่า (pulse setting no) เท่ากับ 3, 5, 7 และ 10	59
ก-4 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5% ค่าการเขย่า (pulse setting no) เท่ากับ 3, 5, 7 และ 10.....	60
ก-5 ความเข้มข้นของยูเรเนียม ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ ค่าการเขย่าเท่ากับ 7.....	61
ก-6 ความเข้มข้นของทอเรียม ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ ค่าการเขย่าเท่ากับ 7.....	62
ก-7 ความเข้มข้นของธาตุหายาก ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ เข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% ตามลำดับ ค่าการเขย่าเท่ากับ 7.....	63
ก-8 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ในการสกัด ด้วยสารละลายอินทรีย์เข้มข้น 5% โดยปริมาตร.....	64
ก-9 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ในการสกัด ด้วยสารละลายอินทรีย์เข้มข้น 10% โดยปริมาตร.....	65
ก-10 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ในการสกัด ด้วยสารละลายอินทรีย์เข้มข้น 15% โดยปริมาตร.....	66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ก-11	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ในการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์เข้มข้น 20% โดยปริมาตร.....	67
ค-1	อนุกรมสลายตัวของยูเรเนียม (U-238 decay series).....	72
ค-2	ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ยอมให้มีได้บนพื้นผิวต่างๆ.....	74
ง-1	ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายป้อนเข้าและความเข้มข้นที่สกัดได้.....	82

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพหอสกัดสำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลาย.....	12
2.2 แสดงลักษณะการไหลแบบสวนทางกันในกระบวนการสกัด ด้วยตัวทำละลาย.....	14
2.3 สูตรโครงสร้างของสารสกัด TBP.....	21
2.4 ลักษณะการไหลและตำแหน่งของรอยต่อระหว่างวัฏภาคในหอสกัด.....	23
2.5 หอสกัดชนิดไม่ใช้พลังงานกล.....	24
2.6 หอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปแบบหมุน.....	25
2.7 แสดงหอสกัดชนิดใช้พลังงานกลในรูปของการเขย่า.....	25
2.8 เครื่องสกัด Liquid-Liquid Extraction แบบ Pulse Sieve Plate Column.....	26
2.9 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP.....	32
3.1 เครื่องสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column.1.....	35
3.2 เครื่องสกัดแบบ Pulse Sieve Plate Column .2.....	35
4.1 ขั้นตอนการสกัดแยกยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายาก.....	40
4.2 ผลการสกัดยูเรเนียมที่ค่า pulse setting number เป็น 3, 5, 7 และ 10 ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ 5% โดยปริมาตร.....	41
4.3 ผลการสกัดทอเรียมที่ค่า pulse setting number เป็น 3, 5, 7 และ 10 ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ 5% โดยปริมาตร.....	42
4.4 ผลการสกัดธาตุหายากที่ค่า pulse setting number เป็น 3, 5, 7 และ 10 ความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์ 5% โดยปริมาตร.....	43
4.5 ผลการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ความเข้มข้นของ สารละลายอินทรีย์ 5% โดยปริมาตร ค่า pulse setting number เท่ากับ 7.....	44
4.6 ผลการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ความเข้มข้นของ สารละลายอินทรีย์ 10% โดยปริมาตร ค่า pulse setting number เท่ากับ 7.....	45
4.7 ผลการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ความเข้มข้นของ สารละลายอินทรีย์ 15% โดยปริมาตร ค่า pulse setting number เท่ากับ 7.....	46
4.8 ผลการสกัดยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุหายาก ความเข้มข้นของ สารละลายอินทรีย์ 20% โดยปริมาตร ค่า pulse setting number เท่ากับ 7.....	47

คำอธิบาย

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่ที่อยู่ระหว่างการถ่ายเทมวล
C	ความเข้มข้นของธาตุในสารละลาย (ppm)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นเพลต (m)
d _p	ขนาดของหยดของเหลว (m)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (m)
D _{AB}	สัมประสิทธิ์ของการแพร่ (m ² /s)
E _f	ค่าประสิทธิภาพของการสกัด
E _{MD}	ค่าประสิทธิภาพของเมอร์ฟีรี
F	สารละลายป้อน
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
h	ระยะห่างระหว่างแผ่น plate (m)
k	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (m/s)
K _A	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
n	จำนวนครั้งของการเขย่า (s ⁻¹)
N _A	อัตราการถ่ายเทมวลของสาร A
No	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
N _{RE}	Reynolds number (dpVρ/μ)
NTU	จำนวนหน่วยการถ่ายเท
Q	อัตราการไหล (m ³ /s)
R	ราฟฟินาท
RE	ธาตุหายาก
RH	สารสกัด
S	ตัวทำละลาย
t	เวลา (s)
T	อุณหภูมิ (K)

คำอธิบาย

สัญลักษณ์

ความหมาย

TBP	tri-buthyl phosphase
Th	ทอเรียม
U	ยูเรเนียม
V	Superficial velocity (m^3/s)
[A]	ความเข้มข้นของสาร
$\Delta\theta$	แรงขับหรือผลต่างของความเข้มข้นของสาร (mole/litre)
ϕ	โพลต์อัฟ
γ	แรงตึงผิวระหว่างวัฏภาค (N/m^2)
λ	ค่าคงที่ของการสลายตัว
μ	ค่าความหนืดของสารละลายอินทรีย์ (Pa.s)
ρ	ความหนาแน่น (kg/m^3)
v_A	ขนาดโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อน