

ผลกระทบของไอออนของนิกเกิลและโคบอลต์ต่อการทำงานของยูเอเอสบี



นาย ณรงค์ศักดิ์ ธีติธัญญานนท์

# ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-009-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF NICKEL AND COBALT IONS ON THE PERFORMANCE OF UASB



Mr. Narongsak Thitithyanont

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fullfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Environmental Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

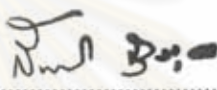
Academic Year 1996

ISBN 974-635-009-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบของไอออนของนิกเกิลและโคบอลต์ต่อการทำงานของยูเอสบี  
โดย นาย ณรงค์ศักดิ์ ชิติธัญญาพันธ์  
ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน คັນจุลเวศม์

---


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ  
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ชุตววรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเรียร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน คันจุลเวศม์)

  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

## พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ดวงศักดิ์ ธิติธัญญานนท์ : ผลกระทบของไอออนของนิกเกิลและโคบอลต์ต่อการทำงานของยูเอสบี (EFFECT OF NICKEL AND COBALT IONS ON THE PERFORMANCE OF UASB) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.มันสิน ดันจุลเวศม์. 182 หน้า. ISBN 974-635-009-9

นิกเกิลและโคบอลต์ เป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์หลักในกระบวนการเมตะบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีเทนซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบมากในชั้นตะกอนและจำเป็นต่อระบบยูเอสบี งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของไอออนของนิกเกิลและโคบอลต์ที่มีต่อสมรรถนะของระบบและลักษณะทางกายภาพของชั้นตะกอน

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ชุดการทดลองกล่าวคือ ในชุดการทดลองที่หนึ่ง ค่าซีไอดีน้ำเข้า 3000 มก./ล. อัตราการสารอินทรีย์ 12 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และเวลากักน้ำ 6 ชั่วโมง ในชุดการทดลองที่สอง ค่าซีไอดีน้ำเข้า 4500 มก./ล. อัตราการสารอินทรีย์ 18 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน และเวลากักน้ำ 6 ชั่วโมง แต่ละชุดการทดลองมี 3 ชุดการทดลองย่อยซึ่งเติมโลหะหนักแตกต่างกันดังนี้ 1) เติมทั้งนิกเกิลและโคบอลต์(ตั้งยูเอสบีชุดที่ 1) 2) เติมนิกเกิลอย่างเดียว(ตั้งยูเอสบีชุดที่ 2)และ 3) เติมโคบอลต์อย่างเดียว(ตั้งยูเอสบีชุดที่3) น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากการเจือจางน้ำเสียประปาและเติมธาตุอาหารได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสให้เพียงพอ มีอัตราส่วนของซีไอดีต่อไอออนของนิกเกิลและโคบอลต์ที่เติมเท่ากับ 100:0.008:0.008 ตามลำดับ

ผลการทดลองชุดที่ 1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1 และ 3 ทั้งคู่เท่ากับ 90% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของตั้งยูเอสบีชุดที่ 2 เท่ากับ 60 % อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 0.24, 0.19 และ 0.22 ลิตร/กรัมซีไอดีที่ถูกกำจัดและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 66%, 48% และ 62% ตามลำดับ สีตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1 และ 3 เป็นสีดำและสีเทาเข้มตามลำดับ ส่วนสีตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 2 เป็นสีขาวปนเหลือง นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1, 2 และ 3 ประมาณ 3, 3.5 และ 4.5 มม.ตามลำดับ ผลการทดลองชุดที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1 และ 3 ได้เท่ากับ 62% และ 80 % ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของตั้งยูเอสบีชุดที่ 2 เท่ากับ 60 % อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 0.29, 0.28 และ 0.23 ลิตร/กรัมซีไอดีที่ถูกกำจัดและเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเท่ากับ 53%, 48% และ 60% ตามลำดับ สีตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1 และ 3 เป็นสีเทาเข้มปนขาวและสีเทาเข้มตามลำดับ ส่วนสีตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 2 เป็นสีน้ำตาลอ่อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดตะกอนของตั้งยูเอสบีชุดที่ 1, 2 และ 3 ประมาณ 4.5, 3.5 และ 4 มม.ตามลำดับ

จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าการเติมโคบอลต์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบยูเอสบีได้อย่างมาก และทำให้ตะกอนนอนมีสีดำคล้ำ ขณะที่การเติมนิกเกิลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเช่นกันแต่ไม่โดดเด่น นอกจากนี้ตะกอนสีดำคล้ำ(สีดำ, สีเทาเข้ม) มีแนวโน้มจะกำจัดซีไอดีได้ดีกว่าตะกอนสีอ่อน(สีน้ำตาลอ่อน, สีขาว)

ภาควิชา ..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา ..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



## C717912 : MAJOR SANITARY ENGINEERING

KEY WORD: UASB / GRANULATION / SLUDGE BLANKET / NICKEL / COBALT

NARONGSAK THITITHANYANONT : EFFECT OF NICKEL AND COBALT IONS ON THE PERFORMANCE OF UASB. THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. MUNSIN

TUNTOOLAVEST, Ph.D. 182 pp. ISBN 974-635-009-9

Nickel and cobalt are the important part of the essential enzymes in the metabolism of methanogenic bacteria which is usually found in the sludge bed and necessary for the UASB system. This study was carried out to investigate the effect of nickel and cobalt ions on the UASB system performance and physical characteristics of sludge.

This study consisted of 2 sets of experiment. In the first experiment, the influent COD was 3000 mg./l, the organic loading rate was 12 kg. COD/m<sup>3</sup>-day and the hydraulic retention time was 6 hr. In the second experiment, the influent COD was 4500 mg./l, the organic loading rate was 18 kg. COD/m<sup>3</sup>-day and the hydraulic retention time was 6 hr. Each set of experiment consisted of 3 individual runs with different metal addition as follows : 1) adding nickel and cobalt (R1), 2) adding nickel only (R2) and 3) adding cobalt only (R3). Synthetic wastewater was prepared by diluting concentrated pineapple juice with tap water and adding sufficient nitrogen and phosphorus nutrients. The ratio of COD to nickel and cobalt ions addition was 100 : 0.008 : 0.008 respectively.

In the first experiment, the result indicated that the COD removal efficiency of both UASBR#1 and UASBR#3 was 90%, while the COD removal efficiency of UASBR#2 was 60%. The methane yield of UASBR#1, UASBR#2 and UASBR#3 was 0.24, 0.19 and 0.22 liters/g.COD removed and the percentages of methane in biogas were 66%, 48% and 62% respectively. The sludge color of UASBR#1 and UASBR#3 was black and dark gray respectively, while the sludge color of UASBR#2 was yellowish white. Furthermore, the sludge granule diameter of UASBR#1, UASBR#2 and UASBR#3 were about 3, 3.5 and 4.5 mm., respectively. In the second experiment, the result indicated that the COD removal efficiency of UASBR#1 and UASBR#3 were 62% and 80% respectively, while COD removal efficiency of UASBR#2 was 60%. The methane yield of UASBR#1, UASBR#2 and UASBR#3 was 0.29, 0.28 and 0.23 liters/g.COD removed and the percentages of methane in biogas were 53%, 48% and 60% respectively. The sludge color of UASBR#1 and UASBR#3 was dark gray and white, and dark gray respectively while the sludge color of UASBR#2 was light brown. The sludge granule diameter of UASBR#1, UASBR#2 and UASBR#3 were about 4.5, 3.5 and 4 mm., respectively.

In conclusion, cobalt addition significantly increases the efficiency of UASB system and blackens the sludge bed color, meanwhile nickel addition also increases the system efficiency but to a lesser degree. Furthermore, the dark color sludge bed (black, dark gray) tends to remove COD better than the light color sludge bed (light brown, white).

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต *ณรงค์ศักดิ์ อธิวิทิตานนท์*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ส.ค.*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. มั่นสิน คัมภลเวสม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่  
ท่านกรุณาแนะแนวทางในการวิจัย เป็นต้นแบบที่เกื้อหนุน มอบโอกาสและผลักดันให้เกิดวิจารณ์ใน  
เชิงวิชาการอย่างเต็มที่ อีกทั้งให้กำลังใจและสร้างทัศนคติที่ดีต่อการทำงานวิจัย ทำให้ข้าพเจ้ามีความมุ่ง  
มั่นในการทำงานวิจัยนี้ อันเป็นผลให้งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท SAN. E 68 Consulting Engineering . Co . Ltd ซึ่งได้อนุเคราะห์อุปกรณ์การ  
ทดลองหลักทั้งหมด อันได้แก่ ถังปฏิกริยาซูเอเอสบี 3 ถัง , เครื่องวัดก๊าซ 3 เครื่อง , ถังบรรจุน้ำสัปะรด  
เข้มข้น รวมทั้งสารละลาย  $\text{NiSO}_4$  , สารละลาย  $\text{CoCl}_2$  , สารละลายมาตรฐานของ Ni , Fe , Cu , Co

ขอขอบคุณบริษัท สยามอุตสาหกรรมการเกษตรสัปะรด จก. (Saico ) ซึ่งได้อนุเคราะห์น้ำ  
สัปะรดเข้มข้นตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณที่ จุลพงษ์ ทวีศรี ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและเอกสารอ้างอิงจำนวนมาก

ขอขอบคุณบริษัท โปรเกรส เทคโนโลยี คอนซัลแทนด์ จำกัด ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์สำนักงานจน  
รายงานฉบับนี้เสร็จในเวลาอันสั้น

ขอขอบคุณพี่มิตรที่มีส่วนเกื้อหนุนทั้งทางตรงและทางอ้อม

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนส่วนหนึ่งของทุนวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาอำนวยความสะดวก  
ในงานวิจัยทุกท่าน

ท้ายที่สุดนี้ คุณความดีอันพึงมีจากการวิจัยนี้ ขอมอบแก่บิดา มารดา ผู้ให้การสนับสนุนทางการ  
ศึกษาของบุตรตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	3
2.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 3 ทฤษฎีและแนวคิด.....	4
3.1 จุลชีวะและชีวเคมีของกระบวนการไร้ออกซิเจน.....	4
3.1.1 ขั้นตอนที่ 1 : Solubilisation ( or Hydrolysis).....	6
3.1.2 ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis.....	6
3.1.3 ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis from Short -chain fatty acid.....	10
3.1.4 ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis.....	10
3.2 ตัวอย่างวิถีชีวเคมีที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis).....	11
3.3 บทบาทของไฮโดรเจนที่มีต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	13
3.3.1 ผลกระทบต่อการสร้างกรดไขมันระเหย.....	14
3.3.2 ผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก.....	14
3.4 ความสำคัญของไอออนของโลหะกับจุลชีพแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	15
3.4.1 ไอออนโลหะในธรรมชาติที่สำคัญต่อสิ่งมีชีวิต.....	15
3.4.2 กลไกการนำโลหะเข้าสู่เซลล์ของจุลชีพกลุ่มarchaeobacteria.....	17
3.4.3 ประโยชน์และโทษของโลหะต่อระบบดำรงชีวิตแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	21
3.4.4.1 ประโยชน์ของโลหะต่อแบคทีเรีย.....	22
3.4.4.2 ความเป็นพิษ(Toxicity)ของโลหะต่อแบคทีเรีย.....	30
3.5 ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket,UASB process).....	31
3.5.1 ลักษณะและการทำงานของระบบยูเอเอสบี.....	33
3.5.2 กลไกการเกิดเม็คหรือเกล็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	37



## สารบัญ(ต่อ)

3.5.3	ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาวะแวดล้อมและความต้องการของจุลินทรีย์.....	40
3.5.3.1	อุณหภูมิ.....	40
3.5.3.2	พีเอช กรดไขมันระเหย และสภาพต่าง.....	40
3.5.3.3	ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน.....	41
3.5.3.4	ความต้องการสารอาหารที่จำเป็น.....	42
3.5.3.5	สารพิษ.....	43
3.6	การศึกษาที่ผ่านมา.....	45
บทที่ 4	แผนงานและการดำเนินการวิจัย.....	49
4.1	แผนการทดลอง.....	49
4.2	การเตรียมน้ำเสีย.....	50
4.3	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	51
4.3.1	ถังยูเอสบี.....	51
4.3.2	เครื่องสูบน้ำชนิดรีดสาย.....	52
4.3.3	เครื่องวัดปริมาณก๊าซ.....	52
4.4	การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์.....	58
4.4.1	การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	58
4.4.2	การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	58
4.5	การวัดและวิเคราะห์ก๊าซ.....	59
บทที่ 5	ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล.....	60
5.1	ขั้นตอนการทำวิจัย.....	60
5.2	ผลของนิกเกิลและโคบอลต์ที่มีต่อการทำงานของยูเอสบี.....	62
5.2.1	ลักษณะทางกายภาพของชั้นตะกอน.....	62
5.2.2	พีเอช.....	69
5.2.3	กรดไขมันระเหยและสภาพต่าง.....	72
5.2.3.1	กรดไขมันระเหย.....	72
5.2.3.2	สภาพต่าง.....	78
5.2.4	ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	79
5.2.5	ของแข็งแขวนลอยในน้ำออกและในชั้นตะกอน.....	87
5.2.6	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	89
5.2.7	ชนิดของจุลชีพภายในถังยูเอสบี.....	91



## สารบัญ(ต่อ)

5.2.8	โออาร์ที.....	93
5.2.9	ปริมาณโลหะ.....	93
5.3	ผลของนิกเกิลและโคบอลต์ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆภายในชั้นตะกอน.....	96
5.3.1	พีเอชภายในชั้นตะกอน.....	96
5.3.2	กรดไขมันระเหย ภายในชั้นตะกอน.....	96
5.3.3	สภาพค่า.....	106
5.3.4	ซีไอดี.....	108
5.3.5	ของแข็งแขวนลอยในถังยูเอสบีและเปอร์เซ็นต์โวลไทล์ของตะกอน.....	108
5.3.6	ปริมาณโลหะ.....	111
5.4	อิทธิพลของไอออนนิกเกิลและโคบอลต์ต่อการเดินระบบของยูเอสบี.....	116
5.4.1	การฟื้นฟูประสิทธิภาพเนื่องจากโคบอลต์.....	116
5.4.2	ปรากฏการณ์แบ่งเฟสปฏิกิริยาภายในชั้นตะกอน.....	119
5.4.3	สมมติฐานของการแบ่งเฟสภายในชั้นตะกอน.....	120
5.4.4	สมมติฐานการเกิดการไหลแบบลัดวงจรของน้ำในถังยูเอสบี.....	123
บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	125
6.1	สรุปผลการทดลอง.....	125
6.2	แนวทางแก้ปัญหาในการวิจัย.....	126
6.3	แนวทางการวิจัยต่อเนื่อง.....	127
บทที่ 7	ความสำคัญด้านทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....	128
	รายการอ้างอิง.....	129
	ภาคผนวก.....	135
	ประวัติผู้เขียน.....	182

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	บทบาทของโลหะบางตัวในปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	22
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างเอ็นไซม์ที่ต้องการนิกเกิล.....	25
ตารางที่ 3.3	ตัวอย่างของเอ็นไซม์ที่ต้องการ โคเอ็นไซม์ บี12.....	28
ตารางที่ 3.4	แสดงจำนวนโรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ UASB ก่อนเดือนกันยายน ค.ศ. 1990.....	34
ตารางที่ 3.5	วัตถุประสงค์ในติดตั้งอุปกรณ์แยกสามสถานะ (GSS Device) สำหรับระบบยูเอเอสบี.....	36
ตารางที่ 3.6	สรุปแนวทางและข้อแนะนำในการออกแบบอุปกรณ์แยกสามสถานะ (GSS Device).....	36
ตารางที่ 3.7	ผลของแอมโมเนียในโตรเจนต่อระบบบำบัดน้ำแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	44
ตารางที่ 4.1	การเปลี่ยนแปลงระดับที่การระบรทุกสารอินทรีย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดี.....	50
ตารางที่ 4.2	ส่วนประกอบของสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เติมในน้ำเข้า.....	50
ตารางที่ 4.3	สรุปลักษณะจำเพาะของถังยูเอเอสบีที่ใช้ในการทดลองที่เวลากักน้ำเท่ากับ 6 ชั่วโมง.....	52
ตารางที่ 4.4	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	58
ตารางที่ 4.5	แผนการเก็บและการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ.....	59
ตารางที่ 5.1	แสดงค่าเฉลี่ยพีเอชของน้ำออกจากถังยูเอเอสบีทั้งสามถัง.....	70
ตารางที่ 5.2	แสดงค่าเฉลี่ยของกรดไขมันระเหยของน้ำออกและน้ำภายในถังยูเอเอสบี (เหนือชั้นตะกอนนอน).....	73
ตารางที่ 5.3	แสดง ค่าเฉลี่ยของสภาพต่างและสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างของน้ำภายในถัง ยูเอเอสบีเหนือชั้นตะกอนนอนและน้ำออก.....	78
ตารางที่ 5.4	แสดงค่าเฉลี่ยของซีไอดีของน้ำออกและเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอดี.....	80
ตารางที่ 5.5	แสดงตะกอนแขวนลอยในน้ำออกและในชั้นตะกอนนอน.....	89
ตารางที่ 5.6	แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบที่สภาวะคงตัว.....	89
ตารางที่ 5.7	แสดงสมมูลของปริมาณซีไอดีในระบบ.....	91
ตารางที่ 5.8	แสดงค่าไออาร์ทีเฉลี่ยของน้ำออกและเหนือชั้นตะกอนนอน.....	93
ตารางที่ 5.9	แสดงปริมาณของนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก และทองแดงในน้ำเข้าและน้ำออกจากระบบ.....	95
ตารางที่ 5.10	ข้อมูลการเก็บตัวอย่างตามความสูงของชุดควบคุม อัตราการระบรอินทรีย์เท่ากับ 12 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	97
ตารางที่ 5.11	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกิริยาที่ 1 อัตราการระบร อินทรีย์เท่ากับ 12 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	98
ตารางที่ 5.12	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกิริยาที่ 2 อัตราการระบร อินทรีย์เท่ากับ 12 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	99

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ 5.13	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกริยาที่ 3 อัตราการระสารอินทรีย์เท่ากับ 12 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	100
ตารางที่ 5.14	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกริยาที่ 1 อัตราการระสารอินทรีย์เท่ากับ 18 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	101
ตารางที่ 5.15	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกริยาที่ 2 อัตราการระสารอินทรีย์เท่ากับ 18 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	102
ตารางที่ 5.16	แสดงข้อมูลตามตำแหน่งต่างๆตามลำดับความสูงของถังปฏิกริยาที่ 3 อัตราการระสารอินทรีย์เท่ากับ 18 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วันภายใต้สภาวะคงตัว.....	103
ตารางที่ 5.17	ข้อกำหนดเพื่อแยกประเภทการใช้งานของตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักหรือสารเคมีของรัฐแมสซาชูเซต.....	113



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญรูป

รูปที่ 3.1	ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย.....	5
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการสลายแบบไร้ออกซิเจน และกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง.....	7
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการย่อยสลายแป้ง ภายใต้สภาวะ high และ low hydrogen partial pressure.....	8
รูปที่ 3.4	การย่อยสลายกลูโคสโดยวิธีทาง EMP (Embden Meyerhof pathway).....	9
รูปที่ 3.5	แสดงธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต.....	15
รูปที่ 3.6	กลไกการแลกเปลี่ยนแอมโมเนียกับโปแตสเซียม(NH <sub>3</sub> /K <sup>+</sup> Exchange).....	20
รูปที่ 3.7	ผลของปริมาณโลหะต่างที่มีต่อการทำงานของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	21
รูปที่ 3.8	กลไกทางเคมีของเอ็นไซม์ไฮโดรจิเนส.....	25
รูปที่ 3.9	การสร้างอะซิเตตจากแบคทีเรียสร้างอะซิเตตโดยCO dehydrogenase.....	26
รูปที่ 3.10	โครงสร้างโคเอ็นไซม์ F-430 ที่มีนิกเกิลเป็นไอออนศูนย์กลาง.....	27
รูปที่ 3.11	แสดงการสร้างมีเทนจากสารอาหารหลายชนิด.....	28
รูปที่ 3.12	โครงสร้างวิตามินบี12 ที่มีโคบอลต์เป็นไอออนศูนย์กลาง.....	29
รูปที่ 3.13	ลักษณะของระบบต่างๆ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	32
รูปที่ 3.14	ลักษณะทั่วไปของถัง UASB.....	35
รูปที่ 3.15	ลักษณะรูปแบบต่างๆ ของอุปกรณ์แยกสามสถานะ (GSS Device)และอุปกรณ์ ในระบบ UASB.....	35
รูปที่ 3.16	แสดงการลอยขึ้นของตะกอนจุลินทรีย์โดยก๊าซที่เกิดขึ้นในชั้นตะกอนนอน.....	37
รูปที่ 3.17	แสดงการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ และภาวะบรรทุกระหว่าง ขั้นตอนการเกิดเม็ดตะกอนจุลินทรีย์.....	38
รูปที่ 4.1	แผนผังการเตรียมน้ำเข้า.....	51
รูปที่ 4.2	แสดงส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ใช้ในการทดลอง .....	53
รูปที่ 4.3	แสดงส่วนประกอบถังปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ที่ใช้ในการทดลอง .....	54
รูปที่ 4.4	เครื่องวัดปริมาณก๊าซ (ศักดิ์ชัย 2527).....	55
รูปที่ 4.5	เครื่องวัดปริมาณก๊าซแบบปรับปรุงจากศักดิ์ชัย ,2527.....	56
รูปที่ 4.6	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัย.....	57
รูปที่ 5.1	แสดงการติดตั้งชุดการทดลองภายในห้องปฏิบัติการปริญญาโทวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาฯ.....	61
รูปที่ 5.2	แสดงชั้นตะกอนลอยที่ก่อตัวได้ อุปกรณ์แยกก๊าซ-ของแข็ง(GSS)จนมีลักษณะคล้ายเนื้อขนม เค้ก.....	64
รูปที่ 5.3	แสดงชั้นตะกอนนอนในถังยูเอเอสบีแต่ละถังภายหลังการถ่ายตะกอนครั้งที่สอง.....	66
รูปที่ 5.4	แสดงชั้นตะกอนนอนแต่ละถังที่อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 18 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน.....	68



## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.5 แสดงค่าพีเอชของน้ำออกภายในถังยูเอสบีที่เหนือชั้นตะกอนนอนและของน้ำออกจากถังยูเอสบี ดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	71
รูปที่ 5.6 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยและสภาพค่างของน้ำภายในถังยูเอสบีที่เหนือชั้นตะกอนนอนและในน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 1.....	74
รูปที่ 5.7 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยและสภาพค่างของน้ำภายในถังยูเอสบีที่เหนือชั้นตะกอนนอนและในน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 2.....	75
รูปที่ 5.8 แสดงปริมาณกรดไขมันระเหยและสภาพค่างของน้ำภายในถังยูเอสบีที่เหนือชั้นตะกอนนอนและในน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 3.....	76
รูปที่ 5.9 แสดงปริมาณซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 1.....	81
รูปที่ 5.10 แสดงปริมาณซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 2.....	82
รูปที่ 5.11 แสดงปริมาณซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 3.....	83
รูปที่ 5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 1.....	84
รูปที่ 5.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 2.....	85
รูปที่ 5.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีของน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 3.....	86
รูปที่ 5.15 แสดงค่าตะกอนแขวนลอยในชั้นตะกอนลอยและในน้ำออกของถังยูเอสบีดังที่ 1 ดังที่ 2 และดังที่ 3.....	88
รูปที่ 5.16 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละถังยูเอสบี.....	90
รูปที่ 5.17 แสดงภาพถ่ายแบคทีเรียในตะกอนจากถังยูเอสบีแต่ละถังจากกล้องจุลทรรศน์.....	92
รูปที่ 5.18 แสดงค่าพีเอชที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบี ดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	104
รูปที่ 5.19 แสดงปริมาณกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	105
รูปที่ 5.20 แสดงสภาพค่างและสัดส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพค่างที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	107
รูปที่ 5.21 แสดงปริมาณซีโอดีที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	109
รูปที่ 5.22 แสดงปริมาณตะกอนลอยและเปอร์เซ็นต์โวลไทล์ที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	110
รูปที่ 5.23 แสดงปริมาณโลหะตัวต่างๆที่สะสมในตะกอนที่ระดับความสูงต่างๆของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	112
รูปที่ 5.24 แสดงพารามิเตอร์ตัวต่างๆที่จุดเก็บตัวอย่างที่อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ12 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ของถังยูเอสบีดังที่หนึ่ง ดังที่สอง ดังที่สาม .....	114

### สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.25 แสดงพารามิเตอร์ตัวต่างๆที่จุดเก็บตัวอย่างที่อัตราภาระสารอินทรีย์ เท่ากับ18 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ของถังยูเอสบีถังที่หนึ่ง ถังที่สอง ถังที่สาม .....	115
รูปที่ 5.26 แสดงวงจรชีวิตจากการสะสมตัวของกรดไขมันระเหย.....	122
รูปที่ 5.27 จำลองการไหลแบบเลาะช่อง(channelling)ของน้ำในถังยูเอสบี.....	123



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย