# บทที่ 5

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 5.1 ผลการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans*

ในการทดลองช่วงนี้เป็นการเริ่มต้นการวิจัย เพื่อให้ได้มาซึ่งปริมาณเชื้อแบคทีเรียอย่างเพียงพอที่จะทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.4.1 การเพาะเชื้อแบคทีเรียจะเลี้ยงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร หรือขวดที่มีขนาดประมาณ 1 ลิตร โดยใช้ปริมาณแบคทีเรีย 1 มิลลิลิตรต่อสารอาหาร 50 มิลลิลิตร และเติมอากาศโดยใช้ Air Pump ต่อสายยางเข้ากับ pipet แล้วเสียบ pipet ลงในขวดรูปชมพู่ ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าแบคทีเรียจะเจริญเติบโต และจะเปลี่ยนสารอาหารใหม่ จะทำทุก ๆ 7 วัน ซึ่งผลการทดลองก็เป็นไปดังรูปที่ 5.1

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ถึงความเปลี่ยนแปลงในภาชนะเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย สังเกตได้ว่าในวันแรก ๆ (รูปที่ 5.1 (ก.)) ของการเริ่มต้นเพาะเชื้อแบคทีเรีย สีของสารละลายในภาชนะเพาะเลี้ยง ยังเป็นสีขาวขุ่นซึ่งเป็นสีของสารอาหารของแบคทีเรีย เมื่อเวลาผ่านไป 2 - 3 วัน โดยการเติมอากาศอย่างเพียงพอ สีของสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงเข้ม ดังรูปที่ 5.1(ข) - 5.1(ค) ซึ่งแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงในช่วง 3 วันแรกของการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย เกิดจากปฏิกิริยาที่แบคทีเรียมีต่อสารอาหาร ดังสมการต่อไปนี้

$$4FeSO_4.7H_2O + O_2 + 2H_2SO_4 \text{ --------> } \underline{2Fe_2(SO_4)_3} + 9H_2O$$

สมการดังกล่าวข้างต้นเป็นสมการที่เคยกล่าวไว้แล้วในสมการ (3.2) หัวข้อ 3.3 ซึ่งรายละเอียดของปฏิกิริยาก็คือ *Thiobacillus ferrooxidans* จะออกซิไดซ์ $Fe^{2+}$ ให้กลายเป็น $Fe^{3+}$ ลักษณะทางกายภาพของภาชนะเพาะเลี้ยงจึงเห็นเป็นสีแดงเข้ม ดังรูปที่ 5.1(ค.) - 5.1(ฉ.)

ในวันท้าย ๆ ของการเพาะเลี้ยงเชื้อแต่ละชุด ซึ่งกินเวลาประมาณ 1 สัปดาห์นั้น จะเห็นได้ว่าสีของสารอาหารได้เปลี่ยนเป็นสีแดงเข้มใส ดังรูปที่ 5.1(ง) - 5.1(ฉ) ซึ่งเป็นเวลาที่ควรจะมีการเปลี่ยนสารอาหารใหม่ แล้วเริ่มทำการเพาะเลี้ยงใหม่ ส่วนเชื้อแบคทีเรียที่เหลือก็เก็บไว้ในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส ได้ 1 เดือน แต่จากการทดลองครั้งนี้ พบว่าสามารถเก็บเชื้อได้นานถึง 6 สัปดาห์ถึง 2 เดือน ถ้าเลยเวลานี้แล้วไม่ควรที่จะใช้แบคทีเรียชุดนี้อีกต่อไป

เมื่อได้เชื้อแบคทีเรียแล้ว จึงนำแบคทีเรียไปถ่ายรูปด้วยกล้อง Electron Microscope ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า จะเห็นลักษณะของแบคทีเรียเป็นท่อน ๆ (Bacillus) ขนาดประมาณ 1-2 ไมครอน ดังรูปที่ 5.2 ซึ่งจะเห็นทั้งลักษณะการอยู่รวมกันแบบเป็นกลุ่มก้อนและอยู่อย่างอิสระ

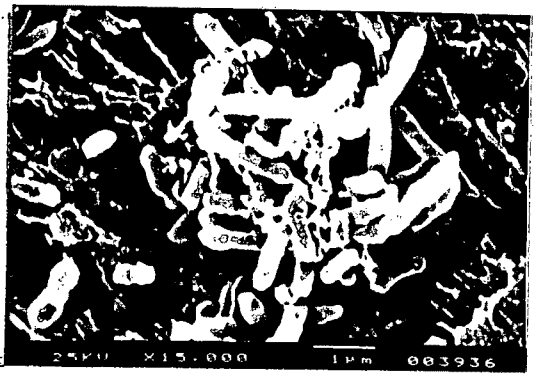
## 5.2 ผลการปรับสภาพเชื้อให้มีความเคยชินกับน้ำเสียสังเคราะห์

ในการปรับสภาพเชื้อให้มีความเคยชินกับสภาพน้ำเสีย จะทำการปรับปรุงพันธุ์ในขวดปริมาตร 1 ลิตร โดยใช้สารอาหารเพียง 500 มิลลิลิตร และจะผันแปรปริมาณตะกอนซัลไฟด์ในปริมาณต่าง ๆ โดยตะกอนซัลไฟด์ที่เติมลงในขวดปรับสภาพเชื้อมีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 5.3 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น แบคทีเรียต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวให้เคยชินนานกว่าเมื่อปริมาณโลหะหนักน้อย ๆ สังเกตได้จากสีของสารละลายในขวดที่ทำการปรับปรุงพันธุ์ขวดที่เติมตะกอน NiS ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร 4 และ 2 มิลลิลิตร ( 2 ขวดทางซ้ายมือ ) เห็นได้ว่าในวันที่ 2 (รูปที่ 5.3 (ข.)) ขวดที่เติม NiS 2 มิลลิลิตร จะเริ่มมีสีแดงแต่ขวดที่เติม NiS 4 มิลลิลิตร จะยังไม่ปรากฏสี และในทำนองเดียว

(ก.)

(ข.)

(ค.)

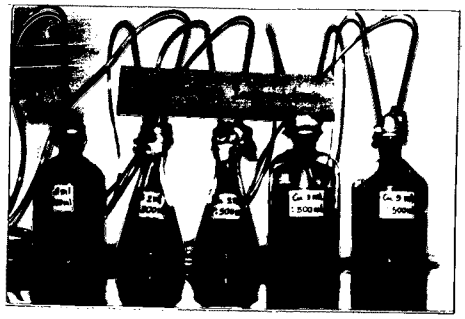



(ง.)

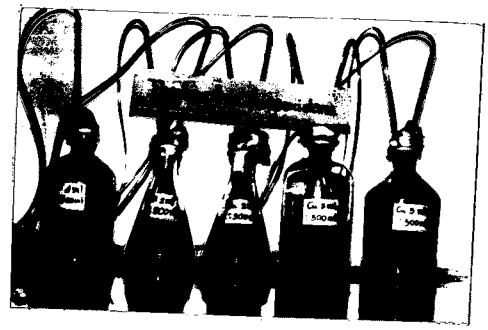
รูปที่ 5.2

แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนของ *Thiobacillus ferrooxidans*

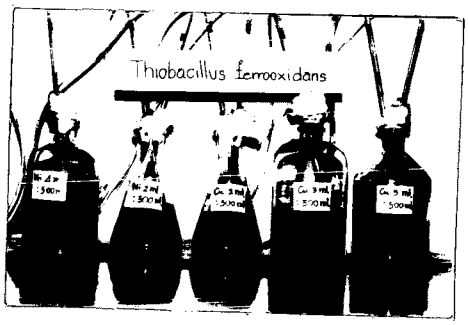
ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า



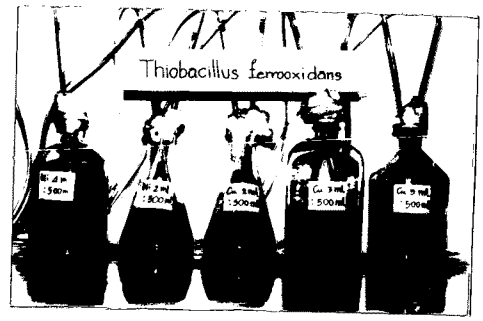
(ก.) วันที่ 1



(ข.) วันที่ 2




(ค.) วันที่ 3




(ง.) วันที่ 4

(จ.) วันที่ 5

รูปที่ 5.3

แสดงการปรับปรุงเชื้อ ***Thiobacillus ferrooxidans*** ให้มีความเคยชิน
กับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเลี้ยงเชื้อร่วมกับตะกอนซัลไฟด์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

กับขวดปรับปรุงพันธ์ 3 ขวดทางขวามือที่มีการเติม CuS ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร 2,3, และ 5 มิลลิลิตร ก็จะให้ผลในลักษณะเดียวกัน คือขวดที่เติม CuS 5 มิลลิลิตร จะปรากฏสีช้ากว่าขวดที่เติม CuS เพียง 2,3 มิลลิลิตร

5.3 ผลการทดลองแบบทีละเท ( Batch Process )

5.3.1 ผลทางกายภาพ

ในขั้นแรกเมื่อทำการทดลอง จะใช้โลหะหนักความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติม $FeSo_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร เป็นสารอาหารในภาชนะขนาด 5 ลิตร และเติมอากาศอย่างเพียงพอด้วย Air Blower เพื่อการ Mixing ไปในตัว ผลการทดลองปรากฏดังตารางที่ 5.1 , 5.2 ,และ 5.3 เมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 5.4 , 5.5 และ 5.6

จากตารางที่ 5.1 ถึง 5.3 และรูปที่ 5.4 ถึง 5.6 ซึ่งเป็นผลการปฏิบัติการแบบทีละเทของ CuS , NiS ,และ ZnS ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าปฏิบัติการแบบทีละเทจะใช้เวลาประมาณ 10 วัน ภายในระยะเวลา 10 วันนี้สังเกตได้ว่า pH ของสารละลายจะลดลงจากเริ่มต้น คือประมาณ 4.00 ลงมาอยู่ที่ 2.2-2.5 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมของการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* ค่า pH ที่ลดลงนี้ก็สอดคล้องกับค่า ORP ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ pH จะเริ่มปรับตัวคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 5-6 วัน และ ORP ก็จะเริ่มคงที่และเป็นค่าที่อยู่ในช่วงสูง ซึ่งนับว่าเป็นการยืนยันผลการ Leaching ว่าถึงจุดที่การ Leaching เริ่มสมบูรณ์ เพราะอยู่ในช่วง pH ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans*

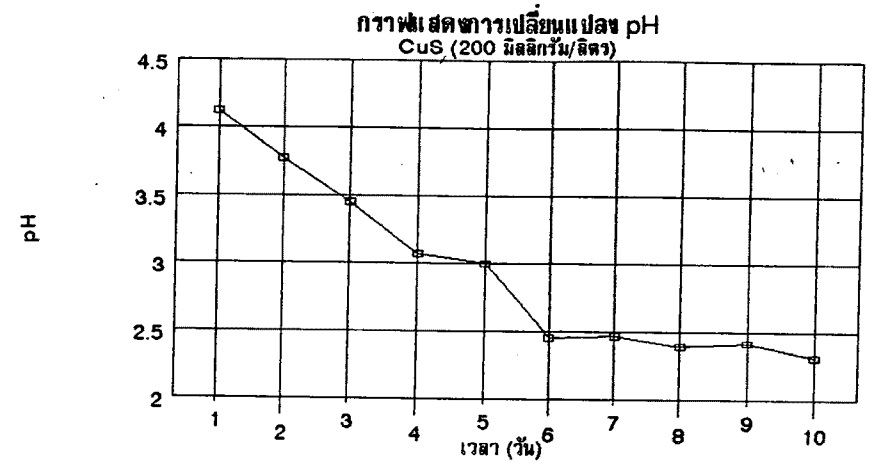
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้และค่า Bacterial Leaching ( ความเข้มข้นของ CuS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร )**

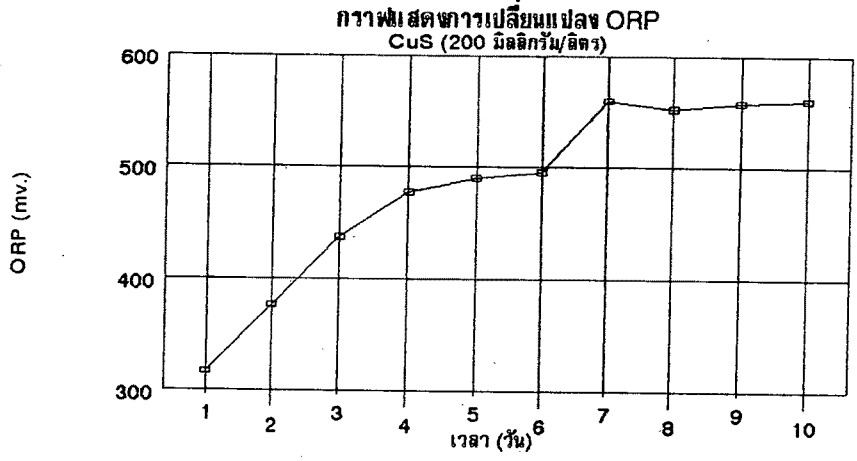
| DATE | pH | ORP | SS |
|---|---|---|---|
| 1 | 4.12 | 317 | 60.00 |
| 2 | 3.77 | 377 | 73.33 |
| 3 | 3.45 | 438 | 140.00 |
| 4 | 3.07 | 478 | 190.00 |
| 5 | 3.00 | 490 | 206.67 |
| 6 | 2.46 | 496 | 216.67 |
| 7 | 2.47 | 560 | 231.67 |
| 8 | 2.40 | 552 | 243.33 |
| 9 | 2.42 | 558 | 223.33 |
| 10 | 2.31 | 560 | 226.67 |

**หมายเหตุ :**

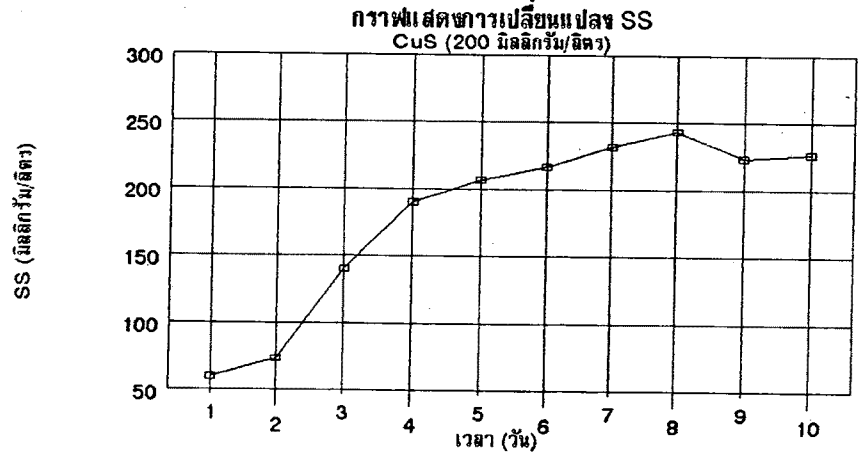
เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร




(ก.)




(ข.)




(ค.)

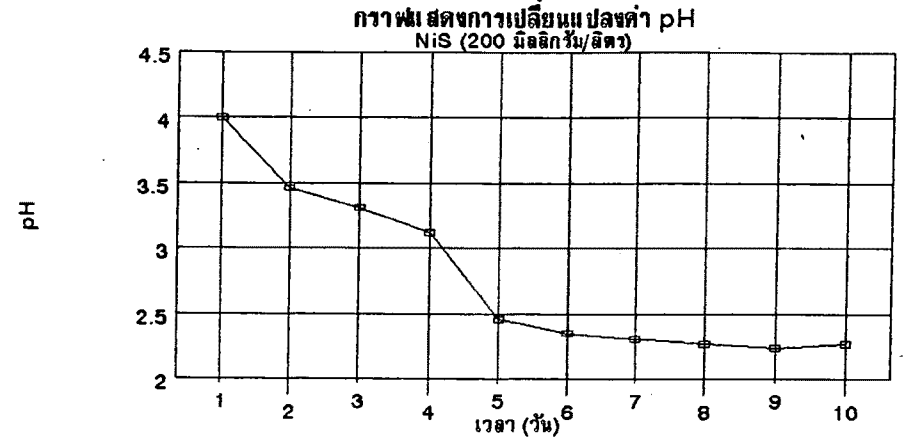
**รูปที่ 5.4** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า ต่าง ๆ ที่วัดได้ขณะทำ Bacterial Leaching ในการละลายแบบมีสารเติม ความเข้มข้นของ CuS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

**ตารางที่ 5.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้และค่า Bacterial Leaching**
**( ความเข้มข้นของ NiS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร )**

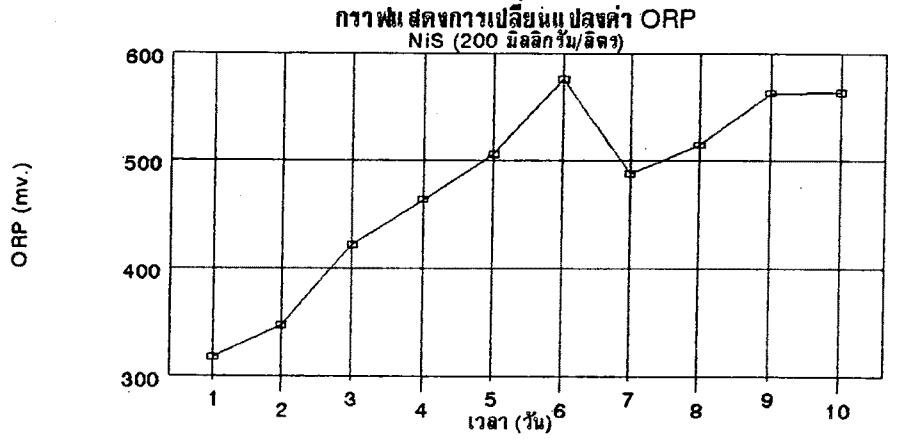
| DATE | pH | ORP | SS |
|---|---|---|---|
| 1 | 4.00 | 318 | 66.67 |
| 2 | 3.46 | 347 | 193.33 |
| 3 | 3.31 | 422 | 160.00 |
| 4 | 3.12 | 464 | 173.33 |
| 5 | 2.46 | 506 | 186.67 |
| 6 | 2.35 | 576 | 160.00 |
| 7 | 2.31 | 488 | 183.33 |
| 8 | 2.27 | 515 | 193.33 |
| 9 | 2.24 | 563 | 210.00 |
| 10 | 2.27 | 564 | 193.33 |

**หมายเหตุ :**

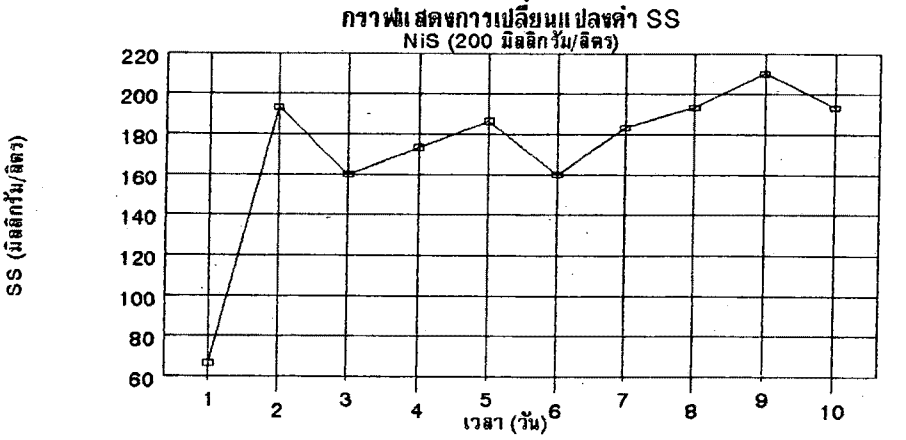
เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร




(ก.)




(ข.)




(ค.)

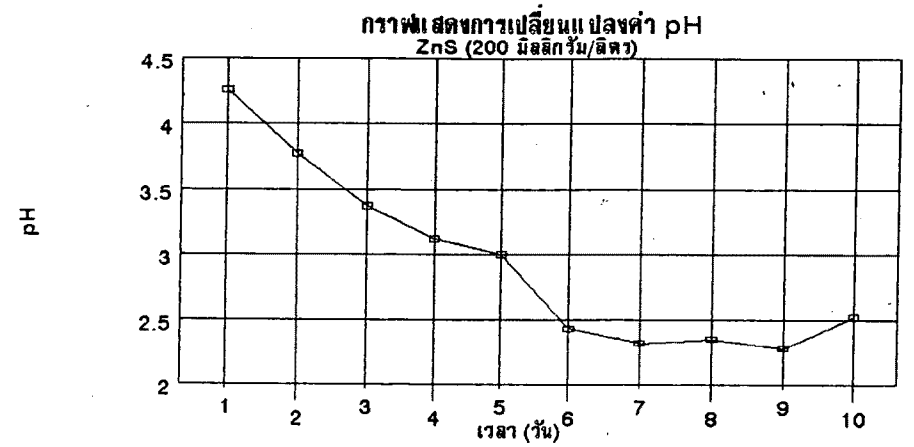
**รูปที่ 5.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า pH ORP และ SS ในการทดลองแบบมีและไม่มีแบคทีเรีย ที่ความเข้มข้นของ NiS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 ต่อลิตร**

**ตารางที่ 5.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่วัดได้และค่า Bacterial Leaching ความเข้มข้นของ ZnS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร**

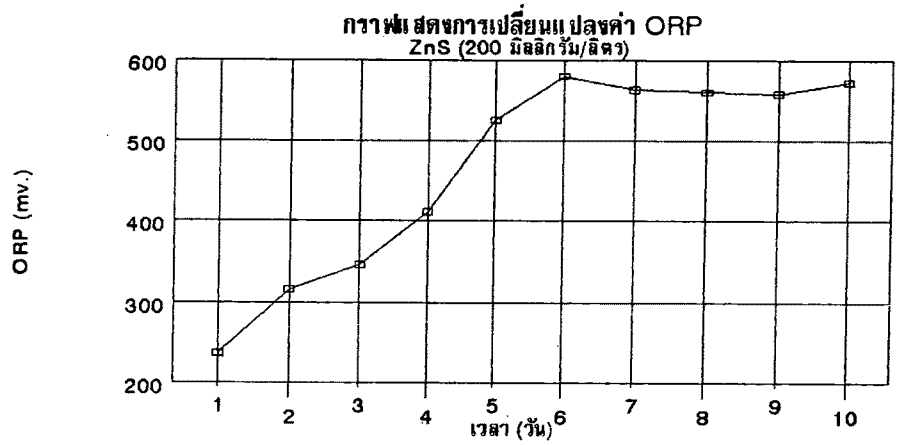
| DATE | pH | ORP | SS |
|---|---|---|---|
| 1 | 4.26 | 237 | 76.67 |
| 2 | 3.77 | 316 | 90.00 |
| 3 | 3.37 | 346 | 116.67 |
| 4 | 3.12 | 412 | 153.33 |
| 5 | 3.00 | 525 | 166.67 |
| 6 | 2.43 | 580 | 220.00 |
| 7 | 2.32 | 563 | 200.00 |
| 8 | 2.35 | 560 | 236.67 |
| 9 | 2.28 | 558 | 213.33 |
| 10 | 2.52 | 572 | 236.67 |

**หมายเหตุ** :

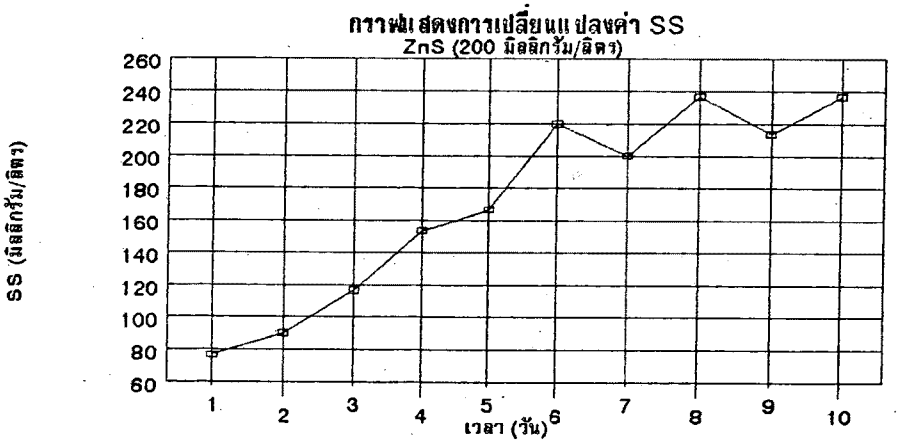
เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร




(ก.)




(ข.)




(ค.)

**รูปที่ 5.6** กราฟแสดงความสามารถในการทำ Bacterial Leaching ในการหลอมของสังกะสี ความเข้มข้นของ ZnS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

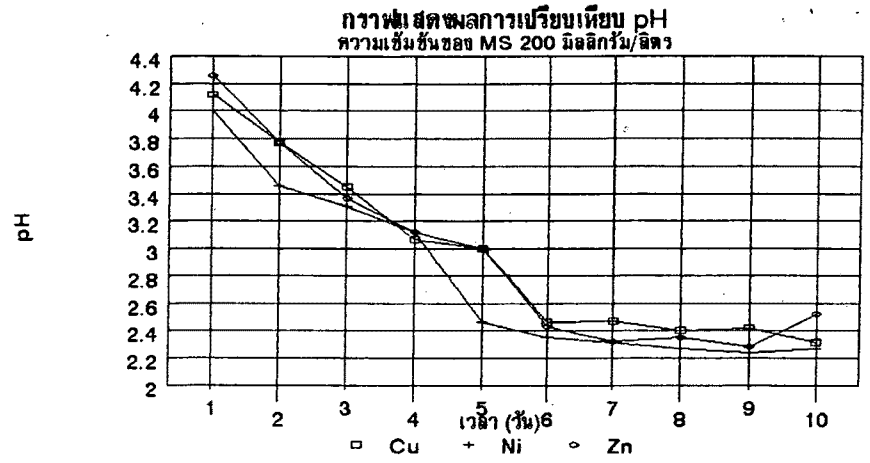
รูปที่ 5.7 จะเป็นการนำรูปที่ 5.4 , 5.5 , และ 5.6 มาพล็อตรวมกัน เพื่อที่จะได้เห็นผลการทดลองได้อย่างชัดเจน คือในรูปที่ 5.7(ก.) นั้นการ Leaching โลหะซัลไฟด์ทั้ง 3 ชนิด คือ CuS , NiS ,และ ZnS ค่า pH ขณะทำการทดลองนั้นลดลงตลอดเวลา จนถึงจุดที่ pH เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของ *Thiobacillus ferrooxidans* คือประมาณ 2.2-2.5 ซึ่งตรงกับประมาณวันที่ 5 ของการทดลองและเมื่อนำมาพิจารณาประกอบร่วมกับรูปที่ 5.7 (ข.) ก็จะพบว่าประมาณวันที่ 5 ของการทดลอง ค่า ORP เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงระดับ 500 mv. ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.5.2 ทำให้ค่า SS มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.7(ค.)

5.3.2 ผลการ Leaching โลหะซัลไฟด์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

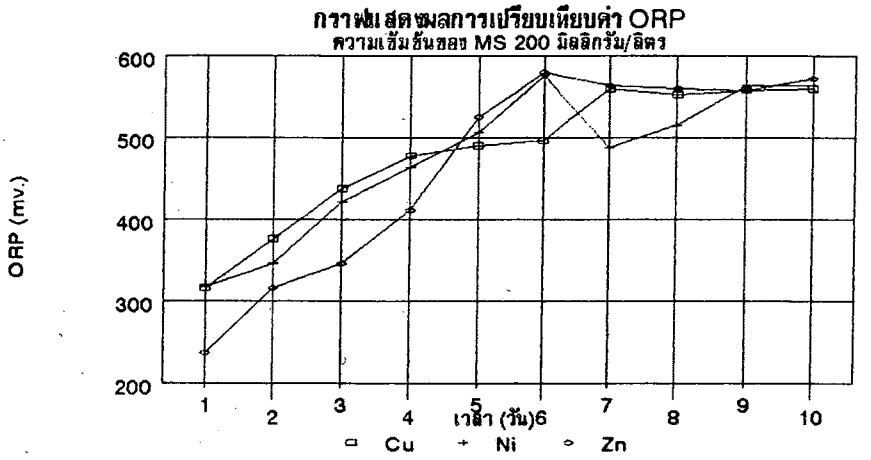
ตารางที่ 5.4 เป็นผลการวัดค่าการละลายของโลหะหนัก 3 ชนิดคือ Cu, Ni Zn ด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion เมื่อพิจารณาจากตารางจะเห็นได้ว่าในการทดลองแบบทีละเท โดยใช้ความเข้มข้นของโลหะซัลไฟด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และ $FeSO_4.7H_2O$ 1 กรัมต่อลิตรนั้น *Thiobacillus ferrooxidans* สามารถสกัด Cu ได้เต็ม 100 % ตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลอง และสกัด Ni ได้ 100 % ในวันที่ 10 ส่วน Zn นั้นเมื่อครบวันที่ 10 ถูกสกัดออกมาได้ 55 %

รูปที่ 5.8 เป็นการนำผลในตารางที่ 5.4 มาพล็อต เห็นได้ชัดเจนว่า Zn ถูกสกัดออกมาได้เพียงครึ่งหนึ่งของ Cu และ Ni เท่านั้น

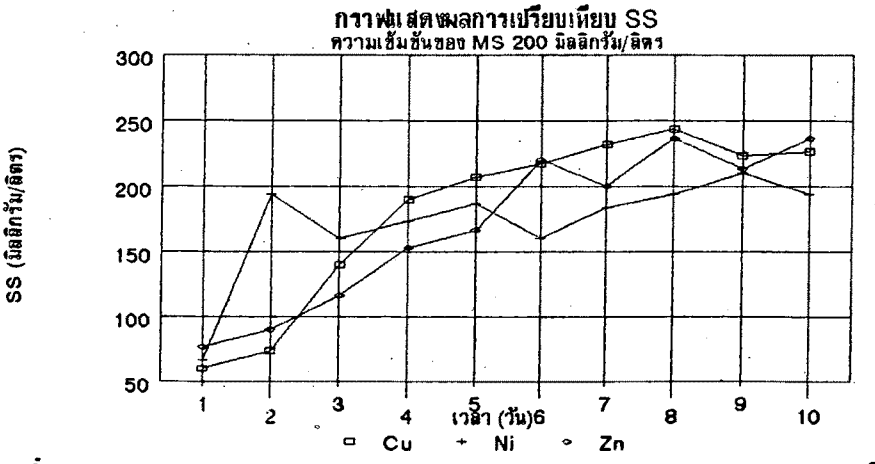
รูปที่ 5.9 เป็นกราฟสรุปรวมการทดลองแบบทีละเท พบว่าประสิทธิภาพการ Leaching จะดีมากเมื่อวันที่ 5 ของการทดลอง (ดังรูปที่ 5.9(ก.))ซึ่งก็สอดคล้องกับค่า pH ดังรูปที่ 5.9(ข.) คือระบบเริ่มปรับ pH ไปสู่ค่า 2.2 - 2.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่ *Thiobacillus Ferrooxidans*เจริญได้ดี และค่า ORP ก็เริ่มสูง ดังรูป 5.9(ค.) เมื่อวันที่ 5 ของการทดลอง แสดงถึงการที่โลหะหนักถูกสกัดออกมา และเมื่อ ORP สูงถึง 500 mv. จะ




(ก.)




(ข.)




(ค.)

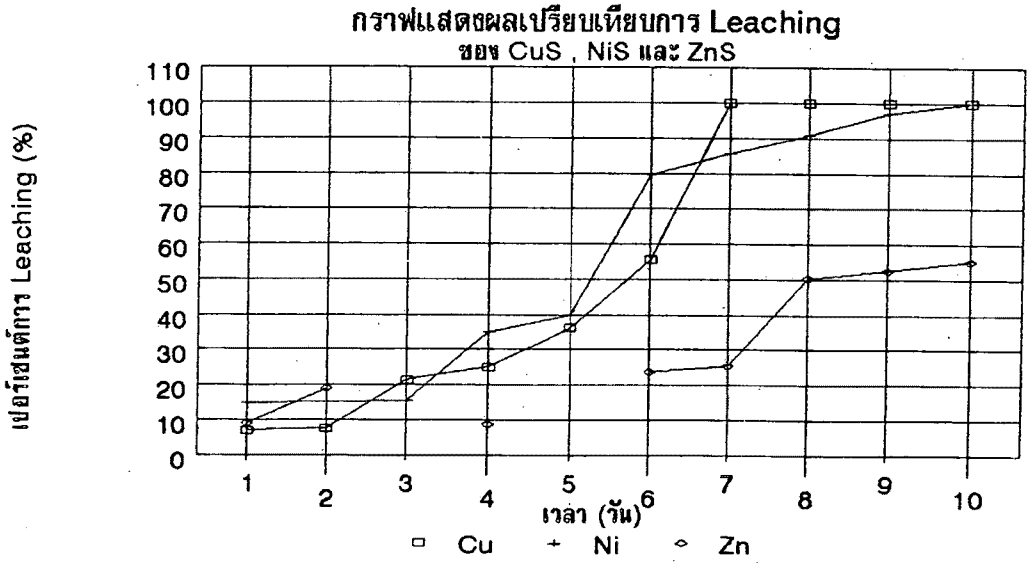
**รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการทำ Bacterial Leaching โดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ผสมที่ความเข้มข้นของ MS 200 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร (การหลอมแบบต่อเนื่อง)**

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการ Leaching ใน Reactor ที่มีความเข้มข้นของ CuS , NiS และ ZnS 200 มิลลิกรัม/ลิตร

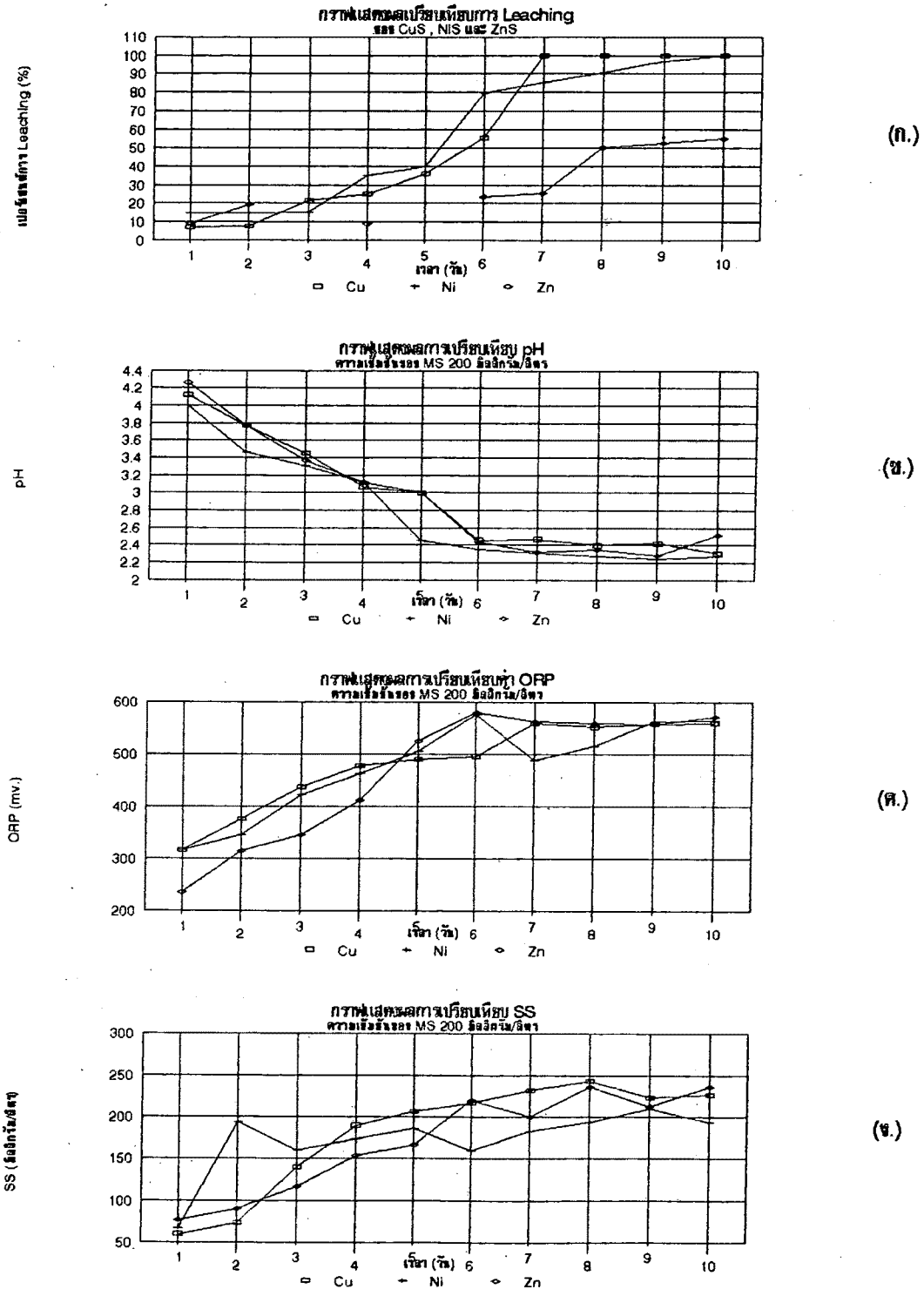
| DATE | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cu | | Ni | | Zn | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 1 | 13.97 | 6.99 | 30.00 | 15.00 | 18.40 | 9.20 |
| 2 | 15.30 | 7.65 | 30.10 | 15.05 | 38.00 | 19.00 |
| 3 | 42.84 | 21.42 | 30.90 | 15.45 | | |
| 4 | 50.21 | 25.11 | 70.20 | 35.10 | 17.60 | 8.80 |
| 5 | 72.56 | 36.28 | 79.60 | 39.80 | | |
| 6 | 111.10 | 55.55 | 159.20 | 79.60 | 47.40 | 23.70 |
| 7 | 233.20 | 100.00 | 171.20 | 85.60 | 50.80 | 25.40 |
| 8 | 227.00 | 100.00 | 181.60 | 90.80 | 100.60 | 50.30 |
| 9 | 233.20 | 100.00 | 194.40 | 97.20 | 104.80 | 52.40 |
| 10 | 232.20 | 100.00 | 208.80 | 100.00 | 110.20 | 55.10 |

หมายเหตุ :– 1: เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

2: การทดลองทั้ง 10 วันเป็นการทดลองแบบทีละเท (Batch Process)




รูปที่ 5.8 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบการ Leaching ใน Reactor ต่างๆ ความเข้มข้นของ CuS , NiS และ ZnS 200 มิลลิกรัม/ลิตร




**รูปที่ 5.9** การชะสกัดผลการ Leaching โลหะซัลไฟด์น้ำยาแร่นิค และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ความเข้มข้น $FeSO_4.7H_2O$ 1 กรัม/ลิตร (ตะกอนจุลินทรีย์) ความเข้มข้นของ โลหะซัลไฟด์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

เกิดตะกอน $Fe(OH)_3$ ทำให้ค่า SS เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.9(ง.)

5.4 ผลการทดลองแบบ Continuous Process

จากผลการทดลองแบบทีละเท จะเห็นได้ว่า *Thiobacillus ferrooxidans* สามารถที่จะ Leaching โลหะหนักปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตรได้หมดภายในระยะเวลาประมาณ 10 วัน ดังนั้นในการทดลองแบบต่อเนื่อง จะเริ่มต้นที่ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแบบทีละเทก่อนประมาณ 10 วัน เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร และดูผลการ Leaching แบบทีละเท ภายในระยะเวลาประมาณ 10 วันต่อจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ที่ระยะเวลาเก็บกัก 4,3,2 และ 1 วัน ตามลำดับ อย่างละ 10 วัน หรือแล้วแต่ความเหมาะสมโดยดูจากความเสถียรของระบบ ซึ่งพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายเป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

5.4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ขณะทำการทดลองและลักษณะทางกายภาพขณะทำการทดลอง Bioleaching กับ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการทดลองครั้งนี้ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์จำนวน 3 ถัง คือ ถังใบแรกเติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร และ *Thiobacillus ferrooxidans* ถังใบที่สองเติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร และ *Thiobacillus ferrooxidans* และถังใบที่สามเป็น Control Run ไม่ต้องเติมทั้ง $FeSO_4.7H_2O$ และ *Thiobacillus ferrooxidans* เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบความสามารถในการ Leaching ตัวเองของ CuS ปฏิกิริยาทั้งสามถังจะเริ่มต้นที่ pH 4.00

ผลของการเก็บพารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างทำการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 5.5 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.13 ซึ่งจะให้ผลดังจะอธิบายต่อไปนี้

**ตารางที่ 5.5** แสดงค่าความเข้มข้นของ Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans ( ความเข้มข้นของ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร )

| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 1 | 4.00 | 234 | | 4.10 | | 383.33 | 3.68 | 212 | |
| 2 | 3.76 | 250 | 376.67 | 3.71 | 169 | 576.67 | 6.63 | 220 | 233.33 |
| 3 | 3.61 | 287 | 360.00 | 3.56 | 312 | 553.33 | 6.17 | 224 | 263.33 |
| 4 | 3.05 | 345 | 283.33 | 3.30 | 347 | 586.67 | 6.09 | 262 | 230.00 |
| 5 | 2.82 | 459 | 743.33 | 2.76 | 559 | 646.67 | 6.06 | 268 | |
| 6 | 2.49 | 549 | 823.33 | 2.89 | 569 | 623.33 | 6.20 | 277 | 196.67 |
| 7 | 2.41 | 577 | 1066.67 | 2.83 | 553 | 726.67 | 6.01 | 260 | 230.00 |
| 8 | 2.39 | 580 | 1300.00 | 2.79 | 582 | 990.00 | 6.08 | 270 | |
| 9 | 2.34 | 581 | 1520.00 | 2.74 | 560 | 683.33 | 6.19 | 283 | 283.33 |
| 10 | 2.36 | 585 | 1610.00 | 2.73 | 564 | 753.33 | 6.42 | 285 | 283.33 |
| 11 | 2.31 | 587 | 1950.00 | 2.79 | 567 | 1123.33 | 6.13 | 297 | 376.67 |
| 12 | 2.35 | 587 | 2180.00 | 2.80 | | 910.00 | 6.40 | 301 | |
| 13 | 2.32 | 546 | 2540.00 | 2.77 | 563 | 1270.00 | 7.69 | 317 | 120.00 |
| 14 | 2.34 | 556 | 2323.33 | 2.73 | 529 | 1076.67 | 6.81 | 324 | 96.67 |
| 15 | 2.35 | 544 | 1860.00 | 2.76 | 536 | 1240.00 | 6.90 | 188 | 46.67 |
| 16 | 2.39 | 533 | 1326.67 | 2.57 | 529 | 1543.33 | 7.13 | 200 | 63.33 |
| 17 | 2.45 | 519 | 1496.67 | 2.58 | 528 | 1476.67 | 7.61 | 265 | 140.00 |
| 18 | 2.47 | 525 | 1333.33 | 2.61 | 525 | 1370.00 | 7.72 | 192 | 120.00 |
| 19 | 2.51 | 512 | 1460.00 | 2.69 | 518 | 1293.33 | 8.00 | 217 | 73.33 |
| 20 | 2.50 | 527 | 1276.67 | 2.73 | 513 | 1183.33 | 7.89 | 194 | 93.33 |
| 21 | 2.63 | 529 | 1416.67 | 2.73 | 503 | 1210.00 | 7.30 | 197 | 110.00 |
| 22 | 2.72 | 511 | 1350.00 | 2.81 | 485 | 1160.00 | 7.37 | 224 | 100.00 |
| 23 | 2.79 | 503 | 1173.33 | 2.92 | 470 | 1026.67 | 7.21 | 200 | 100.00 |
| 24 | 2.87 | 482 | 1176.67 | 3.12 | 464 | 1183.33 | 7.52 | 199 | 180.00 |
| 25 | 2.94 | 470 | 1066.67 | 3.27 | 458 | 1303.33 | 7.21 | 174 | 260.00 |

**ตารางที่ 5.5 (ต่อ)** แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ขณะทำ Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans (ความเข้มข้นของ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร)

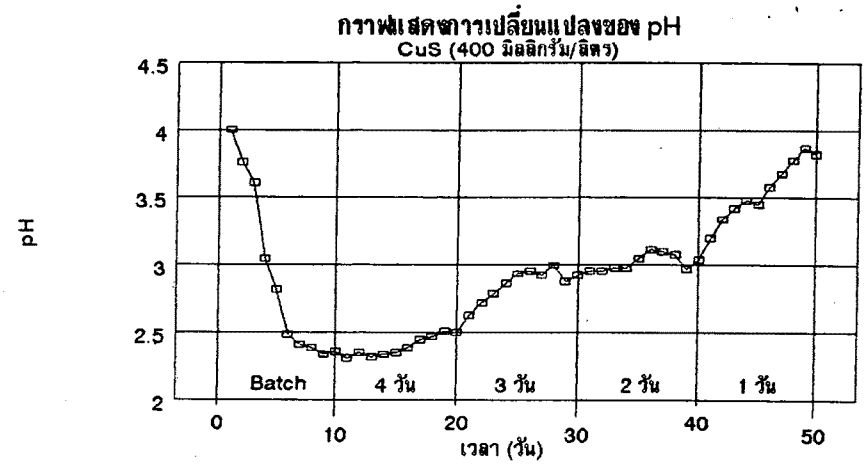
| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 26 | 2.96 | 459 | 960.00 | 3.19 | 462 | 1403.33 | 7.80 | 239 | 223.33 |
| 27 | 2.93 | 370 | 876.67 | 3.13 | 397 | 573.33 | 7.37 | 214 | 260.00 |
| 28 | 3.00 | 349 | 1486.67 | 3.12 | 379 | 833.33 | 7.34 | 197 | 250.00 |
| 29 | 2.88 | 358 | 703.33 | 3.14 | 379 | 640.00 | 7.45 | | 280.00 |
| 30 | 2.93 | 377 | 643.33 | 3.2 | 362 | 753.33 | 7.46 | 250 | 340.00 |
| 31 | 2.96 | 368 | 480.00 | 3.25 | 358 | 853.33 | | | |
| 32 | 2.96 | 360 | 470.00 | 3.19 | 352 | 1000.00 | | | |
| 33 | 2.98 | 367 | 543.33 | 3.22 | 360 | 660.00 | | | |
| 34 | 2.98 | 354 | 796.67 | 3.32 | 352 | 490.00 | | | |
| 35 | 3.05 | 350 | 566.67 | 3.18 | 342 | 770.00 | | | |
| 36 | 3.12 | 351 | 943.33 | 3.24 | 331 | 600.00 | | | |
| 37 | 3.1 | 345 | 1106.67 | 3.25 | 328 | 723.33 | | | |
| 38 | 3.08 | 347 | 1186.67 | 3.27 | 335 | 626.67 | | | |
| 39 | 2.97 | 358 | 930.00 | 3.36 | 321 | 566.67 | | | |
| 40 | 3.04 | 338 | 1123.33 | 3.25 | 318 | 1036.67 | | | |
| 41 | 3.2 | 340 | 676.67 | 3.37 | 302 | 836.67 | | | |
| 42 | 3.34 | 334 | 773.33 | 3.42 | 297 | 563.33 | | | |
| 43 | 3.42 | 356 | 963.33 | 3.45 | 284 | 853.33 | | | |
| 44 | 3.48 | 320 | 676.67 | 3.56 | 310 | 720.00 | | | |
| 45 | 3.45 | 310 | 1303.33 | 3.65 | 302 | 1296.67 | | | |
| 46 | 3.58 | 318 | 1190.00 | 3.72 | 289 | 610.00 | | | |
| 47 | 3.68 | 325 | 1343.33 | 3.79 | 278 | 790.00 | | | |
| 48 | 3.78 | 305 | 966.67 | 3.74 | 297 | 783.33 | | | |
| 49 | 3.87 | 297 | 973.33 | 3.82 | 274 | 1240.00 | | | |
| 50 | 3.82 | 314 | 566.67 | 3.95 | 295 | 710.00 | | | |

**หมายเหตุ :**

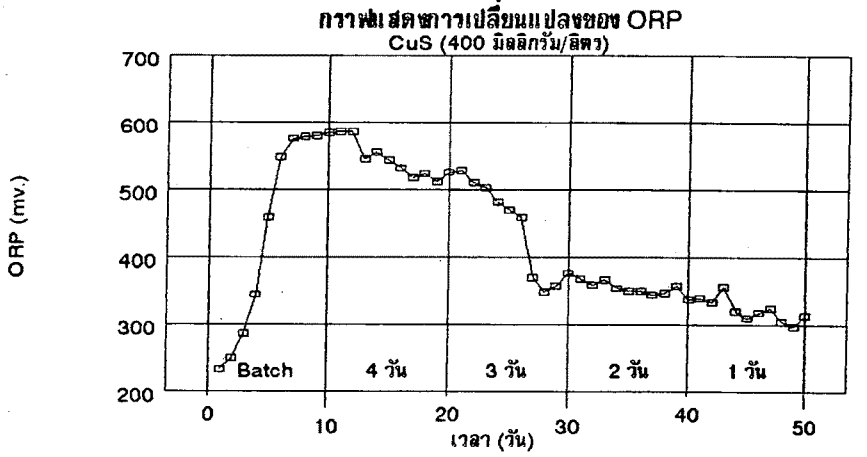
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร

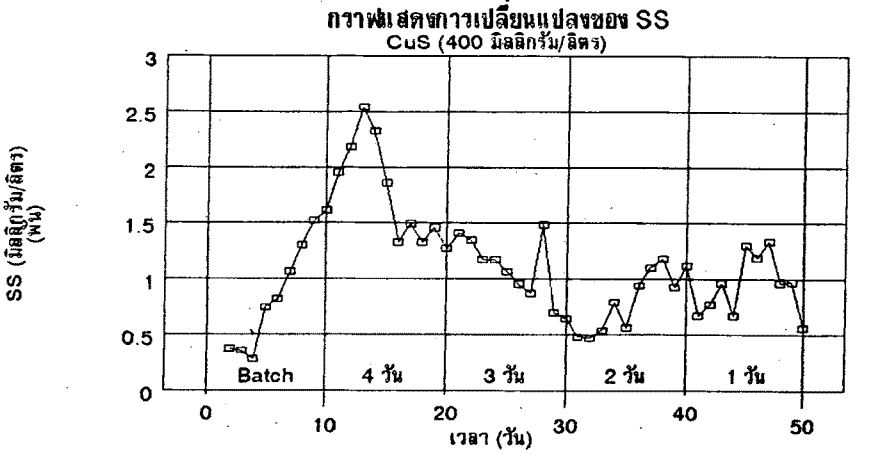
Control Run ไม่เติม $FeSO_4.7H_2O$




(ก.)

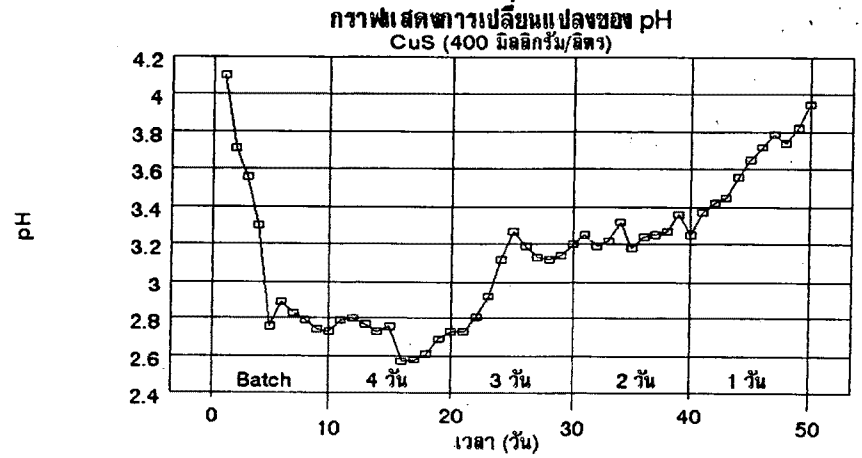



(ข.)

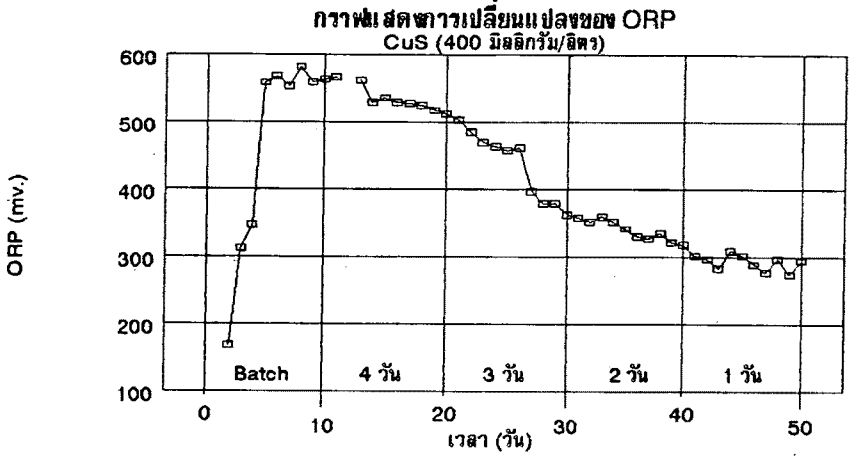



(ค.)

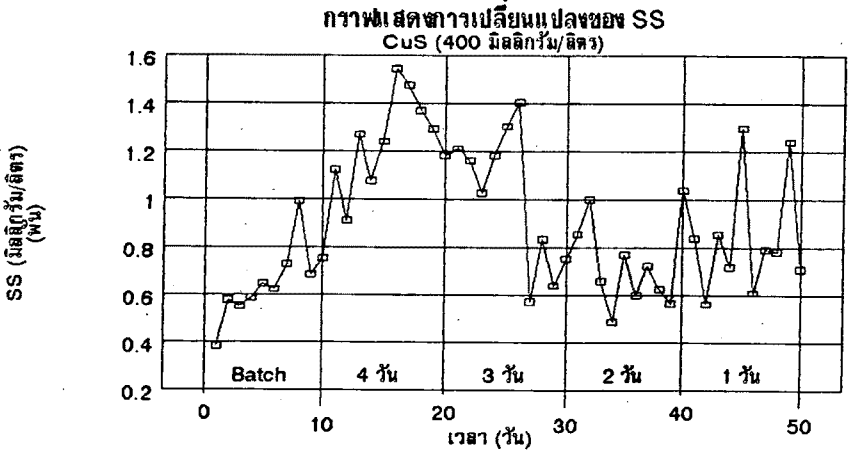
**รูปที่ 5.10** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ pH ที่วัดได้ตลอดเวลา Bacterial Leaching ของ Reactor 1 ความเข้มข้นของ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร




(ก.)

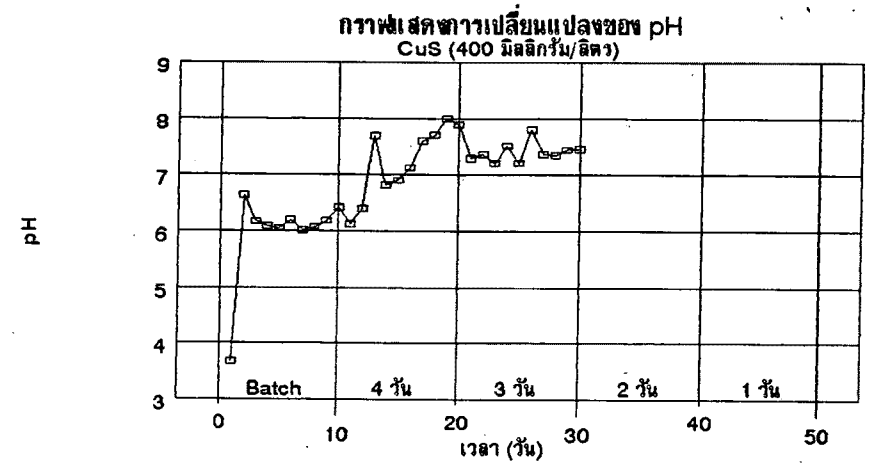



(ข.)

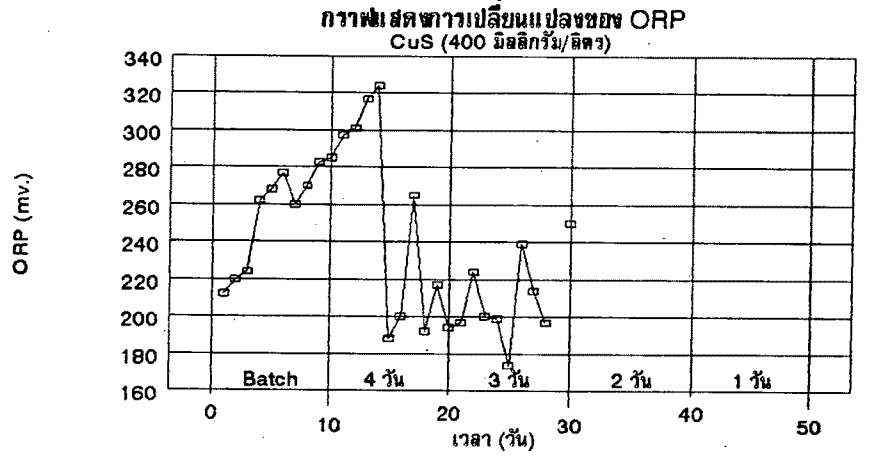



(ค.)

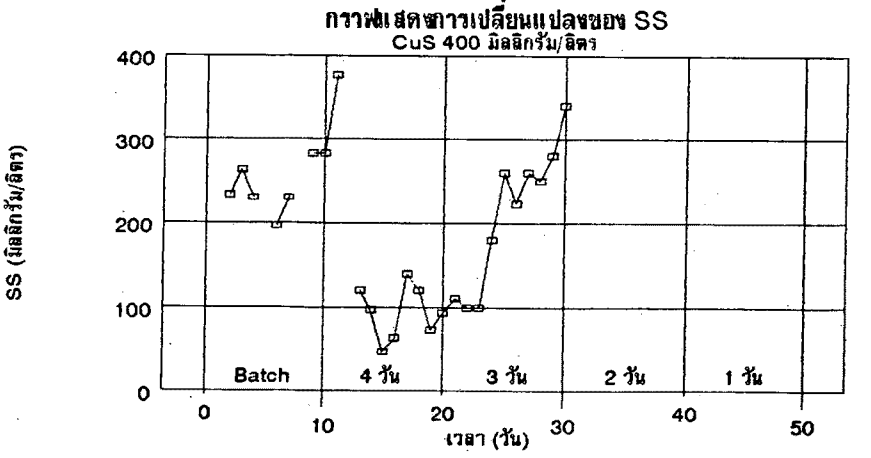
**รูปที่ 5.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ pH ORP และ SS ในการทดลองแบบ Bacterial Leaching ของ Reactor 2 ความเข้มข้นของ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร**




(ก.)

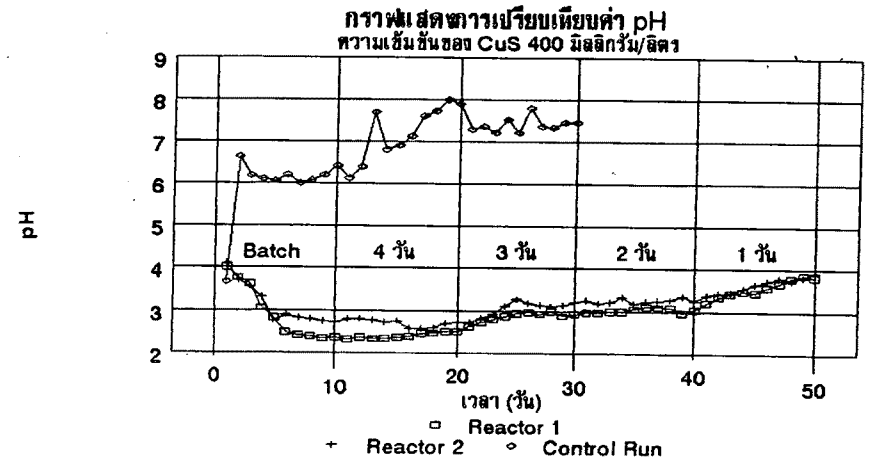



(ข.)

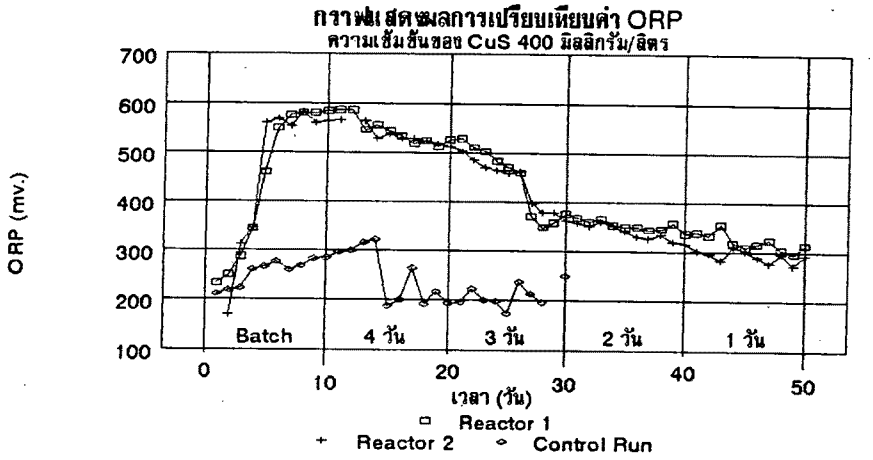



(ค.)

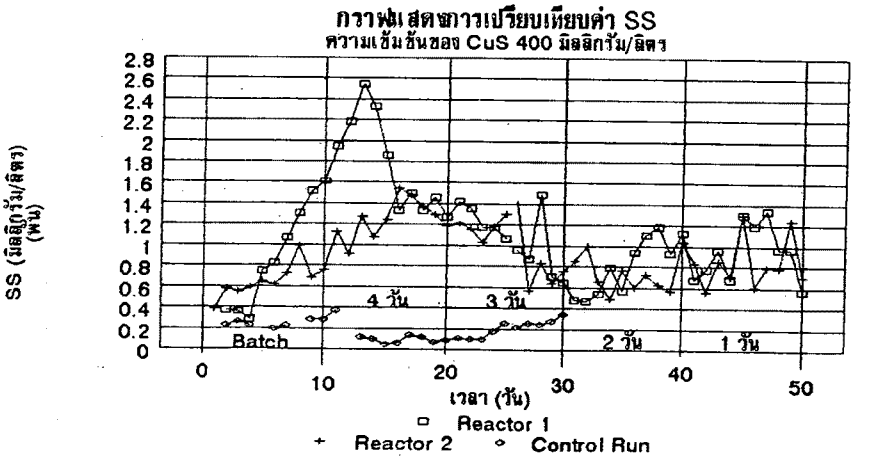
**รูปที่ 5.12** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆที่วัดได้ระหว่าง Bacterial Leeaching ของ Control Run ความเข้มข้นของ CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร




(ก.)




(ข.)




(ค.)

**รูปที่ 5.13** กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นต่าง ๆ ของ Bacterial Leaching ของ Reactor ทั้งสาม

1. ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ใบที่ 1

รูปที่ 5.10 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ขณะทำการทดลองการปฏิบัติการ Bioleaching กับ CuS ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเห็นผลดังนี้

- pH

ในช่วง 10 วันแรกซึ่งเป็นการทดลองแบบทีละเท (รูปที่ 5.10(ก.)) ค่า pH จะลดลงตลอดเวลา จาก 4.00 จนถึง 2.36 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมกับการทำงานของ *Thiobacillus ferrooxidans* หลังจากนั้นเมื่อเริ่มกิ่บปฏิบัติการแบบต่อเนื่องโดยมีระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน ในช่วงวันที่ 11-20 จะพบว่า pH ค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า pH จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาเก็บกักทุก ๆ 10 วัน ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการ Leaching เลวลงเนื่องจาก pH ที่เพิ่มขึ้นเป็น pH ที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans*

- ORP

พิจารณารูปที่ 5.10(ข.) ประกอบกับรูปที่ 5.10(ก.) จะเห็นว่าในช่วง 10 วันแรกเมื่อ pH มีค่าลดต่ำลง ค่า ORP จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงว่าประสิทธิภาพการ Leaching เกิดขึ้นได้ดีมาก และเมื่อทำการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยให้ระยะเวลาเก็บกักเป็น 4 วัน ค่า ORP จะค่อย ๆ ลดลงและจะค่อย ๆ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดทุก ๆ ครั้งที่มีการเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักให้น้อยลงทุก ๆ 10 วัน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการ Leaching โลหะหนักว่ามีประสิทธิภาพเลวลง

- SS

ในรูปที่ 5.10(ค.) ค่า SS มีค่าเพิ่มขึ้น ในช่วง 10 วันแรก เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ซึ่งสาเหตุของการเกิดตะกอน $Fe(OH)_3$ เนื่องมาจากค่า ORP ที่สูงขึ้นถึง 500 mv. และเมื่อค่า ORP ลดลง ถึงจุดที่ต่ำกว่า 500 mv. ก็จะไม่เกิดตะกอน $Fe(OH)_3$ ทำให้ตะกอนลดลง ประกอบกับในช่วงที่ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง มีการระบายน้ำทิ้งออกไปด้วย ทำให้ $Fe(OH)_3$ หลุดออกจากระบบค่า SS จึงลดลง

2. ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ใบที่ 2

ลักษณะของพฤติกรรมของพารามิเตอร์ทั้ง 3 คือ pH , ORP , และ SS ของถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ดังรูปที่ 5.11 สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 คือ

- pH

ในช่วง 10 วันแรกซึ่งเป็นการทดลองแบบทีละเท ค่า pH จะค่อย ๆ ต่ำลงจนถึง 2.73 (ดังรูปที่ 5.11(ก.)) และเมื่อถึงประมาณวันที่ 11 ซึ่งเป็นการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน ค่า pH จะค่อย ๆ สูงขึ้นและจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาเก็บกักเปลี่ยนเป็น 3 , 2 ,และ 1 วัน สาเหตุของการที่ pH สูงขึ้นก็เนื่องมาจากปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากระยะเวลากักน้ำน้อยเกินไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะเวลาเก็บกักเป็น 2 และ 1 วัน ปฏิกิริยา Bioleaching ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทัน ค่า pH จึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

- ORP

เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 คือค่า ORP จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วง 10 วันแรกและจะลดลงเมื่อถึงช่วงการทดลองแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 5.11(ข.) และจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อระยะเวลาเก็บกักเป็น 2 และ 1 วัน เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ เพราะระยะเวลาเก็บกักน้ำน้อยเกินไป ทำให้ปฏิกิริยา Bioleaching เกิดได้ไม่สมบูรณ์

- SS

ค่า SS ในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ค่อนข้างมีความผันแปรไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อพิจารณาสภาพโดยรวมแล้วก็จะพบว่าในช่วง 10 วันแรกที่เป็นการทดลองแบบทีละเท่านั้น ค่า SS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 5.11(ค.) และเมื่อการทดลองเปลี่ยนเป็นแบบต่อเนื่องค่า SS ก็มีแนวโน้มลดลงแม้ว่าบางค่าจะมีค่าสูงก็ตาม

3. ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ที่เป็น Control Run

ลักษณะปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ใบนี้ ค่อนข้างจะแตกต่างกับ 2 ถังแรกคือ

- pH

การเปลี่ยนแปลง pH ในถังปฏิกรณ์ใบนี้มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามกับถังปฏิกรณ์ 2 ใบแรกอย่างเห็นได้ชัด คือ pH จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ จาก 4 ไปจนถึงมากกว่า 7 แสดงให้เห็นว่าไม่มีปฏิกิริยาใด ๆ ที่ก่อให้เกิดกรดใน Control Run เลย ดังรูปที่ 5.12(ก.)

- ORP

การเปลี่ยนแปลง ORP ในถังปฏิกรณ์ใบนี้มีการเพิ่มขึ้นบ้างในช่วงแรกแต่ไม่มาก แสดงให้เห็นถึงการละลายตัวออกมาบ้างเล็กน้อย ดังรูปที่ 5.12(ข.)

- SS

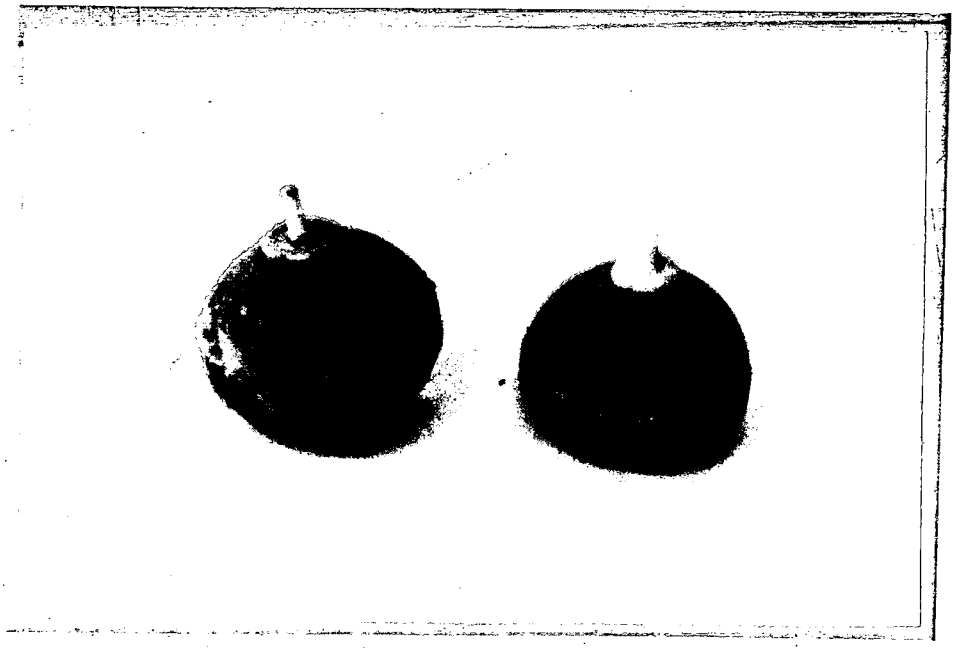
ค่า SS ของ Control Run มีความผันแปรมากจนไม่สามารถนำมาอธิบายเป็นเหตุผลใด ๆ ที่สอดคล้องกับ pH และ ORP ได้เลย ดังรูปที่ 5.12(ค.)

4. ผลทางกายภาพโดยทั่วไปที่มองเห็น

ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างถังปฏิกรณ์ 2 ใบแรกกับ Control Run คือ ในถัง 2 ใบแรกจะมีคราบสนิมเกาะที่ผนังของถังปฏิกรณ์ รวมทั้งจะมีคราบสนิมเกาะที่หัวเติมอากาศ ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งจะต้องหมั่นดูแลให้ดี และคอยเปลี่ยนหัวเติมอากาศอยู่สม่ำเสมอ เนื่องจากเมื่อท่อเติมอากาศมีคราบสนิมอุดตันอยู่ทำให้ภายในถังปฏิกรณ์มีอากาศไม่เพียงพอ อาจทำให้ *Thiobacillus ferrooxidans* ขาดออกซิเจนจนทำงานไม่ได้และทำให้ Mixing ไม่ดี มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการ Leaching ลดลงด้วย

5. ผลการวัดปริมาณการ Leaching CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการLeaching CuS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำผลการ Leaching มาพล็อตกราฟจะได้ดังรูปที่ 5.15 พบว่า ประสิทธิภาพการ Leaching จะดีที่สุดจะอยู่ที่ 10 วันแรกโดยสังเกตจากความชันและความสูงของกราฟ จะเห็นได้ว่าผลการ Leaching ของ *Thiobacillus ferrooxidans* มีผลสอดคล้องกับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ กล่าวคือ ในช่วง 10 วันแรก pH ลดลงจนถึงจุดที่เหมาะสมในการดำรงชีวิตของ -



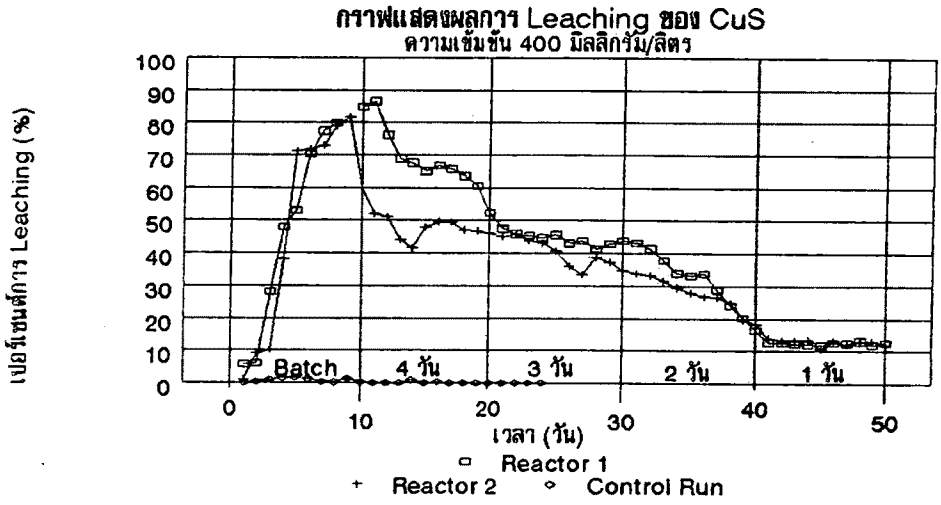
รูปที่ 5.14 แสดงหัวเติมอากาศก่อนและหลังการใช้งาน

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Cu) ในอัตราส่วนต่างๆ ความเข้มข้น CuS 400 มิลลิกรัม/ลิตร

| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reacter 1 | | Reacter 2 | | ControlRun | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 1 | 22.81 | 5.70 | 3.60 | 0.90 | 0.27 | 0.07 |
| 2 | 23.83 | 5.96 | 37.10 | 9.27 | 1.05 | 0.26 |
| 3 | 112.54 | 28.13 | 40.36 | 10.09 | 4.02 | 1.01 |
| 4 | 191.55 | 47.89 | 153.00 | 38.25 | 5.95 | 1.49 |
| 5 | 212.10 | 53.03 | 285.00 | 71.25 | 6.50 | 1.63 |
| 6 | 281.30 | 70.33 | 286.90 | 71.73 | 4.49 | 1.12 |
| 7 | 309.70 | 77.43 | 291.70 | 72.93 | 1.20 | 0.30 |
| 8 | 319.50 | 79.88 | 315.00 | 78.75 | 0.85 | 0.21 |
| 9 | | | 326.80 | 81.70 | 5.07 | 1.27 |
| 10 | 339.20 | 84.80 | 240.00 | 60.00 | 0.70 | 0.18 |
| 11 | 346.30 | 86.58 | 208.50 | 52.13 | 0.37 | 0.09 |
| 12 | 304.80 | 76.20 | 203.90 | 50.98 | 0.30 | 0.07 |
| 13 | 275.30 | 68.83 | 176.80 | 44.20 | 0.29 | 0.07 |
| 14 | 270.50 | 67.63 | 165.90 | 41.48 | 3.60 | 0.90 |
| 15 | 260.60 | 65.15 | 192.00 | 48.00 | 0.25 | 0.06 |
| 16 | 267.60 | 66.90 | 198.70 | 49.68 | 1.02 | 0.25 |
| 17 | 263.20 | 65.80 | 198.30 | 49.58 | 0.27 | 0.07 |
| 18 | 254.45 | 63.61 | 188.35 | 47.09 | 0.38 | 0.10 |
| 19 | 242.12 | 60.53 | 187.30 | 46.83 | 0.01 | 0.00 |
| 20 | 209.70 | 52.43 | 183.70 | 45.93 | 0.34 | 0.09 |
| 21 | 189.90 | 47.48 | 180.25 | 45.06 | 0.25 | 0.06 |
| 22 | 183.50 | 45.88 | 183.50 | 45.88 | 0.22 | 0.05 |
| 23 | 181.30 | 45.33 | 175.35 | 43.84 | 0.34 | 0.08 |
| 24 | 179.50 | 44.88 | 172.48 | 43.12 | 0.30 | 0.08 |
| 25 | 182.30 | 45.58 | 162.87 | 40.72 | | |

**ตารางที่ 5.6 (ต่อ) แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Cu) ในถังปฏิกรณ์แต่ละใบ ความเข้มข้น CuS 400 มิลลิกรัม/ลิตร**

| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reacter 1 | | Reacter 2 | | ControlRun | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 26 | 172.40 | 43.10 | 143.65 | 35.91 | | |
| 27 | 175.65 | 43.91 | 133.50 | 33.38 | | |
| 28 | 165.49 | 41.37 | 154.85 | 38.71 | | |
| 29 | 171.90 | 42.98 | 149.35 | 37.34 | | |
| 30 | 175.80 | 43.95 | 138.87 | 34.72 | | |
| 31 | 172.80 | 43.20 | 134.82 | 33.71 | | |
| 32 | 165.60 | 41.40 | 132.58 | 33.15 | | |
| 33 | 151.10 | 37.78 | 125.69 | 31.42 | | |
| 34 | 135.30 | 33.83 | 117.92 | 29.48 | | |
| 35 | 132.58 | 33.15 | 111.57 | 27.89 | | |
| 36 | 134.80 | 33.70 | 107.52 | 26.88 | | |
| 37 | 115.20 | 28.80 | 106.36 | 26.59 | | |
| 38 | 95.60 | 23.90 | 99.68 | 24.92 | | |
| 39 | 81.10 | 20.28 | 78.89 | 19.72 | | |
| 40 | 65.30 | 16.33 | 72.89 | 18.22 | | |
| 41 | 51.20 | 12.80 | 55.89 | 13.97 | | |
| 42 | 50.80 | 12.70 | 52.89 | 13.22 | | |
| 43 | 49.70 | 12.43 | 52.48 | 13.12 | | |
| 44 | 48.70 | 12.18 | 54.59 | 13.65 | | |
| 45 | 47.89 | 11.97 | 43.58 | 10.90 | | |
| 46 | 50.14 | 12.54 | 52.48 | 13.12 | | |
| 47 | 49.78 | 12.45 | 47.89 | 11.97 | | |
| 48 | 52.48 | 13.12 | 51.48 | 12.87 | | |
| 49 | 47.89 | 11.97 | 52.45 | 13.11 | | |
| 50 | 50.89 | 12.72 | 47.89 | 11.97 | | |

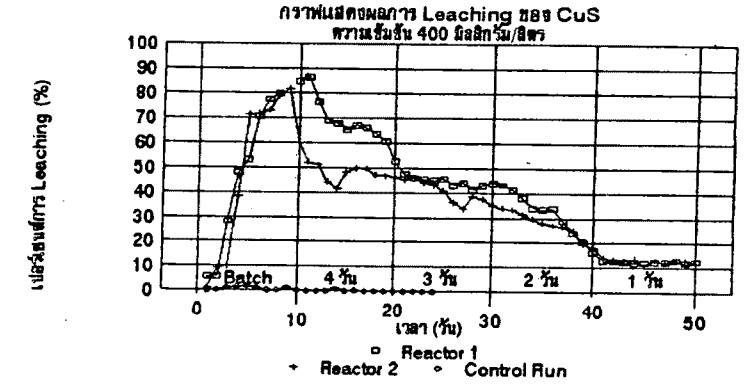



**รูปที่ 5.15** กราฟเปรียบเทียบผลการ Leaching ของ CuS เมื่อปริมาณสารละลายต่างกัน
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัม/ลิตร
Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัม/ลิตร
Control Run ไม่เติม

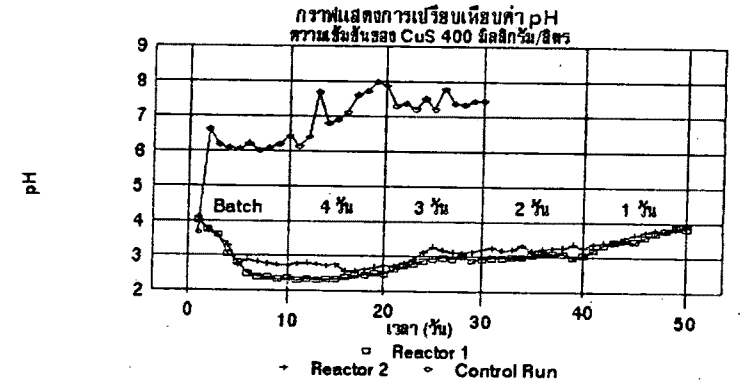
*Thiobacillus ferrooxidans* ทำให้การ Leaching มีค่าสูงสุด ส่งผลให้ค่า ORP เพิ่มขึ้น และในช่วงนี้เองที่ *Thiobacillus ferrooxidans* มีการสร้างเซลล์และทำให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ ก่อให้เกิด $Fe(OH_3)$ เป็นตะกอนสนิมทำให้มีค่า SS เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุมาจาก ORP เพิ่มขึ้นถึง 500 mv.

สิ่งที่น่าสังเกตก็คือ เมื่อ *Thiobacillus ferrooxidans* ได้สารอาหารลดลงคือในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 ที่เติม $FeSO_4.7H_2O$ เพียง 0.50 กรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพในการ Leaching ด้อยลงด้วย ดังรูปที่ 5.15 จะเห็นว่ากราฟการ Leaching ของถัง - ปฏิกิริยาใบที่ 2 อยู่ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 และในถังปฏิกรณ์ทั้งสอง ประสิทธิภาพการ Leaching จะลดลงทุกครั้งที่มีการเปลี่ยน Detention Time เป็นเพราะระยะเวลากักน้ำน้อย ลงทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ และเมื่อระยะเวลาเก็บกักเป็น 1 วัน ก็จะเกิดการ wash out ของตะกอนทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ออกจากระบบมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของโลหะหนักที่เข้าสู่ระบบ

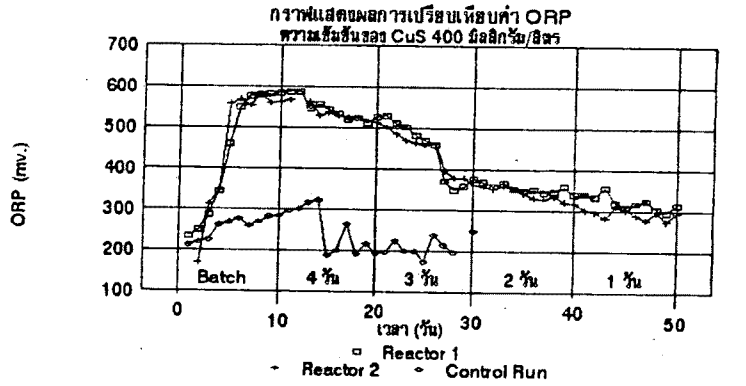
รูปที่ 5.16 เป็นกราฟสรุปให้เห็นถึงประสิทธิภาพการ Leaching CuS ควบคู่ไปกับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้ขณะทำการทดลอง ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าในช่วง 10 วันแรกที่เป็นการทดลองแบบทีละเท ประสิทธิภาพการ Leaching สูงขึ้นมากจนถึงจุดสูงสุดประมาณ 85 % ของถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 ส่วนในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 นั้นน่าจะเกิดจากความผิดพลาดบางประการเนื่องจากค่า ประสิทธิภาพการ Leaching ลดลงอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามใน 9 วันแรก ประสิทธิภาพการ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 ส่วนใน Control Run นั้น Leaching มีน้อยมาก ซึ่งผลทั้งหมดก็สอดคล้องกับพารามิเตอร์ต่างในรูปที่ 5.16 (ข.) , (ค.),และ(ง.)



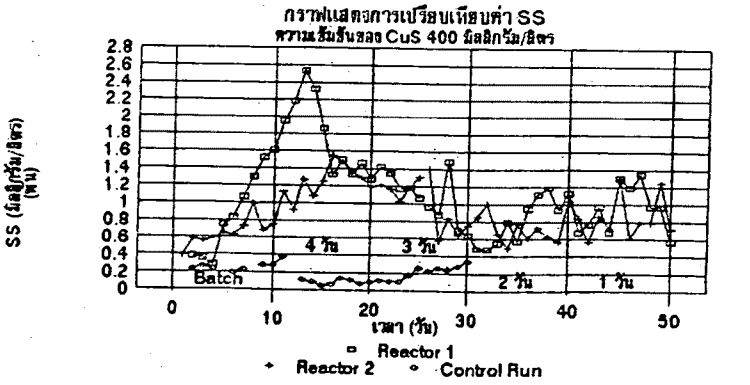

(ก.)




(ข.)




(ค.)




(ง.)

**รูปที่ 5.16** กราฟแสดงผลการทดลองขณะทำ Bioleaching ของ CuS ใน Reactor ทั้งสาม

5.4.2 ค่าพารามิเตอร์และลักษณะทางกายภาพขณะทำการ Leaching NiS , ZnS 400 มิลลิกรัมต่อสิตร

จากตารางที่ 5.7 และ 5.8 และรูปที่ 5.17 ถึง 5.20 และ 5.21 ถึง 5.24 จะเห็นได้ว่าลักษณะของปฏิกิริยาเหมือนกันทุกประการ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ pH , ORP และ SS มีลักษณะเหมือนกับที่อธิบายแล้วในหัวข้อ 5.4.1

สำหรับเรื่องความสามารถในการ Leaching นั้นสามารถดูได้จากตารางที่ 5.9 และ 5.10 สำหรับ NiS และ ZnS ตามลำดับ โดยค่าในตารางทั้งสองนี้พล็อตลงในรูปที่ 5.25 และ 5.27 ตามลำดับ ซึ่งพฤติกรรมของลักษณะทางกายภาพ คือ pH , ORP , SS ผลทางกายภาพที่มองเห็น สามารถอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับในหัวข้อ 5.4.1

รูปที่ 5.29 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นความสามารถในการ Leaching โลหะหนักแต่ละชนิด ของ ***Thiobacillus ferrooxidans*** ว่ามีความสามารถในการ Leaching โลหะหนักแต่ละชนิดได้ต่างกันดังนี้

รูปที่ 5.29(ก.) แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะแวดล้อมเดียวกันคือ เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1 กรัมต่อสิตรนั้น ***Thiobacillus ferrooxidans*** สามารถ Leaching Cu ได้ดีที่สุดในช่วงการทดลองแบบทีละเท ส่วนในช่วงการทดลองแบบต่อเนื่อง ***Thiobacillus ferrooxidans*** สามารถ Leaching Ni ได้ดีที่สุด

รูปที่ 5.29(ข.) แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะแวดล้อมเดียวกันคือ เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.5 กรัมต่อสิตรนั้น ***Thiobacillus ferrooxidans*** สามารถ Leaching Cu ได้ดีที่สุดในช่วงการทดลองแบบทีละเท ส่วนในช่วงการทดลองแบบต่อเนื่อง ***Thiobacillus ferrooxidans*** สามารถ Leaching Ni ได้ดีที่สุดเช่นเดียวกับรูปที่ 5.29(ก.) แต่ประสิทธิภาพการ Leaching ของรูปที่ 5.29(ก.) จะสูงกว่า

ส่วนในรูปที่ 5.29(ค.) ไม่สามารถนำมาพิจารณาได้เนื่องจากไม่มีความเสถียรในระบบ

ตารางที่ 5.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ระหว่าง Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans (ตารางเข้มข้นของ NiS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร)

| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 1 | 4.00 | 395 | | 4.00 | 351 | | 4.00 | 142 | |
| 2 | 3.26 | 381 | 300.00 | 3.82 | 350 | 244.00 | 6.20 | 148 | 44.00 |
| 3 | 3.22 | 381 | 163.33 | 3.80 | 362 | 266.67 | 6.80 | 141 | 196.67 |
| 4 | 2.83 | 528 | 480.00 | 3.12 | 369 | 226.67 | 7.09 | 135 | 236.67 |
| 5 | 2.82 | 547 | 583.33 | 3.07 | 365 | 230.00 | 7.50 | 144 | 26.67 |
| 6 | 2.77 | 558 | 673.33 | 2.85 | 403 | 406.67 | 7.87 | 136 | 36.67 |
| 7 | 2.76 | 560 | 666.67 | 2.73 | 447 | 736.67 | 7.48 | 167 | 13.33 |
| 8 | 2.69 | 562 | 660.00 | 2.75 | 491 | 756.67 | 7.79 | 182 | 6.67 |
| 9 | 2.62 | 559 | 663.33 | 2.83 | 529 | 690.00 | 7.61 | 167 | 36.67 |
| 10 | 2.58 | 560 | 613.33 | 2.50 | 526 | 653.33 | 7.70 | 169 | 116.67 |
| 11 | 2.54 | 562 | 760.00 | 2.45 | 525 | 620.00 | 7.50 | 190 | 23.33 |
| 12 | 2.48 | 561 | 656.67 | 2.48 | 503 | 703.33 | 7.67 | 126 | 36.67 |
| 13 | 2.33 | 555 | 806.67 | 2.47 | 512 | 643.33 | 7.80 | | |
| 14 | 2.32 | 563 | 836.67 | 2.50 | 491 | 713.33 | 7.60 | | |
| 15 | 2.35 | 542 | 936.67 | 2.52 | 488 | 703.33 | 7.20 | | |
| 16 | 2.36 | 534 | 893.33 | 2.54 | 482 | 626.67 | 7.50 | | |
| 17 | 2.40 | 532 | 873.33 | 2.51 | 490 | 646.67 | 7.53 | | |
| 18 | 2.38 | 528 | 866.67 | 2.53 | 500 | 636.67 | 7.45 | | |
| 19 | 2.39 | 529 | 806.67 | 2.58 | 512 | 733.33 | 7.55 | | |
| 20 | 2.40 | 524 | 910.00 | 2.57 | 508 | 700.00 | 7.63 | | |
| 21 | 2.42 | 518 | 746.67 | 2.63 | 450 | 616.67 | 7.45 | | |
| 22 | 2.45 | 498 | 723.33 | 2.58 | 462 | 653.33 | 7.58 | | |
| 23 | 2.5 | 482 | 766.67 | 2.65 | 430 | 616.67 | 7.63 | | |
| 24 | 2.48 | 485 | 783.33 | 2.65 | 428 | 510.00 | 7.75 | | |
| 25 | 2.51 | 475 | 740.00 | 2.68 | 445 | 666.67 | 7.72 | | |

ตารางที่ 5.7 (ต่อ) แสดงค่าตารางมิเตอร์ที่วัดได้ขณะทำ Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans (ความเข้มข้นของ NiS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร)

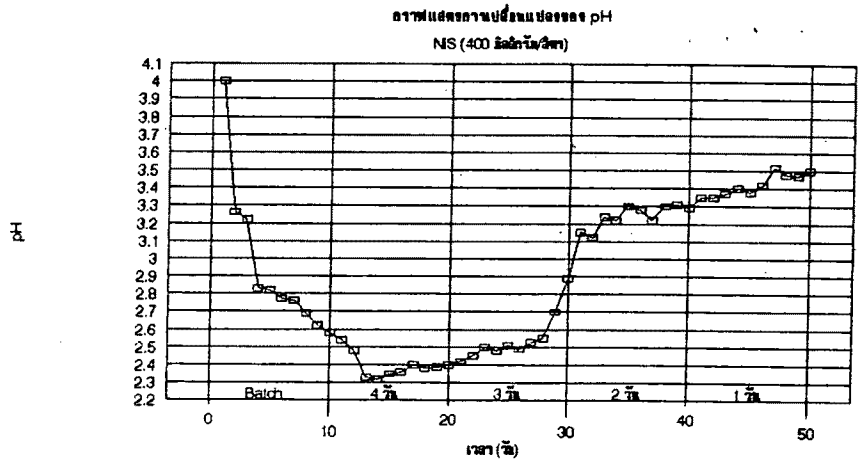
| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 26 | 2.49 | 476 | 696.67 | 2.70 | 450 | 476.67 | 7.8 | | |
| 27 | 2.53 | 450 | 646.67 | 2.72 | 429 | 576.67 | 7.9 | | |
| 28 | 2.55 | 442 | 726.67 | 2.73 | 400 | 630.00 | 8.2 | | |
| 29 | 2.7 | 443 | 783.33 | 2.75 | 382 | 446.67 | 7.58 | | |
| 30 | 2.89 | 430 | 630.00 | 2.78 | 380 | 653.33 | 7.69 | | |
| 31 | 3.15 | 431 | 656.67 | 3.10 | 392 | 510.00 | 7.71 | | |
| 32 | 3.12 | 426 | 640.00 | 3.22 | 391 | 543.33 | 7.6 | | |
| 33 | 3.24 | 421 | 610.00 | 3.38 | 349 | 570.00 | 7.83 | | |
| 34 | 3.22 | 398 | 596.67 | 3.40 | 342 | 530.00 | 7.58 | | |
| 35 | 3.3 | 389 | 666.67 | 3.10 | 349 | 556.67 | 7.84 | | |
| 36 | 3.28 | 387 | 600.00 | 3.37 | 332 | 486.67 | 7.89 | | |
| 37 | 3.22 | 376 | 583.33 | 3.21 | 347 | 523.33 | 7.45 | | |
| 38 | 3.3 | 382 | 493.33 | 3.50 | 360 | 470.00 | 7.68 | | |
| 39 | 3.31 | 385 | 680.00 | 3.50 | 352 | 503.33 | 7.84 | | |
| 40 | 3.29 | 374 | 403.33 | 3.35 | 350 | 696.67 | 7.85 | | |
| 41 | 3.35 | 350 | 643.33 | 3.45 | 332 | 483.33 | 7.9 | | |
| 42 | 3.35 | 348 | 623.33 | 3.60 | 312 | 303.33 | 7.95 | | |
| 43 | 3.37 | 352 | 586.67 | 3.68 | 322 | 420.00 | 7.23 | | |
| 44 | 3.4 | 342 | 446.67 | 3.78 | 332 | 500.00 | 7.35 | | |
| 45 | 3.38 | 330 | 600.00 | 3.70 | 282 | 540.00 | 7.96 | | |
| 46 | 3.42 | 335 | 450.00 | 3.75 | 320 | 533.33 | 7.98 | | |
| 47 | 3.52 | 346 | 423.33 | 3.62 | 332 | 623.33 | 7.45 | | |
| 48 | 3.48 | 368 | 496.67 | 3.70 | 340 | 553.33 | 7.48 | | |
| 49 | 3.47 | 360 | 433.33 | 3.71 | 312 | 476.67 | 7.88 | | |
| 50 | 3.5 | 376 | 286.67 | 3.78 | 328 | 543.33 | 8.4 | | |

หมายเหตุ :

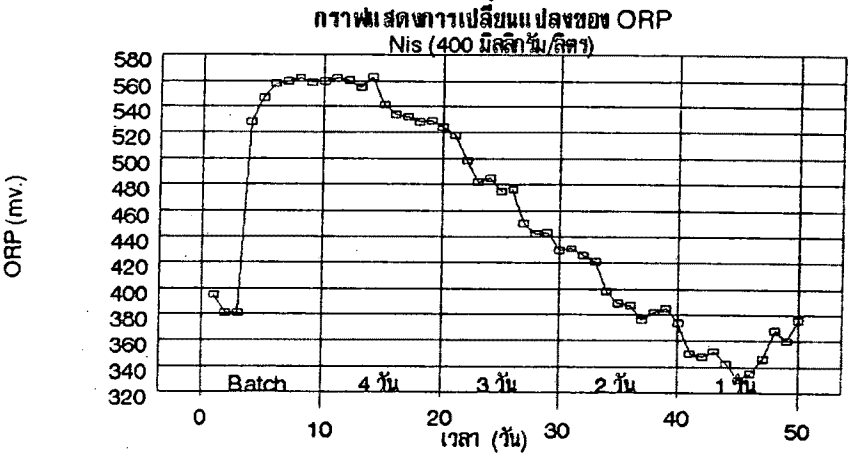
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร

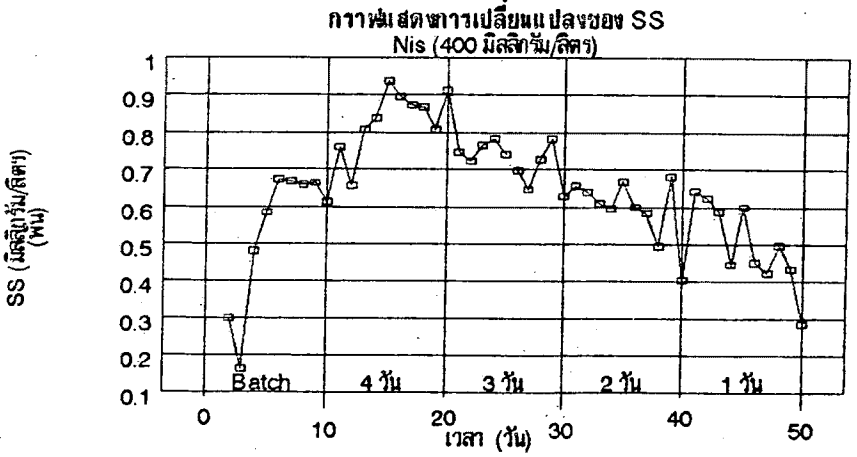
Control Run ไม่เติม $FeSO_4.7H_2O$




(ก.)

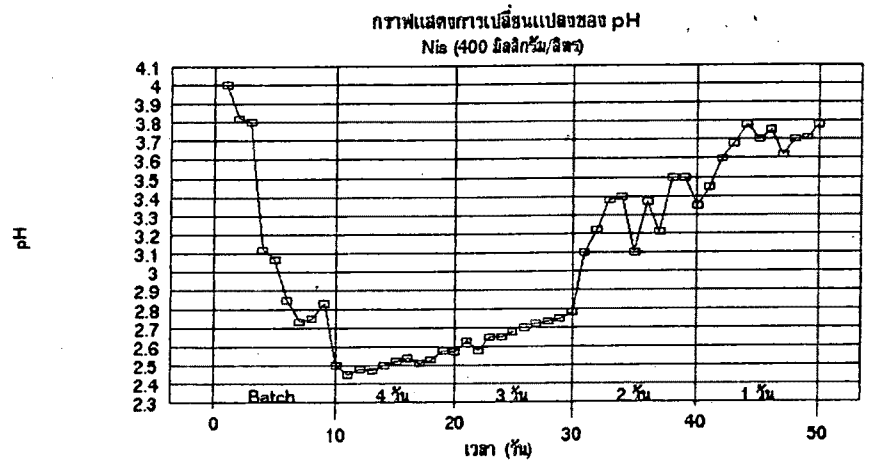



(ข.)

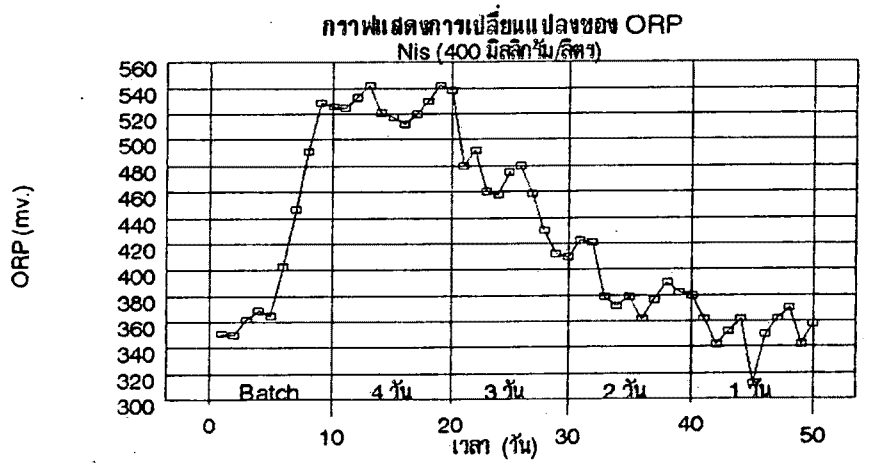



(ค.)

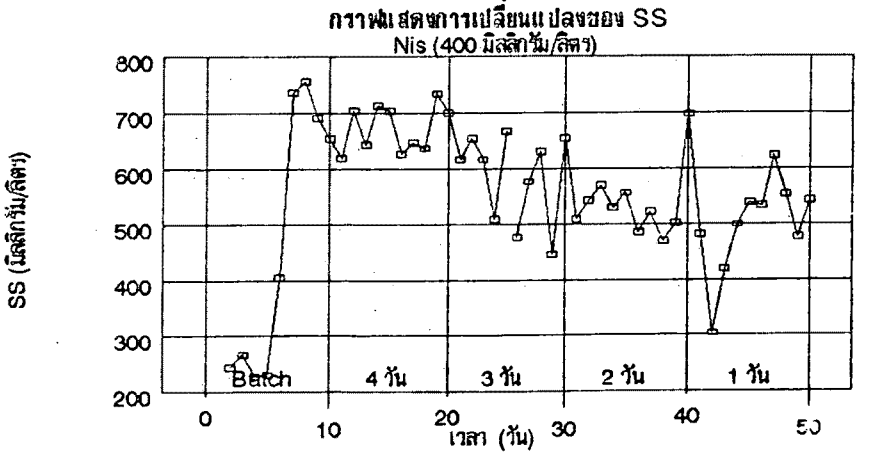
**รูปที่ 5.17** กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า ต่าง ๆ ที่วัดได้ของการทำ Bacterial Leaching ของ Reactor 1 ความเข้มข้นของ NiS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร




(ก.)

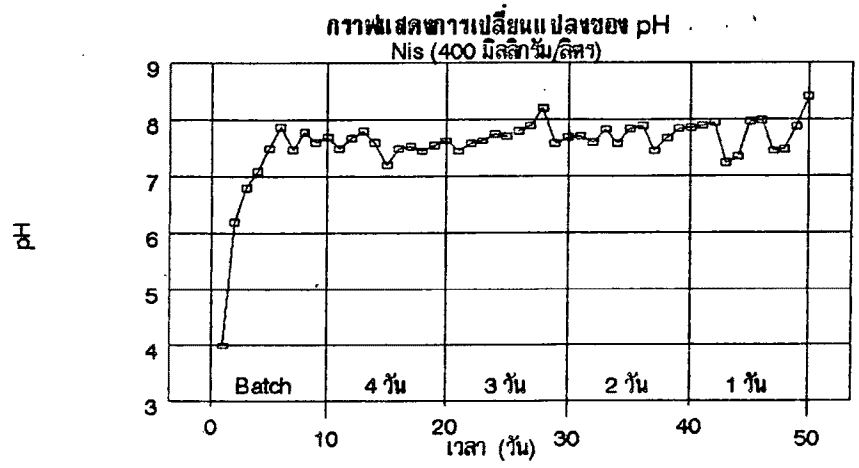



(ข.)

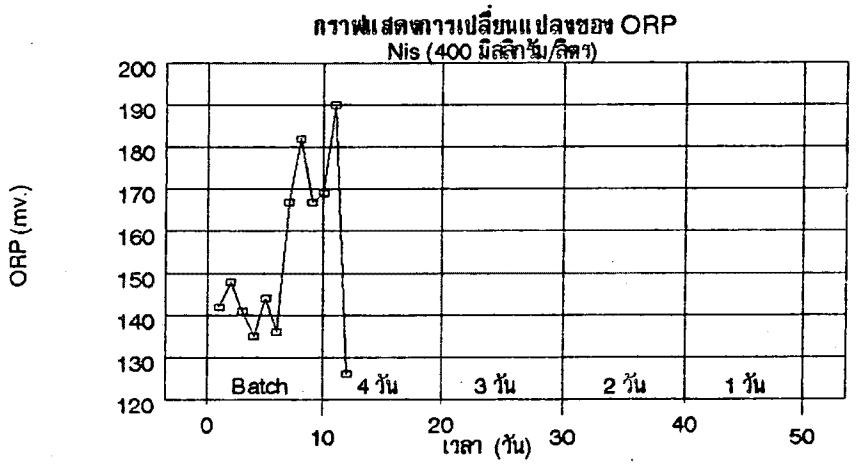



(ค.)

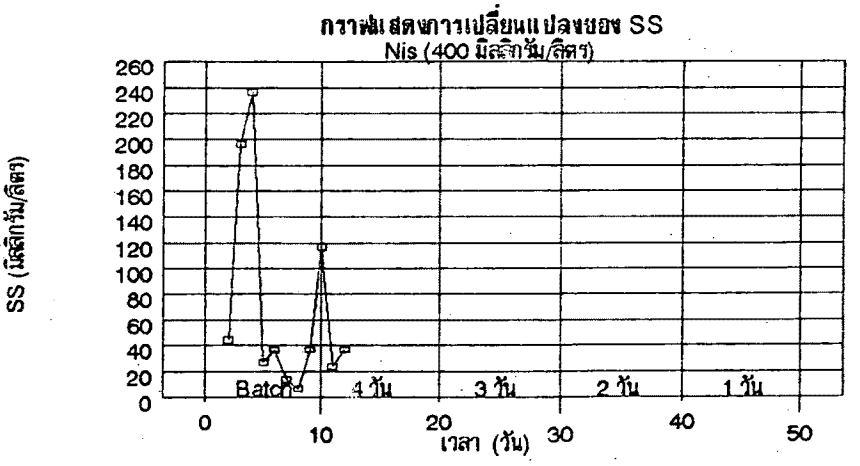
**รูปที่ 5.18** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Bacterial Leaching ของ Reactor 2 ความเข้มข้นของ NiS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร




(ก.)

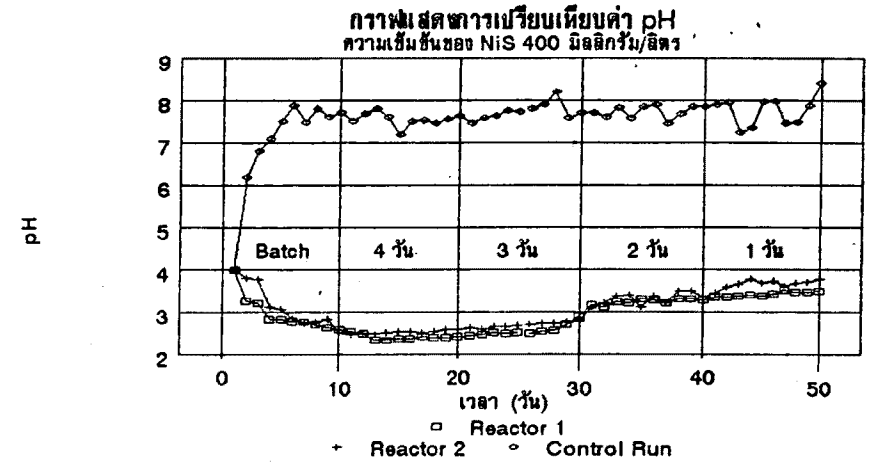



(ข.)

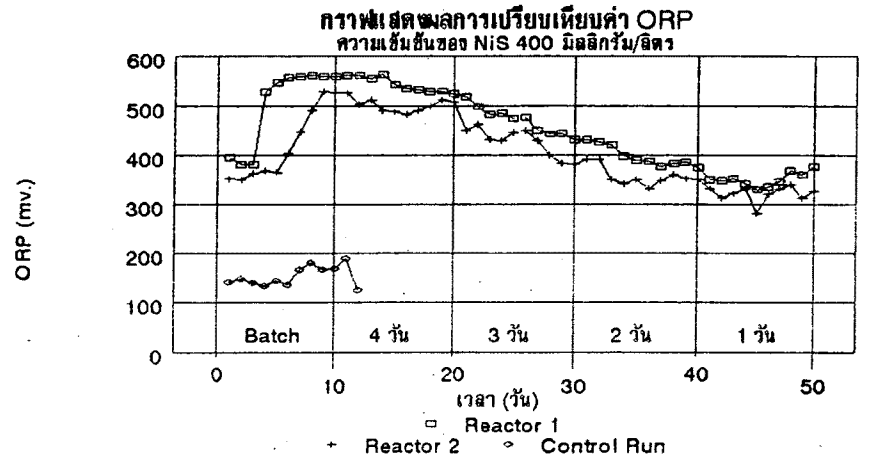



(ค.)

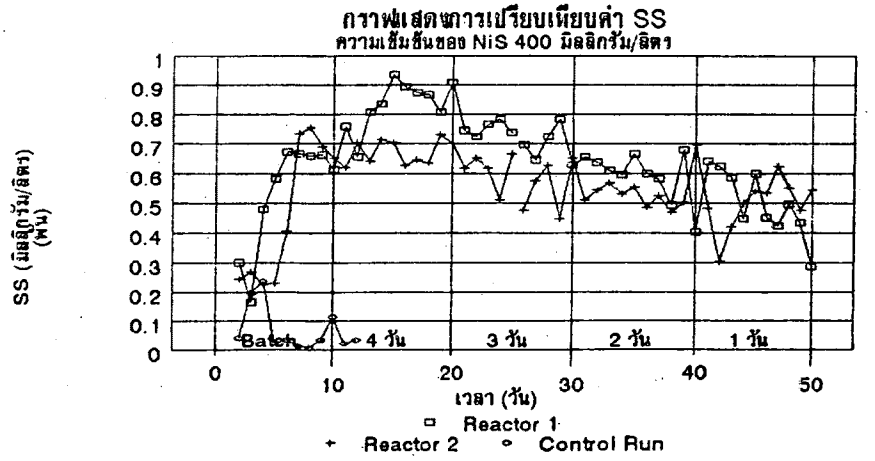
**รูปที่ 5.19** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า ก ของ Bacterial Leaching ของ Control Run ความเข้มข้นของ NiS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร




(ก.)




(ข.)




(ค.)

**รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบค่าการดีเลตค่าง ๆ และค่า Bacterial Leaching ของ Reactor ทั้งสาม**

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าความเข้มข้นของ Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans ( ความเข้มข้นของ ZnS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร )

| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 1 | 4.44 | 277 | 356.67 | 4.48 | 199 | 443.33 | 4.00 | 134 | 210.00 |
| 2 | 3.77 | 320 | 400.00 | 3.57 | 333 | 426.67 | 5.30 | 135 | 166.67 |
| 3 | 3.44 | 337 | 523.33 | 3.39 | 350 | 493.33 | 7.18 | 157 | 240.00 |
| 4 | 3.30 | 337 | 683.33 | 3.07 | 385 | 796.67 | 6.57 | 188 | 300.00 |
| 5 | 2.70 | 552 | 1083.33 | 2.87 | 449 | 800.00 | 6.28 | 161 | 233.33 |
| 6 | 2.53 | 565 | 1290.00 | 2.94 | 553 | 1020.00 | 7.69 | 179 | 243.33 |
| 7 | 2.24 | 582 | 1506.67 | 2.87 | 567 | 1233.33 | 7.45 | 202 | 233.33 |
| 8 | 2.22 | 579 | 1703.33 | 2.72 | 527 | 1413.33 | 7.16 | 217 | 183.33 |
| 9 | 2.21 | 588 | 1973.33 | 2.66 | 518 | 1673.33 | 7.34 | 234 | 243.33 |
| 10 | 2.09 | 583 | 1910.00 | 2.66 | 560 | 1763.33 | 7.53 | 241 | 236.67 |
| 11 | 2.11 | 585 | 1806.67 | 2.73 | 539 | 1860.00 | 7.70 | 244 | 230.00 |
| 12 | 2.07 | 581 | 2323.33 | 2.71 | 548 | 2103.33 | 7.44 | 211 | 296.67 |
| 13 | 2.09 | 577 | 2230.00 | 2.68 | 559 | 2116.67 | 7.64 | 249 | 266.67 |
| 14 | 2.07 | 561 | 2143.33 | 2.56 | 551 | 1946.67 | 7.52 | 251 | 253.33 |
| 15 | 2.08 | 558 | 2336.67 | 2.52 | 555 | 2390.00 | 7.65 | 249 | 253.33 |
| 16 | 2.08 | 562 | 2413.33 | 2.42 | 557 | 2500.00 | 7.26 | 261 | 236.67 |
| 17 | 2.13 | 562 | 2080.00 | 2.53 | 551 | 2260.00 | 7.58 | 245 | 266.67 |
| 18 | 2.15 | 570 | 2863.33 | 2.50 | 547 | 2350.00 | 7.56 | 256 | 230.00 |
| 19 | 2.18 | 568 | 3000.00 | 2.50 | 542 | 2536.67 | 7.89 | 254 | 276.67 |
| 20 | 2.25 | 561 | 2520.00 | 2.65 | 541 | 2076.67 | 8.01 | 253 | 283.33 |
| 21 | 2.27 | 552 | 3143.33 | 2.64 | 538 | 2266.67 | 7.98 | 248 | |
| 22 | 2.30 | 544 | 2920.00 | 2.74 | 525 | 2576.67 | 7.35 | 246 | |
| 23 | 2.31 | 542 | 2910.00 | 2.75 | 518 | 3020.00 | 7.48 | 251 | |
| 24 | 2.32 | 538 | 3036.67 | 2.8 | 510 | 2080.00 | 7.89 | 247 | |
| 25 | 2.34 | 539 | 3523.33 | 2.82 | 512 | 2333.33 | 7.15 | 262 | |

**ตารางที่ 5.8 (ต่อ)** แสดงค่าความสัมพันธ์ของการทำ Bacterial Leaching ด้วย Thiobacillus – ferrooxidans (ความเข้มข้นของ ZnS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร)

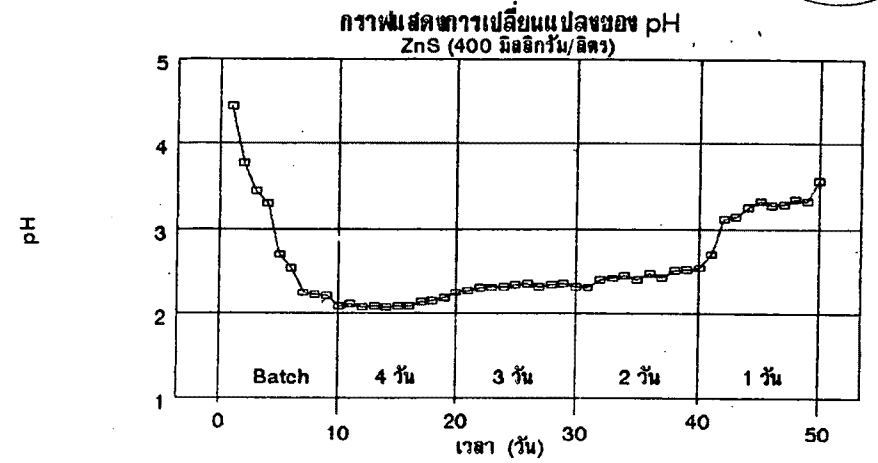
| DATE | Reactor 1 | | | Reactor 2 | | | Control | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS | pH | ORP | SS |
| 26 | 2.35 | 537 | 2390.00 | 2.85 | 514 | 2700.00 | 7.86 | 243 | |
| 27 | 2.32 | 535 | 2420.00 | 2.84 | 509 | 1983.33 | 7.58 | 259 | |
| 28 | 2.34 | 532 | 2483.33 | 2.86 | 501 | 2243.33 | 7.84 | 272 | |
| 29 | 2.35 | 525 | 3153.33 | 2.82 | 498 | 1920.00 | 7.39 | 235 | |
| 30 | 2.32 | 512 | 2416.67 | 2.83 | 495 | 2340.00 | 7.98 | 254 | |
| 31 | 2.31 | 509 | 2890.00 | 2.85 | 490 | 1746.67 | 7.15 | 248 | |
| 32 | 2.4 | 512 | 3336.67 | 2.95 | 498 | 2206.67 | 7.85 | 234 | |
| 33 | 2.42 | 501 | 2610.00 | 2.99 | 482 | 2356.67 | 7.68 | 215 | |
| 34 | 2.45 | 498 | 2540.00 | 3.21 | 485 | 2046.67 | 7.45 | 222 | |
| 35 | 2.4 | 495 | 2683.33 | 3.25 | 482 | 1956.67 | 7.78 | 230 | |
| 36 | 2.47 | 497 | 2533.33 | 3.32 | 479 | 1556.67 | 7.68 | 228 | |
| 37 | 2.43 | 482 | 2600.00 | 3.28 | 475 | 2366.67 | 7.79 | 245 | |
| 38 | 2.51 | 475 | 2413.33 | 3.29 | 473 | 2896.67 | 7.82 | 223 | |
| 39 | 2.52 | 461 | 2243.33 | 3.28 | 457 | 2190.00 | 7.71 | 201 | |
| 40 | 2.54 | 450 | 2376.67 | 3.25 | 444 | 2250.00 | 8.15 | 224 | |
| 41 | 2.7 | 432 | 2346.67 | 3.48 | 401 | 2420.00 | 8.42 | 234 | |
| 42 | 3.12 | 421 | 2050.00 | 3.42 | 390 | 1870.00 | 7.86 | 240 | |
| 43 | 3.14 | 408 | 2786.67 | 3.38 | 389 | 2033.33 | 7.85 | 238 | |
| 44 | 3.25 | 406 | 2500.00 | 3.59 | 398 | 1510.00 | 7.86 | 245 | |
| 45 | 3.32 | 398 | 2003.33 | 3.75 | 399 | 1493.33 | 7.45 | 231 | |
| 46 | 3.27 | 384 | 3136.67 | 3.65 | 379 | 1523.33 | 7.48 | 226 | |
| 47 | 3.29 | 376 | 2576.67 | 3.84 | 370 | 1300.00 | 7.85 | 232 | |
| 48 | 3.35 | 384 | 2490.00 | 3.76 | 391 | 1256.67 | 7.26 | 245 | |
| 49 | 3.32 | 375 | 2113.33 | 3.82 | 360 | 1236.67 | 7.56 | 201 | |
| 50 | 3.57 | 365 | 1936.67 | 3.79 | 365 | 1373.33 | 7.75 | 235 | |

หมายเหตุ :

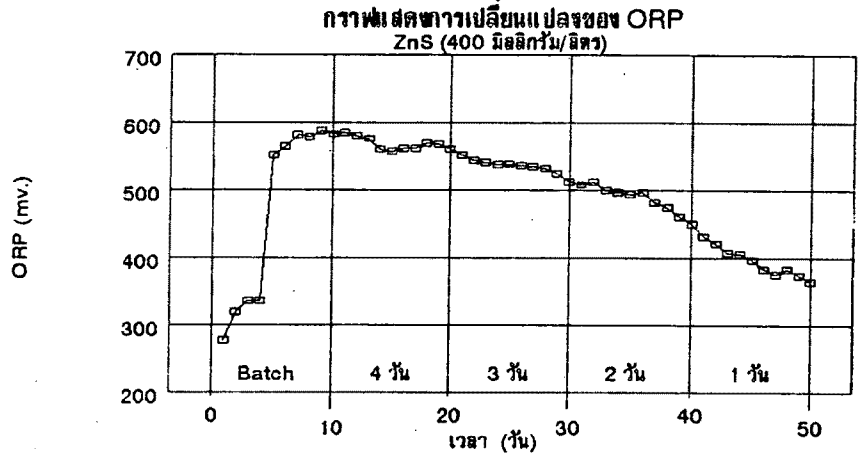
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร

Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัมต่อลิตร

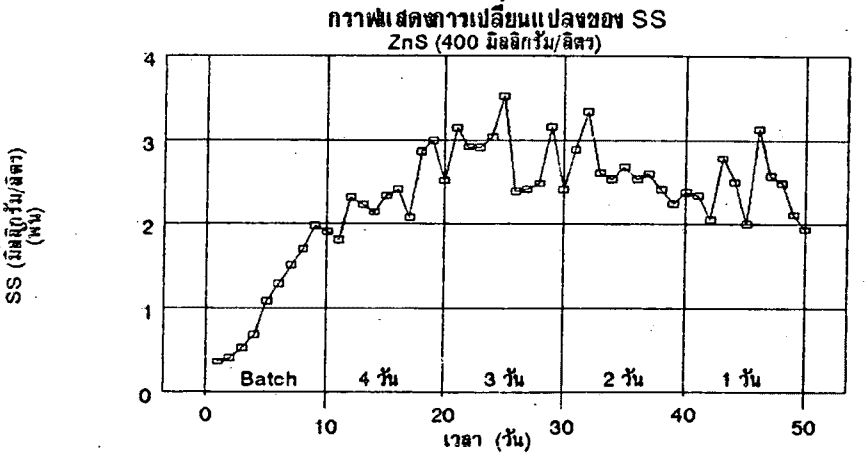
Control Run ไม่เติม $FeSO_4.7H_2O$




(ก.)

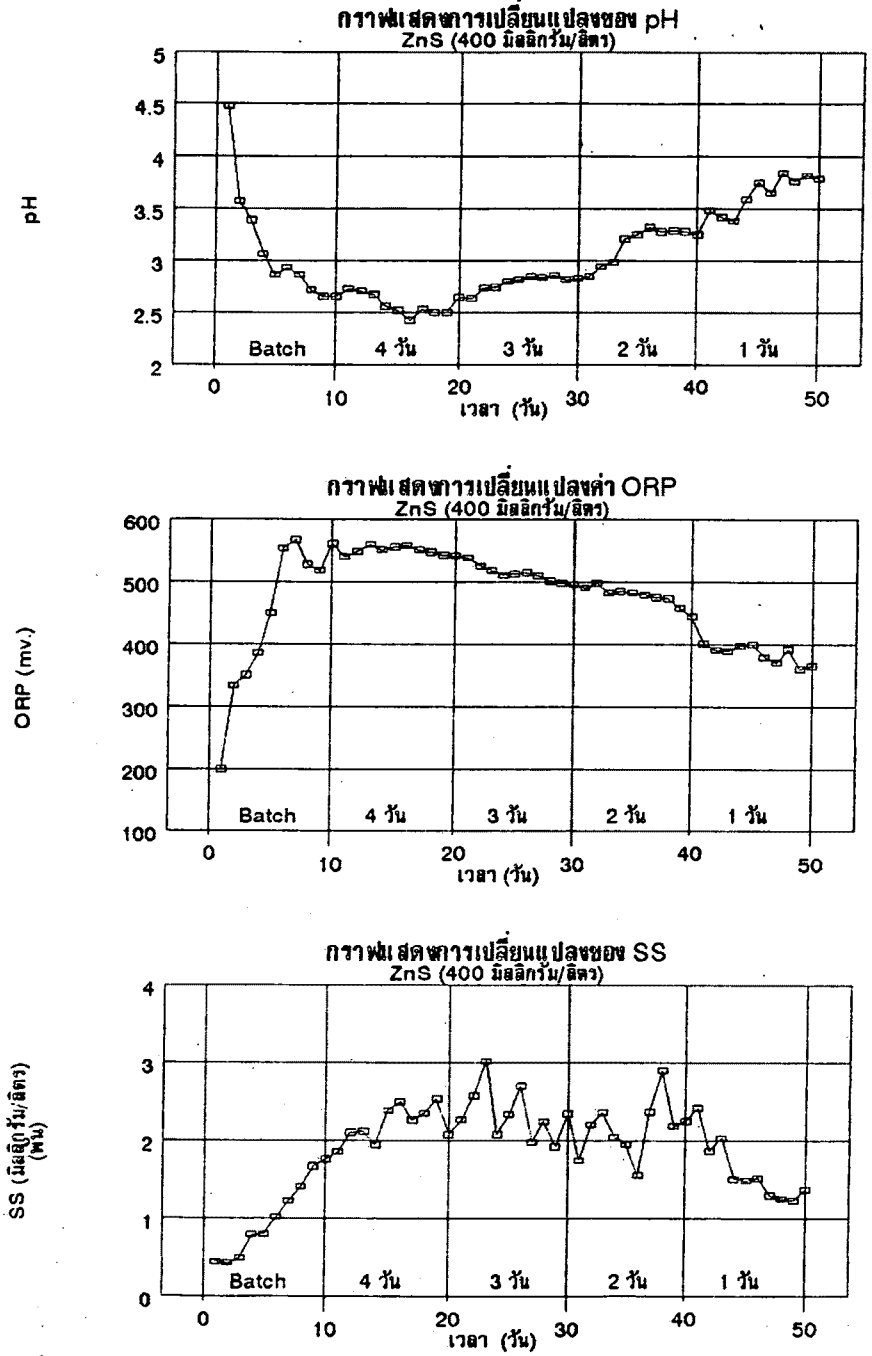



(ข.)

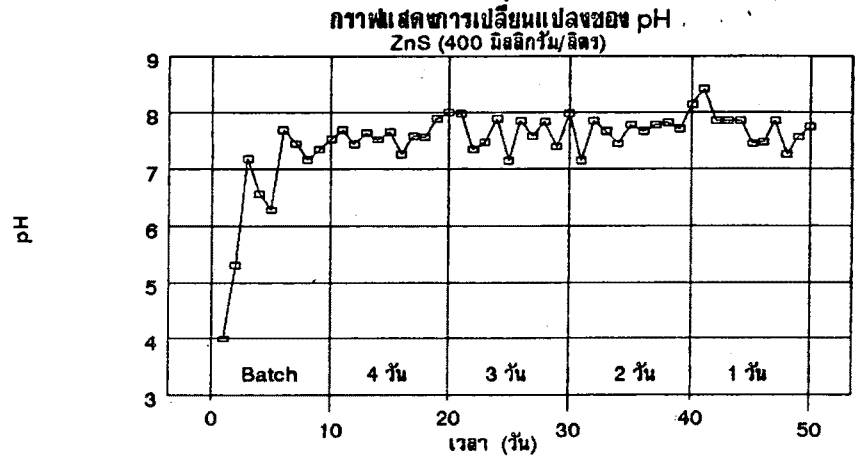



(ค.)

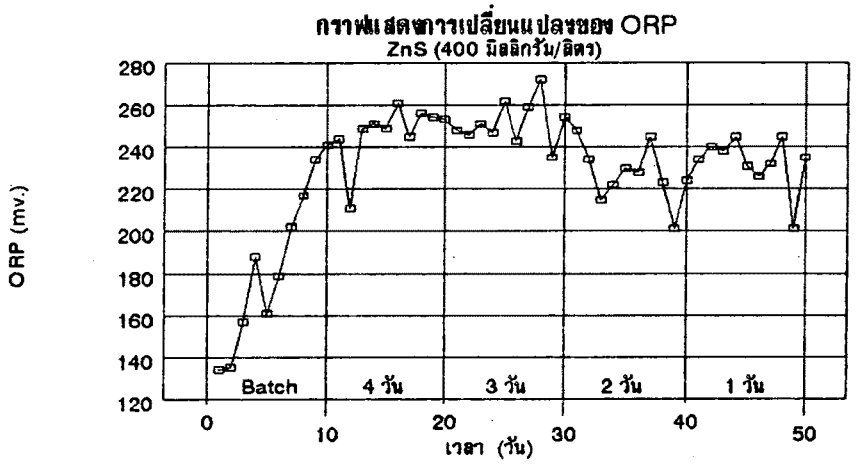
**รูปที่ 5.21 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ pH ORP และ SS ในการทำ Bacterial Leaching ของ Reactor 1 ความเข้มข้นของ ZnS 400 มิลลิกรัมต่อลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัมต่อลิตร**



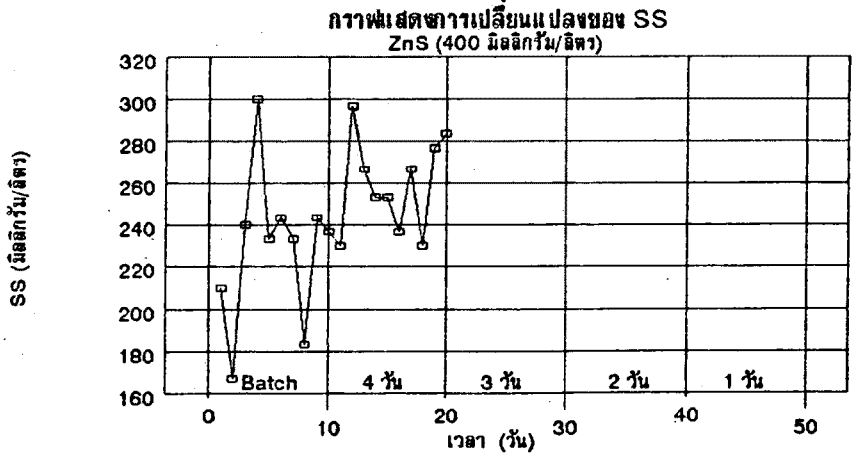

**รูปที่ 5.22** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ ก. ค่าพีเอช ข. ค่าโอพีอาร์ และ ค. ปริมาณของแข็งแขวนลอย ของ Bacterial Leaching ของ Reactor 2 ความเข้มข้นของ ZnS 400 มิลลิกรัม/ลิตร + $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัม/ลิตร




(ก.)

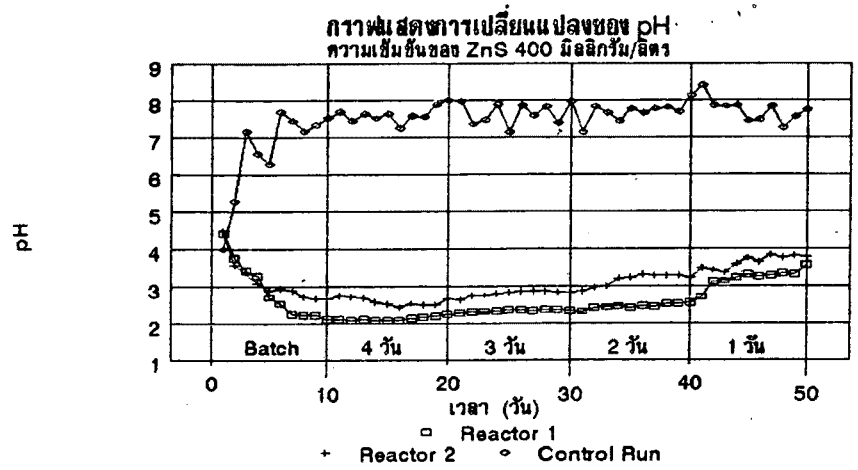



(ข.)

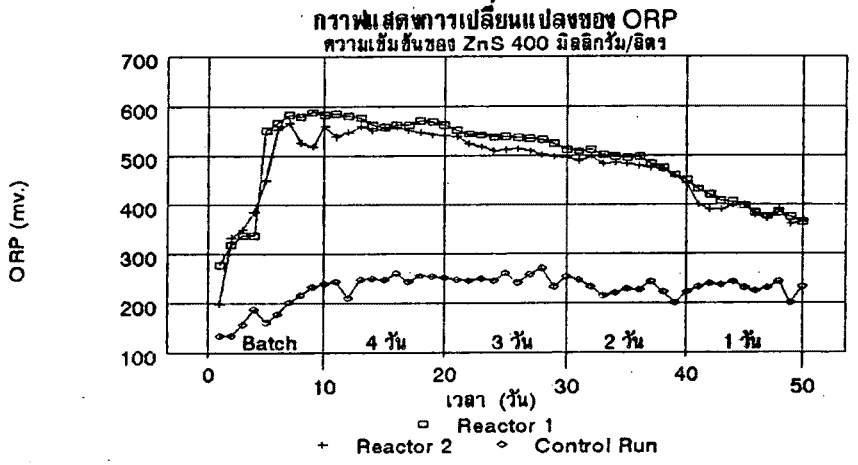



(ค.)

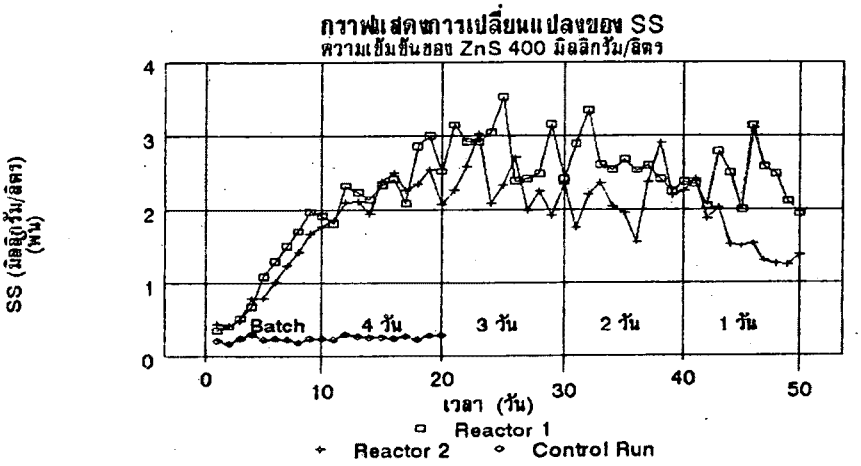
**รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่วัดได้ระหว่าง Bacterial Leaching ของ Control Run ความเข้มข้นของ ZnS 400 มิลลิกรัม/ลิตร**




(ก.)




(ข.)




(ค.)

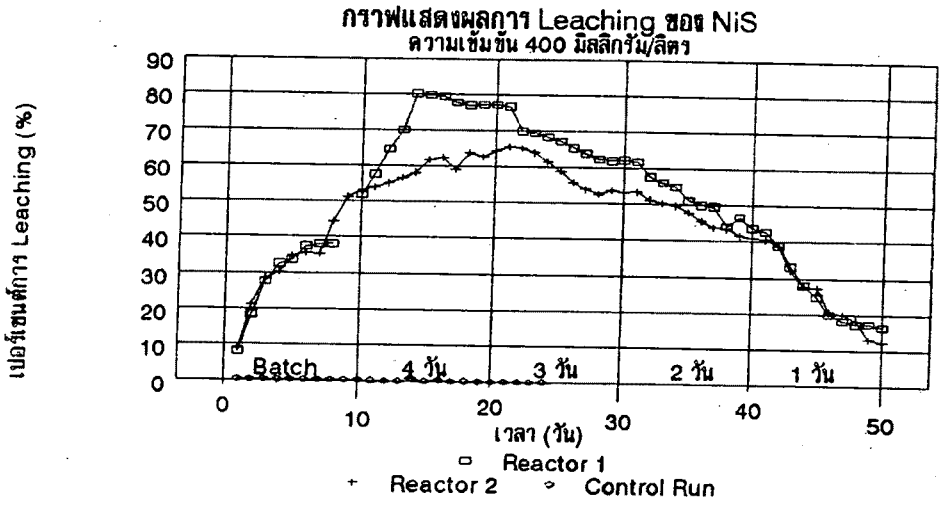
**รูปที่ 5.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการเติมสารอาหาร และค่า Bacterial Leaching ของ Reactor ทั้งสาม**

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Ni) ในอัตราปฏิกรณ์ต่างๆ ความเข้มข้น NiS 400 มิลลิกรัม/ลิตร

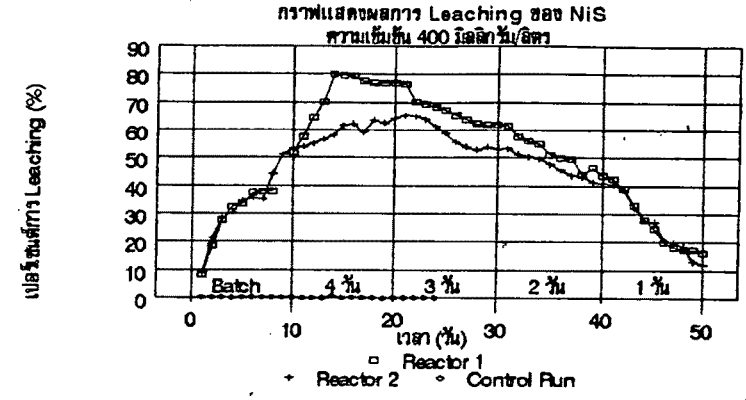
| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reacter 1 | | Reacter 2 | | ControlRun | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 1 | 32.45 | 8.11 | 35.45 | 8.86 | 0.97 | 0.24 |
| 2 | 73.48 | 18.37 | 84.5 | 21.13 | 0.89 | 0.22 |
| 3 | 110.49 | 27.62 | 113.48 | 28.37 | 0.86 | 0.22 |
| 4 | 130.2 | 32.55 | 121.2 | 30.30 | 0.85 | 0.21 |
| 5 | 134.3 | 33.58 | 138.8 | 34.70 | 1.28 | 0.32 |
| 6 | 149.58 | 37.40 | 142.5 | 35.63 | 1.22 | 0.31 |
| 7 | 151.9 | 37.98 | 141.2 | 35.30 | 1.24 | 0.31 |
| 8 | 152.23 | 38.06 | 177.9 | 44.48 | 1.21 | 0.30 |
| 9 | 197.61 | 49.40 | 204.4 | 51.10 | 1.21 | 0.30 |
| 10 | 207.26 | 51.82 | 213.4 | 53.35 | 1.22 | 0.30 |
| 11 | 230.85 | 57.71 | 215.9 | 53.98 | 0.37 | 0.09 |
| 12 | 258.75 | 64.69 | 220.4 | 55.10 | 0.30 | 0.07 |
| 13 | 279.93 | 69.98 | 226.4 | 56.60 | 0.29 | 0.07 |
| 14 | 320.41 | 80.10 | 232.6 | 58.15 | 3.60 | 0.90 |
| 15 | 318.48 | 79.62 | 246.8 | 61.70 | 0.25 | 0.06 |
| 16 | 317.89 | 79.47 | 249.6 | 62.40 | 1.02 | 0.25 |
| 17 | 310.8 | 77.70 | 236.78 | 59.20 | 0.27 | 0.07 |
| 18 | 307.87 | 76.97 | 254.9 | 63.73 | 0.38 | 0.10 |
| 19 | 308.48 | 77.12 | 250.4 | 62.60 | 0.01 | 0.00 |
| 20 | 308.78 | 77.20 | 257.4 | 64.35 | 0.34 | 0.09 |
| 21 | 306.87 | 76.72 | 261.9 | 65.48 | 0.25 | 0.06 |
| 22 | 279.78 | 69.95 | 260.4 | 65.10 | 0.22 | 0.05 |
| 23 | 277.84 | 69.46 | 255.9 | 63.98 | 0.34 | 0.08 |
| 24 | 273.49 | 68.37 | 245.8 | 61.45 | 0.30 | 0.08 |
| 25 | 268.91 | 67.23 | 235.78 | 58.95 | | |

ตารางที่ 5.9 (ต่อ) แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Ni) ในอัตราส่วนความเข้มข้น NiS 400 มิลลิกรัม/ลิตร

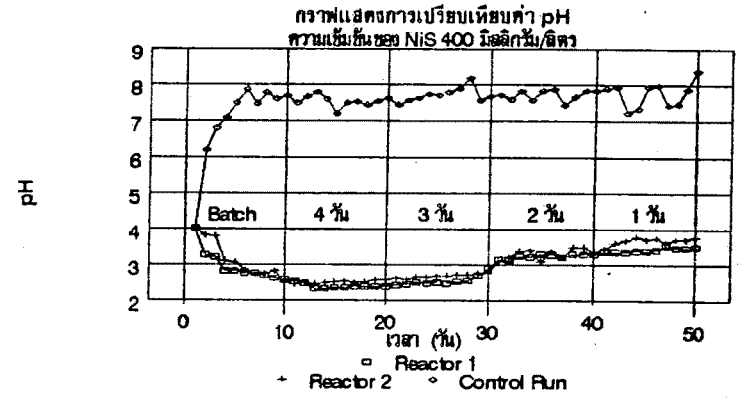
| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reacter 1 | | Reacter 2 | | ControlRun | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 26 | 261.48 | 65.37 | 222.65 | 55.66 | | |
| 27 | 255.49 | 63.87 | 215.89 | 53.97 | | |
| 28 | 249.19 | 62.30 | 210.89 | 52.72 | | |
| 29 | 247.89 | 61.97 | 215.48 | 53.87 | | |
| 30 | 248.79 | 62.20 | 212.58 | 53.15 | | |
| 31 | 246.98 | 61.75 | 213.59 | 53.40 | | |
| 32 | 230.45 | 57.61 | 205.48 | 51.37 | | |
| 33 | 224.59 | 56.15 | 201.48 | 50.37 | | |
| 34 | 219.78 | 54.95 | 198.78 | 49.70 | | |
| 35 | 204.48 | 51.12 | 191.5 | 47.88 | | |
| 36 | 199.89 | 49.97 | 182.45 | 45.61 | | |
| 37 | 198.45 | 49.61 | 175.5 | 43.88 | | |
| 38 | 176.59 | 44.15 | 173.56 | 43.39 | | |
| 39 | 186.48 | 46.62 | 165.98 | 41.50 | | |
| 40 | 174.59 | 43.65 | 163.58 | 40.90 | | |
| 41 | 170.59 | 42.65 | 162.48 | 40.62 | | |
| 42 | 155.49 | 38.87 | 154.89 | 38.72 | | |
| 43 | 132.59 | 33.15 | 128.49 | 32.12 | | |
| 44 | 112.15 | 28.04 | 110.25 | 27.56 | | |
| 45 | 98.78 | 24.70 | 108.78 | 27.20 | | |
| 46 | 79.59 | 19.90 | 82.48 | 20.62 | | |
| 47 | 73.25 | 18.31 | 79.87 | 19.97 | | |
| 48 | 68.98 | 17.25 | 73.48 | 18.37 | | |
| 49 | 69.48 | 17.37 | 52.48 | 13.12 | | |
| 50 | 65.78 | 16.45 | 48.59 | 12.15 | | |



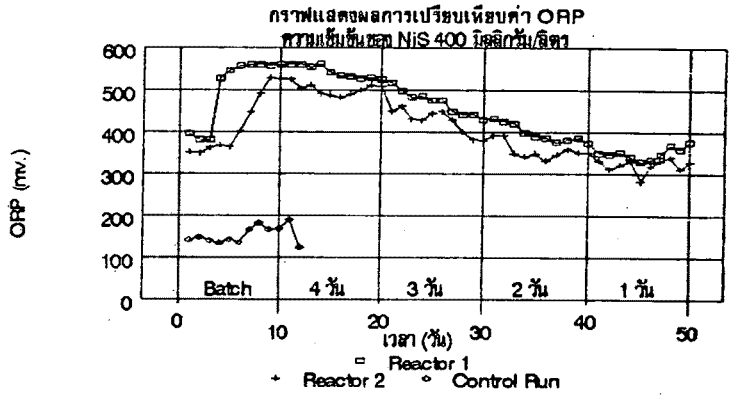

**รูปที่ 5.25** กราฟเปรียบเทียบผลการ Leaching ของ NiS เมื่อปริมาณสารอาหารต่างกัน
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัม/ลิตร
Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัม/ลิตร
Control Run ไม่เติม



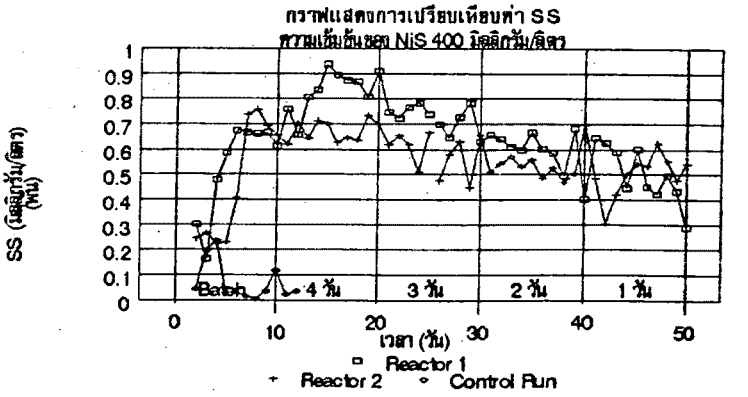

(ก.)




(ข.)




(ค.)




(ง.)

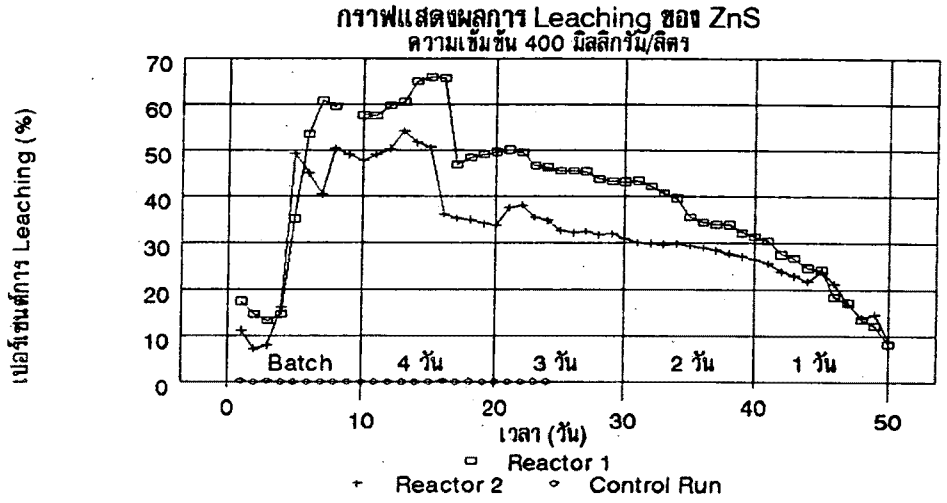
**รูปที่ 5.26** กราฟแสดงผลการทดลองขณะทำ Bioleaching ของ NiS ใน Reactor ทั้งสาม

ตารางที่ 5.10 แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Zn) ในตัวปฏิกรณ์ต่างๆ ความเข้มข้น ZnS 400 มิลลิกรัม/ลิตร

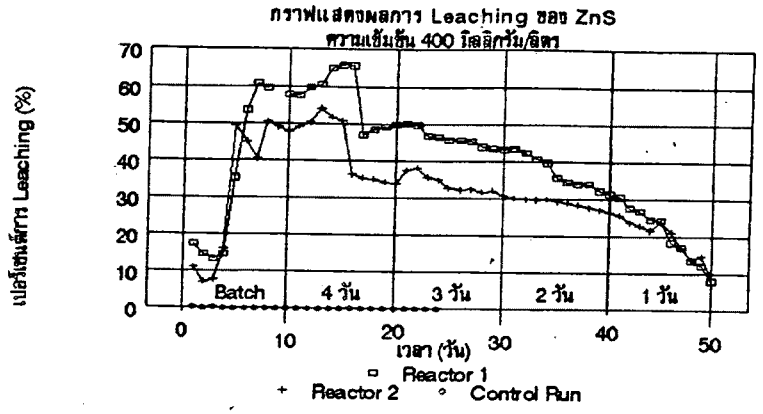
| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reactor 1 | | Reactor 2 | | Control Run | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 1 | 69.40 | 17.35 | 44.60 | 11.15 | 1.06 | 0.27 |
| 2 | 58.40 | 14.60 | 28.60 | 7.15 | 0.19 | 0.05 |
| 3 | 53.20 | 13.30 | 31.40 | 7.85 | 1.11 | 0.28 |
| 4 | 58.40 | 14.60 | 64.80 | 16.20 | 0.10 | 0.02 |
| 5 | 141.00 | 35.25 | 197.20 | 49.30 | 0.17 | 0.04 |
| 6 | 214.00 | 53.50 | 180.20 | 45.05 | 0.09 | 0.02 |
| 7 | 243.00 | 60.75 | 161.60 | 40.40 | 0.06 | 0.02 |
| 8 | 238.00 | 59.50 | 201.60 | 50.40 | 0.07 | 0.02 |
| 9 | 248.00 | 62.00 | 196.20 | 49.05 | 0.22 | 0.05 |
| 10 | 230.75 | 57.69 | 191.00 | 47.75 | 0.07 | 0.02 |
| 11 | 230.13 | 57.53 | 196.75 | 49.19 | 0.05 | 0.01 |
| 12 | 238.88 | 59.72 | 201.25 | 50.31 | 0.03 | 0.01 |
| 13 | 241.88 | 60.47 | 216.75 | 54.19 | 0.03 | 0.01 |
| 14 | 260.25 | 65.06 | 206.88 | 51.72 | 0.01 | 0.00 |
| 15 | 263.75 | 65.94 | 202.63 | 50.66 | 0.25 | 0.06 |
| 16 | 262.75 | 65.69 | 145.00 | 36.25 | 1.02 | 0.25 |
| 17 | 187.60 | 46.90 | 141.40 | 35.35 | 0.27 | 0.07 |
| 18 | 193.80 | 48.45 | 140.00 | 35.00 | 0.38 | 0.10 |
| 19 | 196.53 | 49.13 | 136.80 | 34.20 | 0.01 | 0.00 |
| 20 | 198.75 | 49.69 | 135.00 | 33.75 | 0.34 | 0.09 |
| 21 | 200.38 | 50.10 | 150.26 | 37.57 | 0.25 | 0.06 |
| 22 | 198.56 | 49.64 | 152.59 | 38.15 | 0.22 | 0.05 |
| 23 | 186.56 | 46.64 | 142.58 | 35.65 | 0.34 | 0.08 |
| 24 | 185.41 | 46.35 | 139.56 | 34.89 | 0.30 | 0.08 |
| 25 | 182.56 | 45.64 | 130.56 | 32.64 | | |

ตารางที่ 5.10 (ต่อ) แสดงผลการ Leaching Heavy Metal (Zn) ในน้ำเสียกรณีต่างๆ ความเข้มข้น ZnS 400 มิลลิกรัม/ลิตร

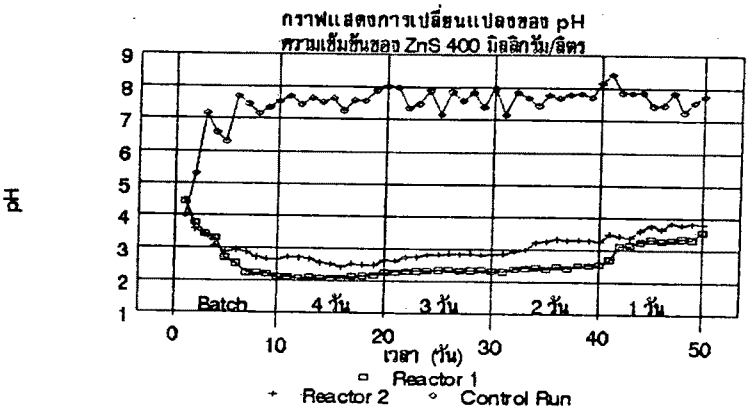
| วัน | ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการ Leaching | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reactor 1 | | Reactor 2 | | Control Run | |
| | มก./ล. | % | มก./ล. | % | มก./ล. | % |
| 26 | 182.12 | 45.53 | 128.97 | 32.24 | | |
| 27 | 181.89 | 45.47 | 129.86 | 32.47 | | |
| 28 | 175.34 | 43.84 | 126.98 | 31.75 | | |
| 29 | 173.68 | 43.42 | 127.94 | 31.99 | | |
| 30 | 172.84 | 43.21 | 123.84 | 30.96 | | |
| 31 | 173.89 | 43.47 | 120.45 | 30.11 | | |
| 32 | 168.94 | 42.24 | 119.78 | 29.95 | | |
| 33 | 162.84 | 40.71 | 118.78 | 29.70 | | |
| 34 | 158.65 | 39.66 | 119.48 | 29.87 | | |
| 35 | 142.56 | 35.64 | 117.45 | 29.36 | | |
| 36 | 138.29 | 34.57 | 115.87 | 28.97 | | |
| 37 | 136.51 | 34.13 | 113.78 | 28.45 | | |
| 38 | 135.87 | 33.97 | 110.94 | 27.74 | | |
| 39 | 128.97 | 32.24 | 108.48 | 27.12 | | |
| 40 | 125.49 | 31.37 | 105.78 | 26.45 | | |
| 41 | 122.35 | 30.59 | 102.70 | 25.68 | | |
| 42 | 110.24 | 27.56 | 95.49 | 23.87 | | |
| 43 | 106.84 | 26.71 | 91.78 | 22.95 | | |
| 44 | 98.56 | 24.64 | 86.74 | 21.69 | | |
| 45 | 96.85 | 24.21 | 95.78 | 23.95 | | |
| 46 | 73.56 | 18.39 | 84.72 | 21.18 | | |
| 47 | 68.51 | 17.13 | 67.49 | 16.87 | | |
| 48 | 54.15 | 13.54 | 55.48 | 13.87 | | |
| 49 | 48.97 | 12.24 | 58.74 | 14.69 | | |
| 50 | 32.56 | 8.14 | 35.78 | 8.95 | | |



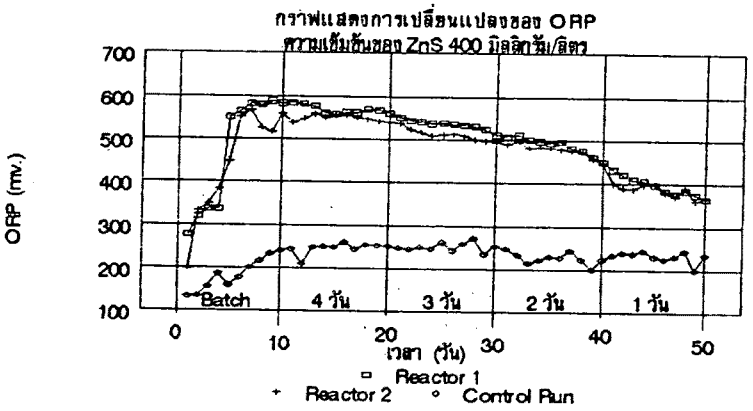

**รูปที่ 5.27** กราฟเปรียบเทียบผลการ Leaching ของ ZnS เมื่อปริมาณสารอาหารต่างกัน
Reactor 1 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 1.00 กรัม/ลิตร
Reactor 2 เติม $FeSO_4.7H_2O$ 0.50 กรัม/ลิตร
Control Run ไม่เติม



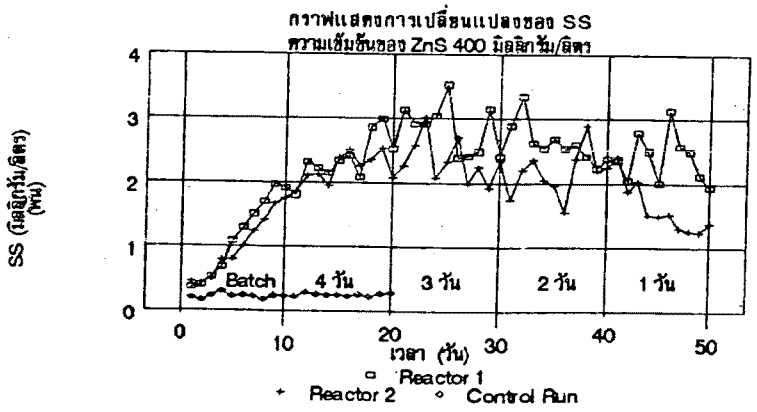

(ก.)




(ข.)

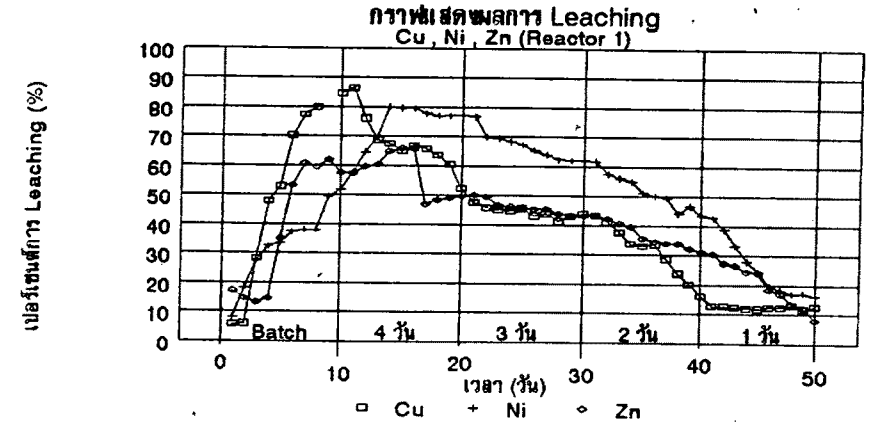



(ค.)

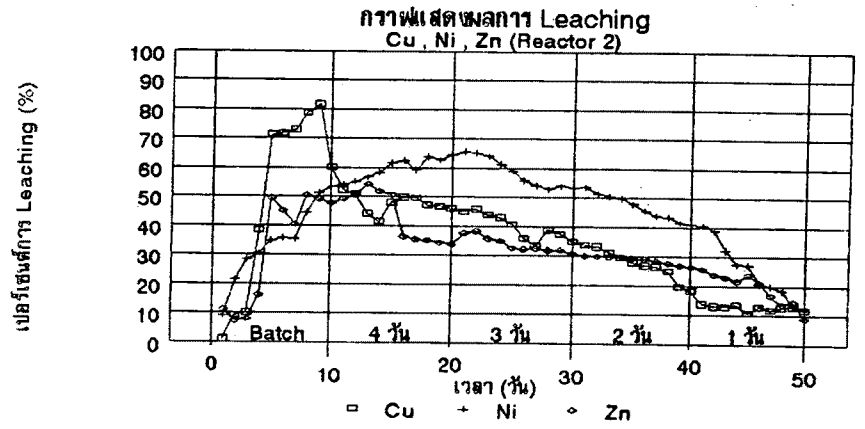



(ง.)

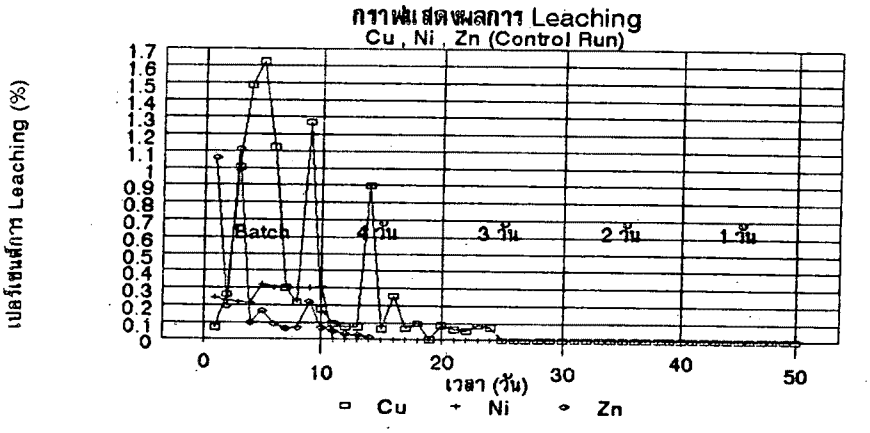
**รูปที่ 5.28** กราฟแสดงผลการทดลองละลาย Bioleaching ของ ZnS ใน Reactor ทั้งสาม




(ก.)




(ข.)




(ค.)

**รูปที่ 5.29** กราฟแสดงผลการ Leaching โดยระยะทดสอบที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร