

## การศึกษาการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของ อาร์เซนไฟไรต์โดยการเคลือบผิว

รมัยมาศ จันท์ขาว<sup>1</sup>

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ประชาชื่น หลักสี่ กรุงเทพฯ 10210

และ วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของอาร์เซนไฟไรต์ที่เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวเคมี โดยการเคลือบผิวด้วยไซโตเดียมซิลิเกตเพื่อป้องกันไม่ให้ออกซิเจนไปสัมผัสกับผิวแร่และป้องกันมิให้เชื้อแบคทีเรียดูดซับบนผิวแร่ ในการทดลองใช้ 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ที่ pH 1 3 5 และ 7 เคลือบบนผิวอาร์เซนไฟไรต์ (ขนาดอนุภาค < 300 ไมโครเมตร หรือค่าเฉลี่ยประมาณ 145 ไมโครเมตร) จากการทดลองพบว่าอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวที่ pH 3 และ 5 เป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากตรวจพบปริมาณเหล็กและสารหนูในสารละลายมีปริมาณน้อยกว่าสภาวะอื่น เมื่อนำอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วย 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ที่ pH 3 และ 5 มาทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีด้วย 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่ pH 2 4 และ 5 พบว่าผิวอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวที่ pH 3 มีประสิทธิภาพทนต่อการออกซิเดชันทางเคมีดีกว่าการเคลือบผิวที่ pH 5 นอกจากนี้ในการทดลองดูดซับของจุลินทรีย์บนผิวอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิวโดยใช้ *Thiobacillus ferrooxidans* พบว่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียบนผิวอาร์เซนไฟไรต์มีความแตกต่างกัน และเนื่องจากการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด (maximum adsorption capacity,  $X_{AM}$ ) บนผิวอาร์เซนไฟไรต์ได้ ซึ่งพบว่าอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิวมีการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด เท่ากับ  $4.710 \times 10^9$  และ  $7.231 \times 10^9$  เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไฟไรต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวด้วยไซโตเดียมซิลิเกตสามารถลดการดูดซับของ *Thiobacillus ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนไฟไรต์

**คำสำคัญ :** การเคลือบผิว / การออกซิเดชัน / อาร์เซนไฟไรต์ / *Thiobacillus ferrooxidans* / แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

<sup>1</sup> อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

## The Study of Inhibition of Arsenopyrite Oxidation by Coating Treatment

Ramaimas Chankoa<sup>1</sup>

Dhurakijpundit University, Prachacheun Rd., Laksi, Bangkok 10210

and Virote Boonamnuayvitaya<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

### Abstract

The chemical and biochemical oxidation of arsenopyrite caused the release of arsenic to environment. In this work, we studied the inhibition arsenopyrite oxidation by coating with sodium silicate. In the experiment, 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  at pH 1, 3, 5 and 7 was used to coat on the particles (size < 300  $\mu\text{m}$  or average size 145  $\mu\text{m}$ ) of arsenopyrite mineral. We chose pH at pH 3 and 5 as appropriate condition for the coating since the amount of iron and arsenic detected in solution was less than other condition (Fe conc. < 0.02 ppm, As conc. < 0.05 ppm) Arsenopyrite particles coated with 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  at pH 3 and 5 were subject to test for the surface resistance to chemical oxidation by 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  at pH 2, 4 and 5. It was found surface coating at pH 3 resisted to chemical oxidation superior than that of coating at pH 5. In the microbial adsorption experiment on arsenopyrite coated and uncoated surfaces using *Thiobacillus ferrooxidans*, it demonstrated that there was some difference in the number adsorbed cells. Since the adsorption followed the Langmuir adsorption isotherm, therefore we could analyze the maximum adsorption capacity ( $X_{AM}$ ) of the particle surface. It was found  $X_{AM}$  for the coated and uncoated arsenopyrite surface was  $4.710 \times 10^9$  and  $7.231 \times 10^9$  cells/g of FeAsS respectively. So we concluded that coated sodium silicate suppressed the adsorption of *Thiobacillus ferrooxidans*.

**Keywords :** Coating / Oxidation / Arsenopyrite / *Thiobacillus ferrooxidans* /  
Langmuir Adsorption Isotherm

---

<sup>1</sup> Lecturer, Department of General Science.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Chemical Engineering.

## 1. บทนำ

กรณีปัญหาการแพร่กระจายของสารหนูที่อำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีการปนเปื้อนของสารหนูทั้งในดินและในน้ำในระดับที่ความเข้มข้นสูง จนทำให้ราษฎรที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ดังกล่าวเกิดการเจ็บป่วยเป็นโรคใช้ดำ [1] อนงค์ [2] รายงานว่าการปนเปื้อนของสารหนูพบที่เกิดมาจากการละลายของแร่อาร์เซนโอไฟไรต์ที่แยกออกมาจากแร่ดีบุกในกระบวนการแต่งแร่โดยแร่จะถูกกองทิ้งไว้ในเขตเหมืองแร่ โดยการกองแร่เป็นไปอย่างไม่เหมาะสม หรือเกิดจากเหมืองที่ปิดแล้วซึ่งยังมีแร่อาร์เซนโอไฟไรต์อยู่นั้นไม่มีการป้องกันให้สัมผัสกับอากาศและน้ำ ซึ่งทำให้แร่อาร์เซนโอไฟไรต์เกิดการออกซิเดชันทำให้สารหนูแพร่กระจายออกมาและถูกนำพาลงสู่บ่อน้ำ อย่างไรก็ตาม Silverman และคณะ [3] พบว่าสารหนูที่แพร่กระจายออกมานั้นเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและชีวเคมี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะลดการแพร่กระจายของสารหนูที่แหล่งกำเนิดซึ่งได้แก่ เหมืองแร่ดีบุกที่ปล่อยรังหรือกองขี้แร่ที่ยังไม่บำบัด ไม่ให้แพร่ออกไปสู่สภาวะแวดล้อม โดยทำการศึกษาวิธีการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์

ที่ผ่านมา Evangelou และคณะ [4] ได้ทำการวิจัยการยับยั้งออกซิเดชันของไฟไรต์ทางเคมีโดยทำการเคลือบผิวไฟไรต์ด้วยเฟอร์ริกฟอสเฟต ( $FePO_4$ ) ซึ่งเมื่อสารละลาย leaching ไหลผ่านลงไปถึงผิวของไฟไรต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะออกซิไดซ์ผิวของไฟไรต์เกิดเหล็กเฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) และรวมตัวกับฟอสเฟต ( $PO_4^{3-}$ ) เกิดตะกอนเฟอร์ริกฟอสเฟตเคลือบที่ผิวไฟไรต์ จากนั้นนำไฟไรต์ที่เคลือบผิวแล้วมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเคลือบผิวไฟไรต์เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์ริกฟอสเฟตโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 0.029 โมลต่อลิตร ในโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ )  $10^{-3}$  โมลต่อลิตร โดยมีโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) 0.2 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Zhang และคณะ [5] ทำการวิจัยการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ทางเคมีโดยทำการเคลือบผิวไฟไรต์ด้วยเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) เมื่อสารละลาย leaching ไหลผ่านลงไปถึงผิวของไฟไรต์ จะทำให้เกิดตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เคลือบที่ผิวของไฟไรต์ จากนั้นนำไฟไรต์ที่เคลือบผิวแล้วมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเคลือบผิวไฟไรต์เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 0.147 โมลต่อลิตร โดยมีโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และโซเดียมอะซิเตต ( $NaOAC$ ) 0.01 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ที่ pH 4-6 สามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและผิวเคลือบที่ได้สามารถทนกรดได้เล็กน้อย

Zhang และคณะ [6] ทำการวิจัยการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ทางเคมีโดยทำการเคลือบผิวไฟไรต์ด้วย Ferric hydroxide-Silica จากนั้นนำไฟไรต์ที่เคลือบผิวแล้วมาทดสอบความสามารถในการยับยั้งออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการเคลือบผิวไฟไรต์เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 0.145 โมลต่อลิตร กับโซเดียมเมตาซิลิเกต ( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ ) 0.001 โมลต่อลิตร โดยมีโซเดียมคลอไรด์ ( $NaCl$ ) 0.1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และโซเดียมอะซิเตต ( $NaOAC$ ) 0.01 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ ที่ pH 4-6 สามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่า ที่ pH 2 ซิลิเกตมีผลต่อการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์และผลของการทดสอบประสิทธิภาพของผิวเคลือบ

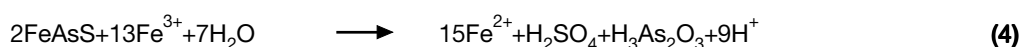
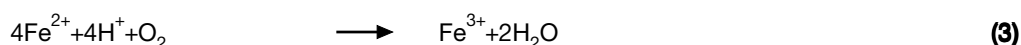
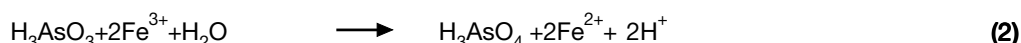
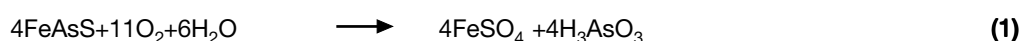
Vandiviere และคณะ [7] ทำการวิจัยการเปรียบเทียบการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ทางเคมีและทางชีวเคมีโดยทำการเคลือบผิวไฟไรต์แบบต่างๆ ในสภาวะธรรมชาติเพื่อทดสอบความทนทานของผิวเคลือบ โดยให้ สารละลาย leaching ไหลผ่านคอลัมน์พีวีซี (PVC) ในการทดลองนี้ประกอบด้วยคอลัมน์ควบคุม ไม่มีการเคลือบผิวและไม่ใส่ปูนขาว คอลัมน์ phosphate coating คอลัมน์ silica+limestone coating และคอลัมน์ limestone coating ก่อนใช้สารละลาย leaching 24 ชั่วโมง ในแต่ละคอลัมน์ต้อง leaching ด้วย di-H<sub>2</sub>O 1 ลิตร เมื่อสารละลาย leaching ไหลผ่านคอลัมน์จนหมดทิ้งไว้ 1-3 สัปดาห์ จากนั้นนำคอลัมน์ไปตั้งไว้กลางแจ้ง เมื่อเวลาผ่านไป 4-7 เดือนเติมเชื้อ *T. ferrooxidans* เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการออกซิเดชันของไฟไรต์ทางชีวเคมี หลังจาก 21 เดือน จากผลการทดลองพบว่า การเคลือบผิวไฟไรต์ด้วยซิลิเกต สามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่น

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการเคลือบผิวไฟไรต์ด้วยโซเดียมซิลิเกตสามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์ได้ดีกว่าวิธีอื่น ในงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไฟไรต์โดยการเคลือบผิวมาใช้เคลือบผิวอาร์เซนไฟไรต์เพื่อยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและทางชีวเคมี

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การออกซิเดชันทางเคมี

สารหนูในรูปอาร์เซนไฟไรต์หรือในรูปอื่นที่มีซัลไฟด์ประกอบปกติจะไม่ละลายหรือละลายได้น้อยมาก แต่เมื่อได้รับความร้อน ความชื้น และอากาศจากธรรมชาติ จะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีทำให้เกิดสารหนูอาร์ซีนีซและสารหนูอาร์ซีนีเนตแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ดังสมการที่ 1 ถึง 4 [8]



### 2.2 การออกซิเดชันทางชีวเคมี

*T. ferrooxidans* เป็นแบคทีเรียชนิดแกรมลบ รูปร่างท่อนสั้นขนาด 0.5-1.5 ไมโครเมตร มักอยู่เป็นเซลล์เดี่ยว บางโอกาสอาจอยู่เป็นคู่ สามารถพบได้ทั่วไปในแร่ไฟไรต์ อาร์เซนไฟไรต์ หรือแร่ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ สามารถเจริญได้ที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส อาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ได้รับพลังงานในการเติบโตจากการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน

Torma, A. E. [9] และ Fernandez และคณะ [10] ได้อธิบายการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางชีวเคมีของอาร์เซนไฟไรต์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ดังนี้

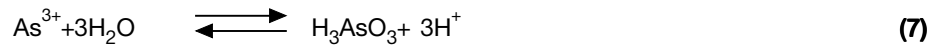
Anodic oxidation :



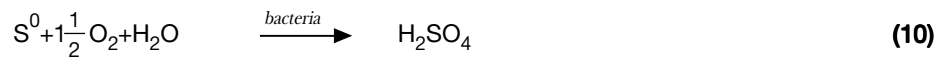
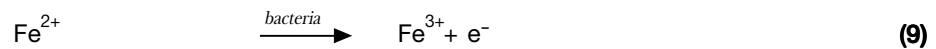
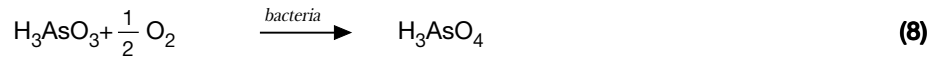
Cathodic oxidation :



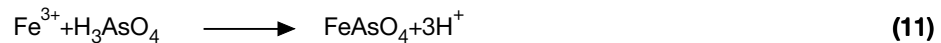
โดย  $\text{As}^{3+}$  ไอออนในสมการที่ (5) สามารถละลายน้ำเกิดเป็นกรดอาร์ซีนัส (arsenous acid) ดังสมการที่ (7)



หลังจากนั้นแบคทีเรียจะออกซิไดซ์กรดอาร์ซีนัส ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) ที่ได้จากสมการที่ (7)  $\text{Fe}^{2+}$  และ S ที่ได้จากสมการที่ (5) ดังสมการที่ (8) และสมการที่ (10)



$\text{Fe}^{3+}$  ไอออนที่ได้จากสมการ (9) สามารถรวมตัวกับกรดอาร์ซีนิก ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ) เกิดตะกอนเฟอร์ริกอาร์ซีนิต ( $\text{FeAsO}_4$ )



ดังนั้นเมื่ออาร์เซนไฟไรต์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะเกิดเป็น  $\text{As}^{3+}$  ใน  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  ซึ่งละลายน้ำได้ จากสมการที่ (7)  $\text{As}^{5+}$  ใน  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  ซึ่งเป็นตะกอนจากสมการที่ (8) และน้ำมีสภาพเป็นกรดเนื่องจาก  $\text{H}_2\text{SO}_4$  จากสมการที่ (10)

### 2.3 แบบจำลองการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดและ adsorbent แต่ละชนิด มีสมมูลการดูดซับที่แตกต่างกัน จึงต้องศึกษาสมการ adsorption isotherm เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบปริมาณจุลินทรีย์ที่ดูดซับบนผิว adsorbent แต่ละชนิด สมการ adsorption isotherm ที่นิยมนำมาใช้อธิบายสมมูลการดูดซับของจุลินทรีย์บนผิว adsorbent คือ แบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) เนื่องจากทำความเข้าใจได้ง่าย และสามารถอธิบายการดูดซับได้ดี

สมมติฐานของทฤษฎีนี้มีแนวความคิดจากแบบจำลอง monolayer ดังนี้

- ก. จุลินทรีย์สามารถดูดซับที่ทุกๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส adsorbent
- ข. แต่ละเซลล์ของจุลินทรีย์ไม่มีผลกระทบต่อกัน รวมถึงตำแหน่งของจุลินทรีย์ไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ
- ค. พลังงานและกลไกการดูดซับของทุกๆ เซลล์บนผิว adsorbent เกิดขึ้นเหมือนกัน
- ง. การดูดซับของจุลินทรีย์บนแต่ละพื้นที่ผิว adsorbent จะเกิดเป็นแบบ monolayer

สมการแสดงความสัมพันธ์การดูดซับของจุลินทรีย์บนผิว adsorbent



Langmuir Adsorption Isotherm กำหนดให้

$$\theta = \frac{X_A}{X_{AM}} \quad (13)$$

โดยที่

$X_A$  คือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ดูดซับบนผิว adsorbent (เซลล์ต่อกรัม)

$X_{AM}$  คือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่สามารถดูดซับบนผิว adsorbent ที่มากที่สุด (เซลล์ต่อกรัม)

$\theta$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมด้วยจุลินทรีย์ต่อพื้นที่ผิวที่ถูกดูดซับทั้งหมด

อัตราการดูดซับ (adsorption) ต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 14

$$r_a = k_a X_L (1 - \theta) \quad (14)$$

โดยที่  $k_a$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

$X_L$  คือ ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในสารละลาย (เซลล์ต่อมิลลิกรัม)

อัตราการหลุดลอก (desorption) ต่อหน่วยพื้นที่ผิวทั้งหมดแสดงดังสมการที่ 15

$$r_d = k_d \theta \quad (15)$$

โดยที่  $k_d$  คือ ค่าคงที่ของการหลุดลอก

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล (equilibrium)

$$k_a X_L(1 - \theta) = k_d \theta \quad (16)$$

$$\theta = \frac{k_a X_L}{(k_d + k_a X_L)} \quad (17)$$

โดยกำหนดให้

$$K = \frac{k_a}{k_d} \text{ (equilibrium constant)} \quad (18)$$

จะได้สมการ

$$X_A = \frac{X_{AM} K X_L}{(1 + K X_L)} \quad (19)$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

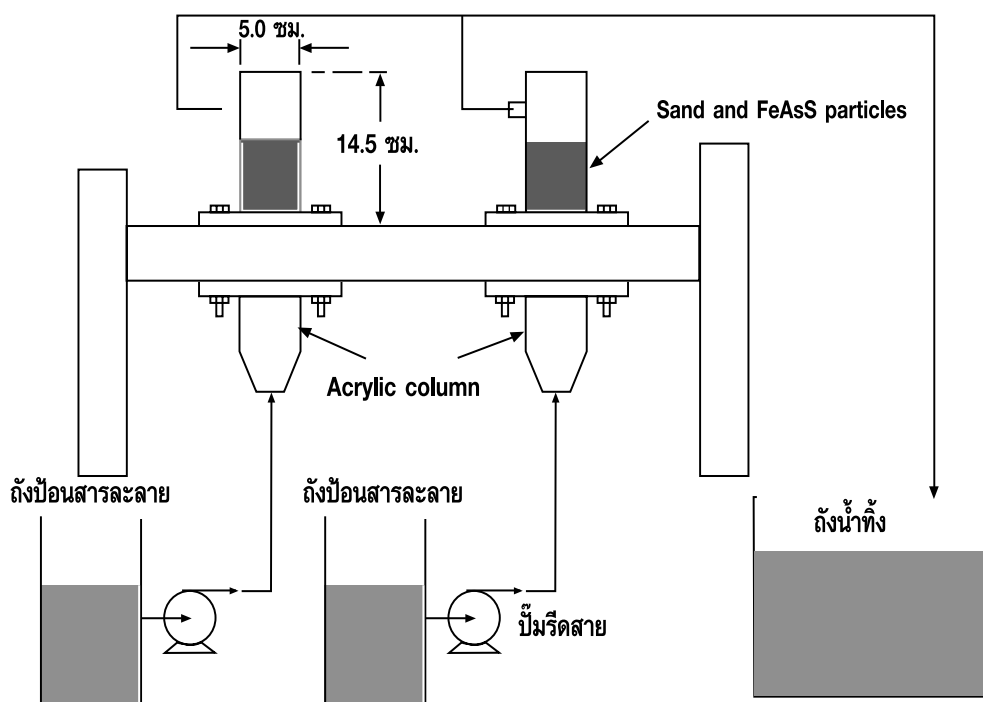
$$\frac{X_L}{X_A} = \frac{X_L}{X_{AM}} + \frac{1}{K X_{AM}} \quad (20)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\frac{X_L}{X_A}$  กับ  $X_L$  จะได้สมการเส้นตรงซึ่งมีความชันเป็น  $\frac{1}{X_{AM}}$  และจุดตัดแกน X คือ  $\frac{1}{K X_{AM}}$  [16]

### 3. การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การทดลองและสารเคมี

อุปกรณ์ประกอบด้วย คอลัมน์ทำจากอะครีลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 14.5 เซนติเมตร ถังป้อนสารละลาย (feed tank) ถังน้ำทิ้ง (waste water tank) และปั๊มรีดสาย (peristaltic pump) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) บริษัท JT Baker กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) บริษัท APS Finechem โซเดียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท Merck โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) บริษัท Carlo Erba Reagent โซเดียมเมตาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท Wako ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) บริษัท Carlo Erba Reagent ทั้งหมดเป็นเกรด AR (analytical reagent)

เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเชื้อแบคทีเรียที่คัดแยกได้จากเหมืองถ่านหินแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เชื้อแบคทีเรียนี้มีลักษณะทางสัณฐานและสรีระคล้ายคลึงกับ *T. ferrooxidans*

สารอาหารสูตร 9K ใช้เลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ประกอบด้วย โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) บริษัท Carlo Erba Reagent แอมโมเนียมซัลเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) บริษัท Carlo Erba Reagent แมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) บริษัท Carlo Erba Reagent อย่างละ 0.4 กรัม/ลิตร ปรับ pH ด้วยกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) บริษัท JT Baker ทั้งหมดเป็นเกรด AR

ตัวอย่างแร่อาร์เซนไฟไรต์สังเคราะห์จากบริษัท Geoprime Minerals & Earth Materials CO. ประเทศสหรัฐอเมริกา มีองค์ประกอบของเหล็กร้อยละ 34.29 โดยมวล สารหนูร้อยละ 37.23 โดยน้ำหนัก และซัลเฟอร์ร้อยละ 15.11 โดยน้ำหนัก (วิเคราะห์โดยกองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี) ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 300 ไมโครเมตร หรือค่าเฉลี่ยประมาณ 145 ไมโครเมตร โดยใช้ Molecular Sieve



### 3.2 วิธีการทดลอง

#### การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์

ใส่ทราย (ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 300 ไมโครเมตร หรือค่าเฉลี่ยประมาณ 145 ไมโครเมตร) 60 กรัม ลงในคอลัมน์อะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ของอุปกรณ์การทดลองที่แสดงในรูปที่ 1 จากนั้นจึงใส่อาร์เซนโอไฟไรต์ 10 กรัม (ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 300 ไมโครเมตรค่าเฉลี่ยประมาณ 145 ไมโครเมตร) และใส่ทราย 60 กรัมปิดทับ แล้วจึงล้างทรายและอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วย 2M HCl 1 ลิตร 2M HF 1 ลิตร และน้ำ DI 2 ลิตร ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเตรียมสารละลายเคลือบผิวปริมาตร 6 ลิตร ซึ่งประกอบด้วย 0.01M  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  0.1M NaCl 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และ 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  ปรับ pH ของสารเคลือบผิวเท่ากับ 1 โดยใช้ 12 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  นำสารละลายเคลือบผิวไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมง และทิ้งไว้ประมาณ 1 อาทิตย์ (ระหว่างการเคลือบผิว มีเหล็กและสารหนูละลายออกมาพร้อมกับสารเคลือบบ้าง) แล้วนำ 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  ปริมาตร 6 ลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างของสารละลายจากคอลัมน์ ประมาณ 5 มิลลิลิตรเพื่อไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กและสารหนู ด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) GBC 932AA ที่ความยาวคลื่น 248.3 ไมโครเมตรและ 193.7 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมง ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยน pH ของสารละลายเคลือบผิวเป็น 3 5 และ 7 และทำการทดลองชุดควบคุมสำหรับอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ไม่ได้เคลือบผิวเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

#### การศึกษาประสิทธิภาพของการเคลือบผิวต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี

ใส่ทราย 60 กรัม ลงในคอลัมน์ ใส่อาร์เซนโอไฟไรต์ 10 กรัม และใส่ทราย 60 กรัม ดังรูปที่ 1 ล้างทรายและอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วย 2M HCl 1 ลิตร 2M HF 1 ลิตร และน้ำ DI 2 ลิตร ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเตรียมสารละลายเคลือบผิวปริมาตร 6 ลิตร ซึ่งประกอบด้วย 0.01M  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  0.1M NaCl 0.001M  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  และ 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  ปรับ pH เท่ากับ 3 โดยใช้ conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  นำสารละลายเคลือบผิวไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กและสารหนู ทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมง และทิ้งไว้ประมาณ 1 อาทิตย์ แล้วนำ 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  ปรับ pH เท่ากับ 2 โดยใช้ 12M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ปริมาตร 6 ลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กและสารหนู ทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลาประมาณ 18 ชั่วโมง ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้นแต่เปลี่ยน pH ของ 0.145M  $\text{H}_2\text{O}_2$  เป็น 4 และ 5 ตามลำดับ และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้นโดยเปลี่ยน pH ของสารละลายเคลือบผิวเป็น 5

#### การศึกษากการดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิวด้วยไซโตเดียมซิลิเกต

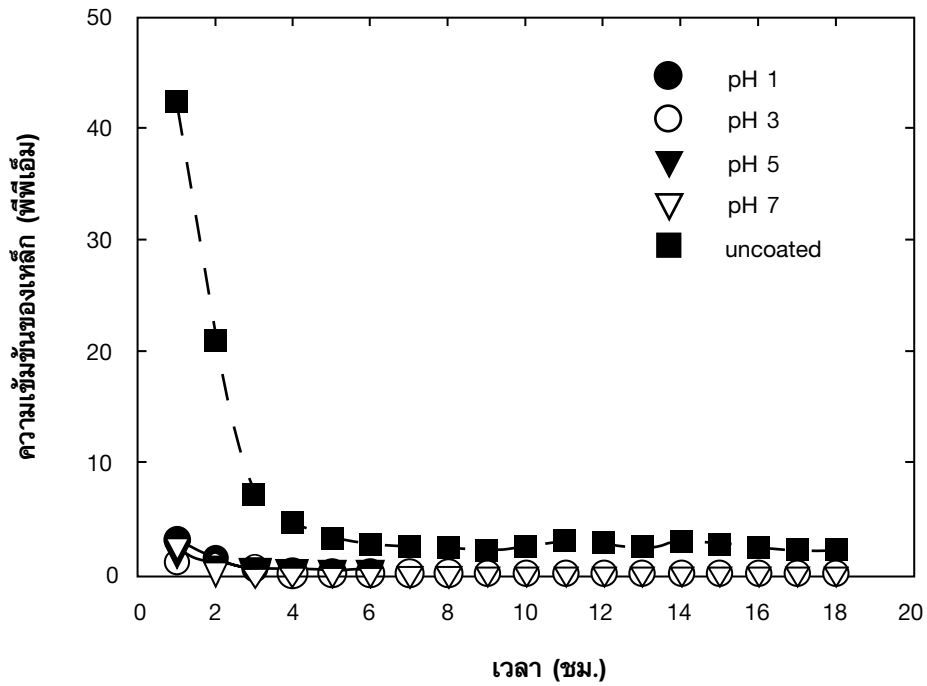
เตรียมขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร 7 ใบ เติมสารอาหาร 9K medium ปริมาณ 90 มิลลิลิตร เติมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ได้จากการทำ starter ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และใส่อาร์เซนโอไฟไรต์ 0.4 กรัม ลงในแต่ละขวดนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 20 40 60 80 100

และ 120 นาที แล้วนำตัวอย่างวิเคราะห์หาความเข้มข้นของเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ในสารละลาย (โดยวิธี directing counting หรือการนับจำนวนเซลล์ โดยใช้ bacteria counting chamber) เพื่อหาเวลาที่เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เข้าสู่การดูดซับอย่างสมดุล การทดลองนี้ทำให้ทราบว่า การดูดซับเกิดขึ้นอย่างสมดุลต้องใช้เวลาานเท่าไร ซึ่งทราบได้ว่าใช้เวลาประมาณ 60 นาที จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมโดยเปลี่ยนตัวแปรของความเข้มข้นเริ่มต้นของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ได้จากการทำ starter ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาณร้อยละ 2 4 6 8 10 12 และ 14 ลงในแต่ละขวด นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างแต่ละขวดเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที นำตัวอย่างไปนับจำนวนเซลล์ และนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของแบคทีเรียที่ดูดซับบนอาร์เซนโอไฟไรต์,  $X_A$  กับความเข้มข้นของแบคทีเรีย,  $X_L$  ในสารละลาย และทำการทดลองอีกครั้งเหมือนข้างต้น แต่เปลี่ยนเป็นอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วย  $0.001M Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$  ที่ pH 3

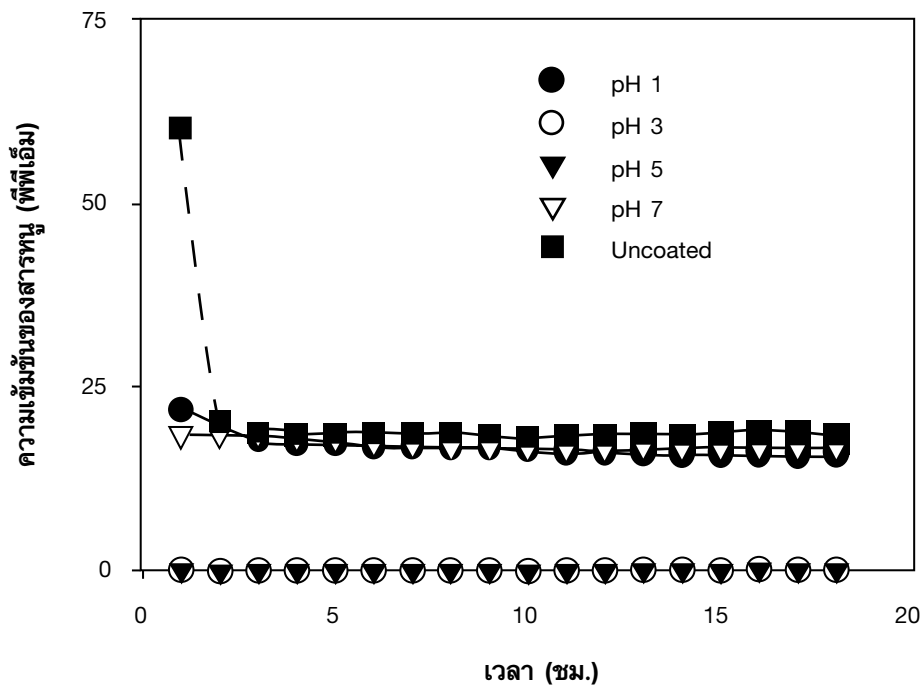
#### 4. ผลการทดลองและวิจารณ์

##### การศึกษาการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์เพื่อหา pH ที่เหมาะสม

การออกซิเดชันทางเคมีและทางชีวเคมีเป็นสาเหตุที่ทำให้สารหนูแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม จึงทำการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและทางชีวเคมีโดยการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ที่ pH 1 3 5 และ 7 โดยในการเคลือบบนผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์จะเป็นการยับยั้งการออกซิเดชันทางเคมีและทางชีวเคมีของอาร์เซนโอไฟไรต์ เนื่องจากการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์จะเป็นการป้องกันผิวของอาร์เซนโอไฟไรต์ไม่ให้สัมผัสกับน้ำ ออกซิเจน และจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อาร์เซนโอไฟไรต์ถูกออกซิเดชันทางเคมีและทางชีวเคมี เมื่อนำอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ผ่านการเคลือบผิวแล้วไปทดสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) pH ประมาณ 5 ซึ่งจะเหมือนกับการออกซิเดชันด้วยออกซิเจนและน้ำ [11], [12] จากรูปที่ 2 ถึงรูปที่ 3 พบว่าปริมาณเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อทำการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 3 และ 5 โดยเปรียบเทียบกับปริมาณเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายในการทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีของอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 1 3 5 7 และอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว และปริมาณเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายของผิวเคลือบที่ pH 3 และ 5 นั้นมีปริมาณน้อยกว่าในอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ไม่ได้เคลือบผิวมาก แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 3 และ 5 เป็น pH ที่เหมาะสมในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยอากาศและน้ำ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเกล็ดกับเวลา ขณะทดสอบอาร์เซนไฟโรต์เมื่อเคลือบผิวที่ pH 1 3 5 และ 7 และไม่ได้เคลือบผิวด้วย 0.145M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

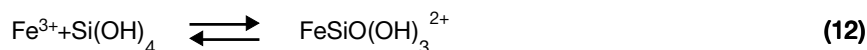


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูกับเวลา ขณะทดสอบอาร์เซนไฟโรต์เมื่อเคลือบผิวที่ pH 1 3 5 และ 7 และไม่ได้เคลือบผิวด้วย 0.145M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

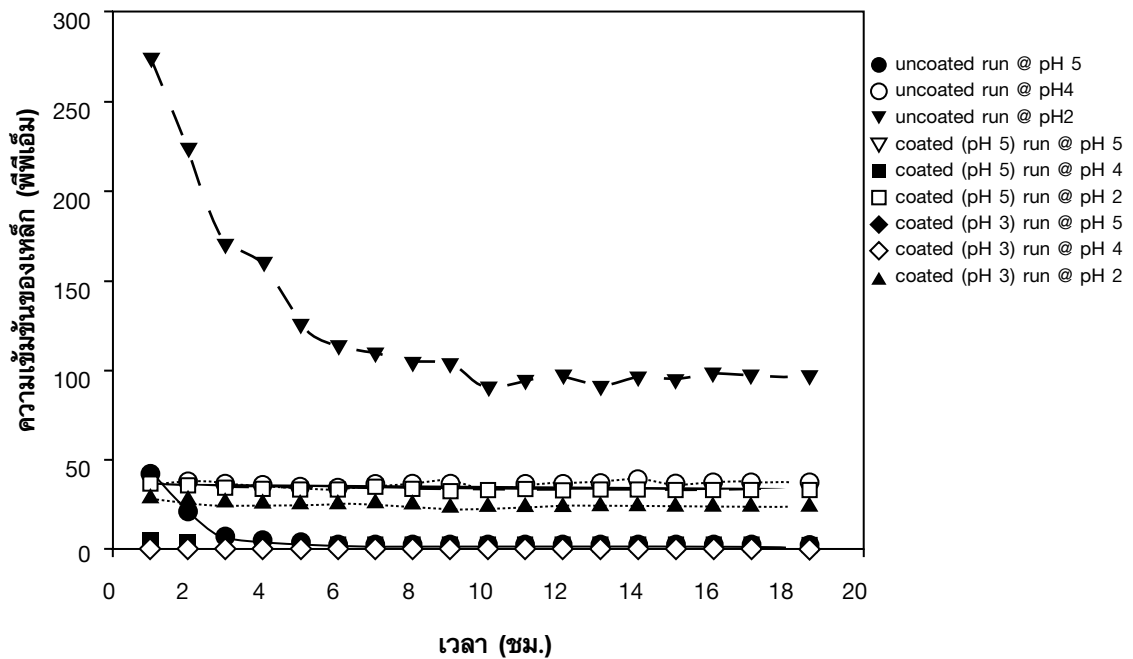
### การศึกษาประสิทธิภาพของการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี

เมื่อนำอาร์เซโนไฟโรต์ที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 และ 5 มาทดสอบประสิทธิภาพของผิวเคลือบในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและการทนกรด โดยให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) 0.145 โมลต่อลิตร ที่ pH 2.4 และ 5 ไหลผ่านคอลัมน์ และเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ หาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเหล็กและสารหนู จากรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและการทนกรด ดีกว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 5 เนื่องจากความเข้มข้นของเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายจากการทดสอบผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 การยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ pH 2.4 และ 5 มีปริมาณน้อยกว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 5 และจากการเปรียบเทียบปริมาณเหล็กและสารหนูในสารละลายของอาร์เซโนไฟโรต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวและอาร์เซโนไฟโรต์ที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 3 และ 5 ที่ทำการทดสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี พบว่าผิวเคลือบที่ pH 3 และ 5 สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีได้เนื่องจากปริมาณเหล็กและสารหนูในสารละลายมีปริมาณน้อยกว่าอาร์เซโนไฟโรต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวมาก

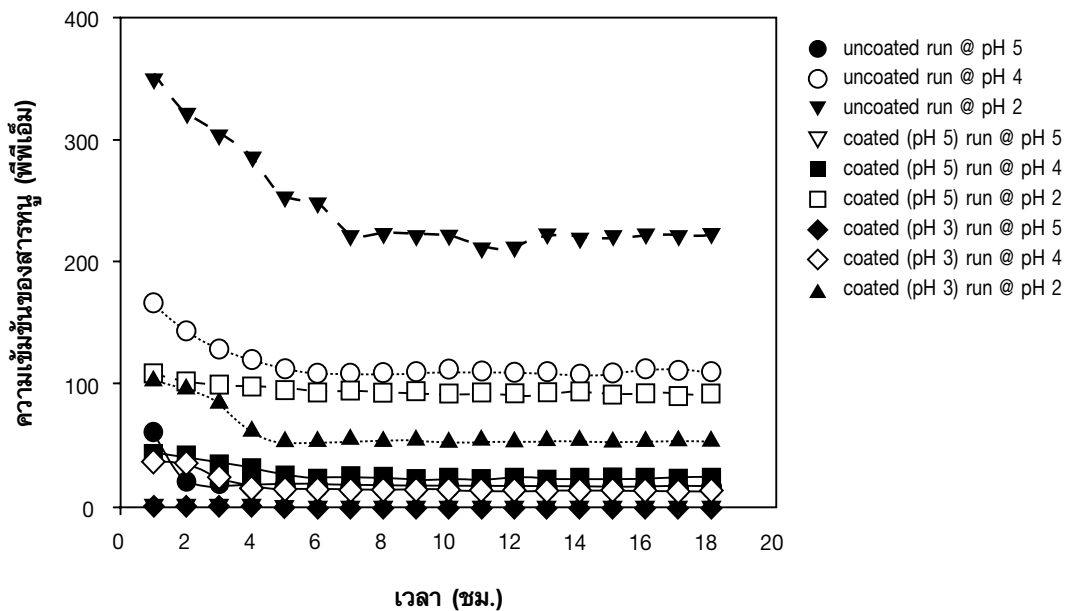
จากการศึกษาของ Olson และคณะ [15] พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนของโซเดียมซิลิเกต,  $FeOSi(OH)_3^{2+}$  สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วง pH ระหว่าง 1.5-3.0 ดังสมการที่ (12) - (14)



แสดงว่าการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 น่าจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโซเดียมซิลิเกต,  $FeOSi(OH)_3^{2+}$  เคลือบบนผิวอาร์เซโนไฟโรต์ ซึ่งจากการศึกษาของ Evangelou ในการเคลือบผิวไฟโรต์ด้วยโซเดียม-ซิลิเกต พบว่าผิวเคลือบโซเดียมซิลิเกตสามารถทนความเป็นกรดที่ pH 2.5-4.0 [15] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้น และจากการศึกษาของ Zhang และคณะ [6] พบว่าที่ pH 4-6 สามารถเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เคลือบบนผิวไฟโรต์ แสดงว่าการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 5 น่าจะเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์เคลือบบนผิวอาร์เซโนไฟโรต์ และการละลายเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น [12] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองข้างต้นที่นำอาร์เซโนไฟโรต์ที่ทำการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 5 ไปทดสอบการออกซิเดชันและความทนกรดพบว่า เมื่อความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นปริมาณเหล็กและสารหนูในสารละลายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นการเคลือบผิวอาร์เซโนไฟโรต์ด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 จึงมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีและการทนกรดดีกว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 5



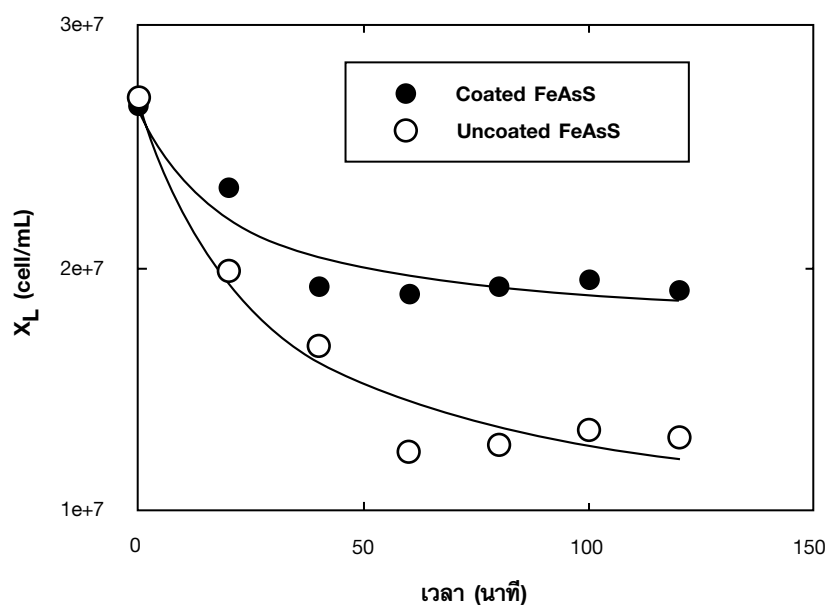
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเหล็กกับเวลา ขณะทดสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีของอาร์เซนไฟไรต์ด้วย 0.145M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ pH 2 4 และ 5 ของอาร์เซนไฟไรต์ที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 3 และ 5 และอาร์เซนไฟไรต์ ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสารหนูกับเวลา ขณะทดสอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีของอาร์เซนไฟไรต์ด้วย 0.145M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ pH 2 4 และ 5 ของอาร์เซนไฟไรต์ที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 3 และ 5 และอาร์เซนไฟไรต์ ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว

### การศึกษาการดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์และที่ไม่ได้เคลือบผิว

เมื่อศึกษาการดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* บนอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 3 และไม่ได้เคลือบผิวที่ความเข้มข้นของเซลล์เริ่มต้นร้อยละ 10 และอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิวร้อยละ 0.4 น้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 120 นาที พบว่าความเข้มข้นของเชื้อ *T. ferrooxidans* ในสารละลายลดลงตามเวลา จนถึงเวลาประมาณ 60 นาที ความเข้มข้นแบคทีเรียในสารละลายเริ่มเข้าสู่สถานะคงตัว ดังแสดงในรูปที่ 6 จากกราฟจะเห็นได้ว่าการดูดซับของเชื้อ *T. ferrooxidans* ต่อหน่วยน้ำหนักบนผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 3 มีปริมาณน้อยกว่าอาร์เซนโอไฟไรต์ที่ไม่ได้เคลือบผิว



รูปที่ 6 การดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* บนพื้นผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิว

เพื่อให้ทราบว่า *T. ferrooxidans* ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักบนผิวของอาร์เซนโอไฟไรต์ได้สูงสุดเท่าไร จึงได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ดูดซับบนผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซัลไฟด์ที่ pH 3 และไม่ได้เคลือบผิวอาร์เซนโอไฟไรต์ ( $X_A$ ) กับความเข้มข้นของเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่อิสระแขวนลอยอยู่ในสารละลาย ( $X_L$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์อธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ ดังนี้

$$X_A = \frac{X_{AM} KX_L}{(1 + KX_L)} \quad (13)$$

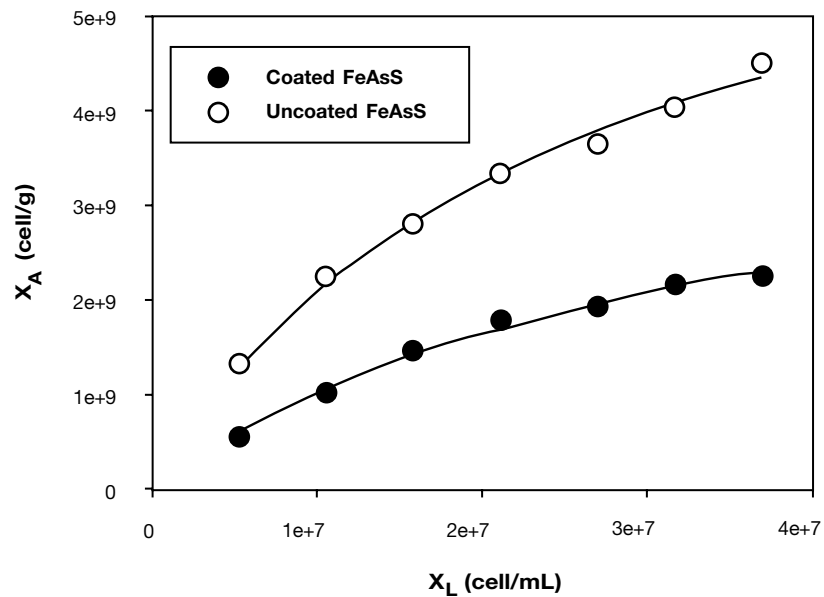
โดยที่

$X_{AM}$  = ค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด (เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไฟไรต์)

$K$  = ค่าสมมูลการดูดซับ (มิลลิลิตรต่อเซลล์)

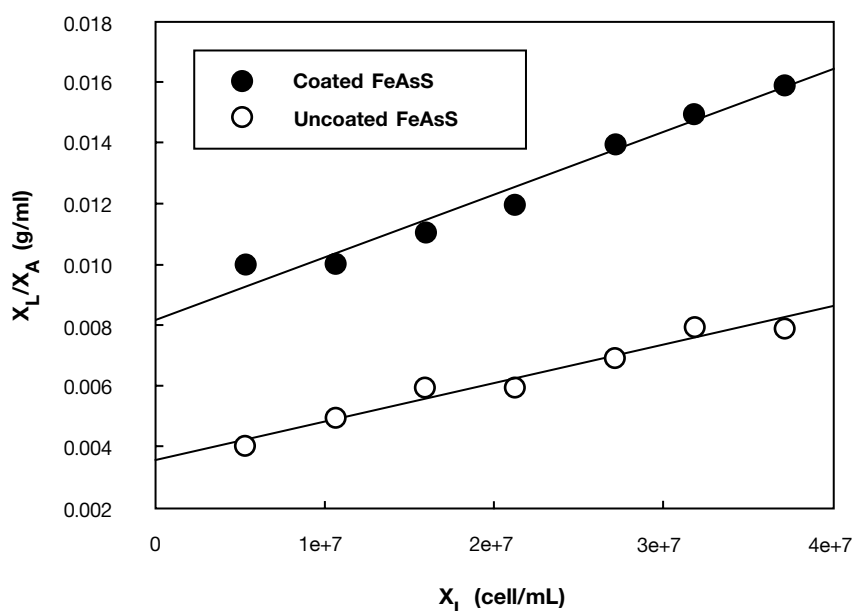
เมื่อจัดรูปสมการที่ 13 ใหม่จะได้

$$\frac{X_L}{X_A} = \frac{X_L}{X_{AM}} + \frac{1}{KX_{AM}} \quad (14)$$



รูปที่ 7 equilibrium adsorption isotherm ของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิว

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $X_L/X_A$  กับ  $X_L$  จะได้สมการเส้นตรงซึ่งมีความชันเป็น  $1/X_{AM}$  และ จุดตัดแกน X คือ  $1/KX_{AM}$  [16] ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อคำนวณแล้วพบว่าอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตที่ pH 3 มีค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด,  $X_{AM} = 4.710 \times 10^9$  เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไฟไรต์ และค่าสมมูลการดูดซับ,  $K = 2.654 \times 10^{-8}$  มิลลิกรัมต่อเซลล์ ส่วนอาร์เซนไฟไรต์ที่ไม่ได้เคลือบผิวมีค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุด,  $X_{AM} = 7.231 \times 10^9$  เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไฟไรต์ และค่าสมมูลการดูดซับ,  $K = 4.609 \times 10^{-8}$  มิลลิกรัมต่อเซลล์ ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวมีส่วนลดปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของเชื้อ *T. ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนไฟไรต์ได้ระดับหนึ่ง ผลการทดลองนี้ก็เป็นการยืนยันว่า การเคลือบอาร์เซนไฟไรต์มีส่วนช่วยยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีอันเนื่องมาจากปัจจัยการดูดซับของเชื้อ *T. ferrooxidans*



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X_L/X_A$  กับ  $X_L$  ของอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวและไม่ได้เคลือบผิว

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิจารณ์ที่ได้สามารถสรุปได้ว่า

1. จากการศึกษาการเคลือบผิวอาร์เซนไฟไรต์เพื่อหา pH ที่เหมาะสม พบว่าการเคลือบผิวอาร์เซนไฟไรต์ด้วยโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ pH 3 และ 5 เป็นสภาวะที่เหมาะสมเนื่องจากปริมาณเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อทดสอบด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แสดงว่าอาร์เซนไฟไรต์ที่เคลือบผิวที่ pH 3 และ 5 สามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีได้



2. จากการศึกษาประสิทธิภาพของการเคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกตต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี เมื่อนำอาร์เซนไพไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ pH 3 และ 5 มาทดสอบประสิทธิภาพของผิวเคลือบที่มีต่อการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี และความทนกรดโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ที่ pH 2 4 และ 5 พบว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 3 มีประสิทธิภาพดีกว่าผิวเคลือบที่ทำการเคลือบผิวที่ pH 5 เนื่องจากปริมาณเหล็กและสารหนูที่ตรวจพบในสารละลายมีปริมาณน้อยที่สุด แสดงว่าอาร์เซนไพไรต์ที่เคลือบผิวที่ pH 3 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีได้ดีกว่าอาร์เซนไพไรต์ที่เคลือบผิวที่ pH 5

3. จากการศึกษาการดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนไพไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ pH 3 และไม่ได้เคลือบผิว พบว่าข้อมูลสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์ โดยอาร์เซนไพไรต์ที่เคลือบผิวด้วยโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) ที่ pH 3 มีค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุดเท่ากับ  $4.710 \times 10^9$  เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไพไรต์ และค่าสมมูลการดูดซับเท่ากับ  $2.654 \times 10^{-8}$  มิลลิลิตรต่อเซลล์ และอาร์เซนไพไรต์ที่ไม่ได้เคลือบผิวมีค่าการดูดซับของเชื้อแบคทีเรียสูงสุดเท่ากับ  $7.231 \times 10^9$  เซลล์ต่อกรัมอาร์เซนไพไรต์ และค่าสมมูลการดูดซับเท่ากับ  $4.609 \times 10^{-8}$  มิลลิลิตรต่อเซลล์ แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวสามารถลดปริมาณการดูดซับของเชื้อแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* บนผิวอาร์เซนไพไรต์ได้ นั่นคือสามารถลดการออกซิเดชันทางชีวเคมีโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans*

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม และบริษัทเอ็นวีซีเอส จำกัด, 2541, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและวิเคราะห์เพื่อจัดทำแผนปฏิบัติการฟื้นฟูสภาพการปนเปื้อนของสารหนูที่อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช, หน้า 1-45.
2. อนงค์ ไพบูลย์ประภากรณ์, 2540, การศึกษาติดตามปัญหาและการแก้ไขการแพร่กระจายของสารหนู อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช, กองสิ่งแวดล้อมทรัพยากรธรณี กรมทรัพยากรธรณี, หน้า 1-13.
3. Silverman, P. M. and Ehrlich, H. L., 1964, "Microbial Formation and Degradation of Minerals," *Advance of Applied Microbial*, Vol. 6, pp. 153-206.
4. Evangelou, V. P., 1995, "Potential Microencapsulation of Pyrite by Artificial Inducement of Ferric Phosphate Coatings," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 24, pp. 535-542.
5. Zhang, Y. L. and Evangelou, V. P., 1996, "Influence of Iron Oxide Forming Conditions on Pyrite Oxidation," *Soil Science*, Vol. 161, pp. 852-864.
6. Zhang, Y. L. and Evangelou, V. P., 1998, "Formation of Ferric Hydroxide-Silica Coating on Pyrite and its Oxidation Behavior," *Soil Science*, Vol. 163, pp. 53-62.

7. Vandiviere, M. M. and Evangelou, V. P., 1998, "Comparative Testing between Conventional and Microencapsulation Approaches in Controlling Pyrite Oxidation," *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 64, pp. 161-176.

8. Barrett, J., Hughes, M. N., Karavaiko, G. I., and Spencer, P. A., 1993, *Metal Extraction by Bacterial Oxidation of Minerals*, Ellis Horwood Limited, England, pp. 103-126.

9. Torma, A. E., 1988, "Leaching of Metals," *Biotechnology*, Vol. 6b, Edited by Rehen, H.J. and Reed, G., Wehiem, VHC Publisher, pp. 367-399.

10. Fernandez, M. G., Mustin, C., Donato, P., Barres, O., Marion, P., and Berthelin, J., 1995, "Occurrences at Minerals-Bacteria Interface During Oxidation of Arsenopyrite by *T. ferrooxidans*," *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 46, pp. 13-21.

11. O'Shay, T., Hossner, L. R., and Dixco, J. B., 1990, "A Modified Hydrogen Peroxide Oxidation for Determination Potential Acidity in Pyritic Overburden," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 19, pp. 778-782.

12. Jennings, S. R., Dollhopf, D. J., and Inskeep, 2000, "Acid Production from Sulfide Minerals using Hydrogen Peroxide Weathering," *Applied Geochemistry*, Vol. 15, pp. 235-243.

13. Weber, W. J. and Stumm, W., 1964, "Formation of a Silicato-Iron(III) Complex in Dilute Aqueous Solution," *Journal of Nuclear Chemistry*, Vol. 27, pp. 237-239.

14. Olson, L. L. and Omelia, C. R., 1977, "The Interactions of Fe(III) with  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ," *Journal of Nuclear Chemistry*, Vol. 35, pp. 1977-1985.

15. Evangelou, V. P., Feb. 27, 1996, *US. Patent No. 5494702 : Oxidation Proof Silicate Surface Coating on Iron Sulfide*, pp. 1-8.

16. ยุคลธร ฉัตรสุวรรณ, 2539, "การกำจัดกำมะถันในถ่านหินลิกไนต์ด้วยจุลินทรีย์," *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 28-84.