บทความวิชาการ

การแต่งแร่ด้วยจุลชีวัน

ศิวโรฒม์ ศิริลักษณ์*
สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0–5392–1444 ต่อ 2230 อีเมล: siwarote@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.007
รับเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2559 ตอบรับเมื่อ 25 พฤษภาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 10 พฤศจิกายน 2560
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

จุลชีวันถูกนำมาใช้ในงานแต่งแร่ คุณสมบัติที่เป็นประโยชน์คือ มีชีวิต ไม่ใช้ไฟฟ้า ประหยัด เพาะพันธุ์ได้ สามารถดำรงชีวิตในสภาพเป็นกรดสูง สภาพเปียกชื้น ทนต่อสภาวะพิษของกรดกำมะถัน ในบทความนี้นำเสนอการใช้จุลชีวันแต่งแร่ยูเรเนียมในอินเดีย แพลทินัมและพาลาเดียมในบราซิล ทองคำในออสเตรเลีย ทองแดงในอเมริกา สังกะสีและตะกั่วในปากีสถาน และ โลหะมีค่าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในขนาดห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาของสารพิษจากเหมืองแร่ การแต่งแร่ด้วยจุลชีวันมีข้อดีคือ ราคาถูก การจัดการน้อย ค่าดำเนินการต่ำ การบำรุงรักษาต่ำ อนุรักษ์ทรัพยากรแร่จากบ่อทิ้งแร่ ทำงานได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง สามารถประยุกต์เข้ากับการจัดการสิ่งแวดล้อมในเหมืองได้ ส่วนข้อเสียคือ คืนทุนช้า กระบวนการใช้เวลานาน ไม่สามารถหยุดกระบวนการได้ทันที มีความเสี่ยงในการรั่วไหลลงชั้นน้ำใต้ดินแหล่งน้ำสาธารณะ มีบางชนิดที่เป็นอันตรายต่อคนและสัตว์

คำสำคัญ: การแต่งแร่, แต่งแร่ด้วยจุลชีวัน, รีไซเคิลโลหะ

การอ้างอิงบทความ: ศิวโรฒม์ ศิริลักษณ์, "การแต่งแร่ด้วยจุลชีวัน," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 883–892, ต.ค.–ธ.ค. 2560

Academic Article

Bio Mineral Processing

Siwarote Siriluck*
Mining Engineering Program, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Muang, Chiang Mai, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0–5392–1444 Ext. 2230, E–mail: siwarote@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2017.11.007
Received 22 November 2016; Accepted 25 May 2017; Published online: 10 November 2017
© 2017 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Microbials have been used in biomineral processing field; their useful properties include non-electricity, economy, ability to multiply and to survive the extremely acid environment. Microorganisms can also survive challenging conditions under wet and poisonous sulphur gas. The study was presented the practical utility of biomineral processing such as uranium mining in India, platinum and palladium biomineralisation in Brazil, gold bioleaching in Australia, copper heap leaching in the U.S.A., lead and zinc processing in Pakistan and precious metals extraction from electronic scraps in laboratory operations. This is to propose guidelines for solutions of mine environmental issues. The benefits of operational bioprocesses are reasonable price, low operation and maintenance costs, rehabilitation of minerals from tailings, capacity with a 24-hour day and the application of the environmental management in mining. The disadvantages of adoptions in continuous bio-processing are slowly to pay back on the investment, to take long lasting periods of time and to hardly shut down immediately on the process. Finally, the contaminants may leak out and get into the groundwater resources, some kinds may harm the living creatures.

Keywords: Mineral Processing, Biomineral Processing, Mineral Dressing

Please cite this article as: S. Siriluck, "Bio mineral processing," *The Journal of KMUTNB.*, vol. 27, no. 4, pp. 883–892, Oct.–Dec. 2017 (in Thai).

1. บทนำ

จุลชีวันได้ถูกนำมาเป็นทางเลือกหนึ่งในงานแต่งแร่ นอกจากวิธีที่นิยมคือการแต่งแร่ด้วยสารเคมี การบำบัดสิ่งแวดล้อมของกากแร่และการเก็บแร่มีค่าจากหางแร่ สามารถประยุกต์ใช้ด้วยวิธีนี้ด้วยเช่นกัน [1]

ในประเทศแอฟริกาใต้ รัสเซีย บราซิล อินเดีย และออสเตรเลีย ได้มีการพัฒนาวิธีการใช้จุลชีวันในการแต่งแร่ [2]–[4] คือ แบคทีเรีย รา สาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อเก็บหัวแร่กัมมันตภาพรังสี แร่โลหะมีค่า แร่โลหะนำไฟฟ้า การเก็บหัวแร่ในกระบวนการทุติยภูมิจากบ่อหางแร่ [5] การกำจัดสารเคมีในการแต่งแร่ทางเคมี การดึงโมเลกุลของซัลเฟอร์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน จากอากาศ เพื่อบำบัดน้ำยาเคมีก่อนทิ้งลงแหล่งน้ำธรรมชาติ [6] คุณสมบัติของจุลชีวันบางอย่างที่ถูกค้นพบมีความพิเศษมาก เช่น การดำรงชีวิตอยู่ในสภาพความเป็นกรดเข้มข้น [7] การดำรงชีวิตในสภาพความดันสูง [8] การดำรงชีวิตในสภาพไร้แสงแดด [9] การดำรงชีวิตภายใต้สภาพไร้ออกซิเจน [10] การดำรงชีวิตในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดหรือมีความชื้นสูง [11] การขยายจำนวนเซลล์แบบทวีคูณ [12] การอยู่ในสภาพการทำงานในอุณหภูมิที่มากกว่า 40°C การทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มีการหยุดพัก การทำงานในสภาพที่ไม่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า [13]

ในอดีตประเทศไทยมีโครงการเหมืองแร่ตะกั่ว-สังกะสี ซัลไฟด์ ที่เหมืองเคมโก้ไมนิ่งที่ลำห้วยคลิตี้ กาญจนบุรี ใช้เวลา 18 ปีในกระบวนการศาล แต่ทว่าตะกั่วซัลไฟด์ได้ปนเปื้อนไปตลอดเวลาในช่วง18ปีนั้นซึ่งค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการบำบัดด้านสิ่งแวดล้อมในส่วนของชาวบ้าน รัฐ หรือบริษัท ในช่วงดังกล่าวก็ไม่มีใครอยากจะลงทุนในส่วนนั้น สารพิษจึงแพร่กระจายอยู่อย่างต่อเนื่อง ที่ลำห้วยคลิตี้ มนุษย์ สัตว์ สิ่งแวดล้อมแถบนั้นจึงเป็นผู้รับผลกระทบอย่างแท้จริงตลอด 18 ปี [14]

เช่นเดียวกันกับปัญหาการพิจารณาไม่ต่ออายุสัมปทานเหมืองทองคำอัครา เนื่องจากปัญหาของชาวบ้านร้องเรียนเรื่องของสารหนู (อาร์เซนิก, As) ที่พบในพื้นที่ แต่ทางบริษัทเจ้าของสัมปทานยังคงดำเนินการนำเรื่องราวเข้าสู่กระบวนการศาลเพื่อหาข้อยุติ เวลาในการดำเนินการชั้นศาลที่คาดว่าจะใช้เวลายาวนาน ก็จะมีความเสี่ยงที่จะทำให้สารพิษปนเปื้อนสู่ธรรมชาติมากขึ้น เพราะขาดผู้บำบัดกักเก็บดำเนินการกับสารพิษดังกล่าว [15]

ผู้เขียนต้องการนำเสนอในอีกแนวทางหนึ่งเพื่อใช้เวลาที่เสียไปให้มีประโยชน์ โดยการใช้งานจุลชีวันเพื่อการบำบัด และการแต่งแร่ในประเทศไทย นับเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่ใช้แก้ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีเงื่อนไขทางด้านของเวลาอีกทางหนึ่งที่น่าสนใจ

2. หลักการแต่งแร่ด้วยจุลชีวันและสปีชีส์ของแบคทีเรียที่สำคัญในงานแต่งแร่

จุลชีวันที่ใช้ในการแต่งแร่มีกระบวนการที่สำคัญดังต่อไปนี้ [16]

1. การเปลี่ยนสภาพทางเคมีของสิ่งแวดล้อมและผิวแร่เดิมให้พร้อมในสภาพที่เหมาะสมต่อจุลชีวัน

2. เลี้ยงจุลชีวันเพื่อสร้างสภาพเคมีพื้นผิวบนแร่ใหม่

3. จุลชีวันแปรหัวแร่จากสภาพของแข็งจะถูกทำให้อยู่ในรูปสารละลาย

4. นำสารละลายเหล่านั้นมาทำการปรับไอออนให้เป็นของแข็งอีกครั้ง

จุลชีวันที่สำคัญที่ใช้ในการตรึงซัลเฟอร์ได้ที่ถูกกล่าวถึงคือ *Acidithiobacillus* ซึ่งอยู่ใน **Kingdom**: *Eubacteria* **Phylum**: *Proteobacteria* **Class**: *Acidithiobacillia* **Order**: *Acidithiobacillales* **Family**: *Acidithiobacillaceae* **Genus**: *Acidithio* [17] ซึ่งมีสปีชีส์ที่รู้จักในปัจจุบันคือ

- *Acidithiobacillus albertensis* ใช้ในกระบวนการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ ให้เป็นกรดซัลฟิวริกร่วมกับน้ำในกระบวนการของโลหะซัลไฟด์ เช่น แร่สฟาเลอไรต์ (Spharlerite; ZnS) [18]
- *Acidithiobacillus caldus* ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ ให้เป็นกรดซัลฟิวริกเหมือน *Acidithiobacillus albertensis*, [19]
- *Acidithiobacillus caldus* สามารถใช้เฟอรัสอิออนจับซัลเฟอร์ไอออนลบได้ตามธรรมชาติเป็นอิออนลบของ

ไทโอซัลเฟต หรืออิออนลบของซัลฟิวริก [20]

- *Acidithiobacillus ferriphilus* สามารถใช้เฟอรัสอิออนจับซัลเฟอร์ไอออนลบได้ตามธรรมชาติ เป็นอิออนลบของไทโอซัลเฟต หรืออิออนลบของซัลฟิวริก ในสภาวะแอนนารอบิก [21]
- *Acidithiobacillus ferrivorans* ใช้เหมือนกับ *Acidithiobacillus ferridurans* [20]
- *Acidithiobacillus ferrooxidas* ใช้ในกระบวนการออกซิเดชันโลหะกลุ่มเหล็ก [22]
- *Acidithiobacillus thiooxidans* ใช้ในกระบวนการออกซิไดเดชันของซัลเฟอร์ให้เป็นกรดซัลฟิวริกร่วมกับน้ำ [23]

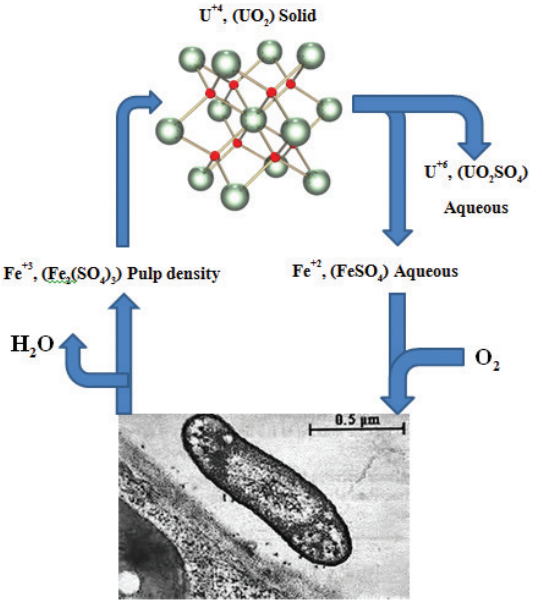
3. กรณีศึกษาในงานแต่งแร่ด้วยจุลชีวัน

3.1 การแต่งหัวแร่ยูเรเนียมในอินเดีย

แร่ยูเรเนียมเป็นแร่พลังงานที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้านิวเคลียร์ บริษัทเหมืองแร่ จาดูกูด้า ยูเรเนียมของอินเดีย ได้ทดลองใช้แร่ยูเรเนียมเกรดต่ำในรูปยูเรนัสออกไซด์ (Uraniumdioxide, UO_2) ซึ่งเป็นแร่ที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ มาผสมกับเฟอริกซัลเฟต (Iron(III) Sulfate; $Fe_2(SO_4)_3$) ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย โดยผสมในสัดส่วนของ 10% Pulp Density ในสภาวะเป็นกรด pH 2 ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเคมีนี้จะได้ยูรานิลซัลเฟต (Uranyl Sulfate; UO_2SO_4) ซึ่งเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ที่ 25°C ในปริมาณ 275 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และเฟอรัสซัลเฟต (Iron(II) Sulfate; $FeSO_4$) ดังอธิบายได้ดังสมการที่ (1)

$$UO_2 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow UO_2SO_4 + 2FeSO_4 \qquad (1)$$

จากนั้นเฟอรัสซัลเฟตจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นเฟอริกซัลเฟต (Iron(III) Sulfate; $Fe_2(SO_4)_3$) อีกครั้ง ซึ่งแบคทีเรียจะนำเอาเฟอรัสซัลเฟตพร้อมทั้งดึงออกซิเจนในอากาศและกรดซัลฟิวริก มาใช้ในกระบวนการสารตั้งต้น เมื่อเวลาผ่านไปจะได้ผลิตภัณฑ์เฟอริกซัลเฟต และน้ำ ดังสมการที่ (2)



รูปที่ 1 แผนผังกระบวนการทำงานของแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* ในการแต่งหัวแร่ยูเรเนียม [24], [25]

$$4FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (2)$$

จากนั้นเฟอริกซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับยูเรนัสออกไซด์เพื่อเป็นสารตั้งต้นในสมการที่ (1) ต่อไป วนไปมาจนยูเรนัสออกไซด์หมดจากระบบ จึงหมดกระบวนการ

ดังนั้นในบ่อสะสมจะมีสารละลายยูรานิลซัลเฟตเกิดขึ้นซึ่งสารละลายนี้ก็จะถูกนำไปเติมไอออนให้อยู่ในรูปของยูรานิลคลอไรด์ (Uranyl Chloride; UO_2Cl_2) ยูรานิลไนเตรท Uranyl Nitrate; ($UO_2(NO_3)_2$) หรือยูรานิลคาร์บอเนต Uranyl Carbonate; $UO_2(CO_3)$ ตามแต่การใช้งาน [22] ซึ่งอธิบายตามแผนผังกระบวนการทำงานของแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* ดังรูปที่ 1

3.2 แต่งทองคำออกจากแร่อาร์เซโนไพไรท์ในออสเตรเลีย

แร่ทองคำที่ถูกพบในธรรมชาติ บางแหล่งจะมีเพื่อนแร่เป็น สารหนู (Arsenic; As) แร่ไพไรท์ (Pyrite; FeS_2) โดยธาตุทองคำจะถูกเกาะด้วยอาร์เซโนไพไรท์

(Arsenopyrite; FeAsS) การแต่งแร่ด้วยเคมีเดิมใช้วิธีการชะด้วยไซยาไนด์ (CN^-) ซึ่งวิธีใหม่ของบริษัท BacTech (Australia) ออสเตรเลียได้ทำการใช้ *Acidthiobacillus ferrooxidans* แปรสภาพของแร่กลุ่มอาร์เซโนไพรท์ให้หลุดออกจากทองคำ กระบวนนี้แทบจะไม่ต่างจากสมการที่ (2) ด้านบนเลย เพราะใช้แบคทีเรียตัวเดียวกัน กระบวนการเริ่มต้นจากฝั่งซ้ายคือสารตั้งต้น โดยเกิดจากการใช้กรดซัลฟิวริก (Sufuric acid; H_2SO_4) ปรับ pH เท่ากับ 1.6 อุณหภูมิใช้งานที่ 40°C ที่ในบ่อแช่ จากนั้นแบคทีเรียจะดึงเอาออกซิเจนในอากาศและน้ำในบ่อแช่มาทำปฏิกิริยากับ แร่อาร์เซโนไพไรท์เชิงซ้อนที่เกาะกับทอง เมื่อเวลาผ่านไป ฝั่งขวาของสมการผลิตภัณฑ์จากกระบวนการของแบคทีเรียจะพบสารละลายของเฟอริกซัลเฟต (Iron(III) Sulfate; $Fe_2(SO_4)_3$) และอาร์เซนิกแอซิด (Arsenic Acid; H_3AsO_4) ส่วนทองจะถูกปลดออกจากสารเชิงซ้อนอยู่ในรูปเกล็ดของแข็ง [26] ดังสมการที่ (3)

$$2FeAsS[Au] + 7O_2 + 2H_2O + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 2H_3AsO_4 + Au \quad (3)$$

3.3 การเคลือบผิวแร่แพลทินัมและพาลาเดียมด้วยเยื่อเมือกของแบคทีเรียเพื่อเตรียมสู่การลอยแร่

กระบวนการในห้องปฏิบัติการที่ออสเตรเลียได้นำโลหะแพลทินัม และพาลาเดียมจากบราซิล ถูกนำมาทดลองปรับสภาพผิวแร่จากโลหะ โดยแบคทีเรียกลุ่ม γ-Proteobacteria ให้สร้างเยื่อเมือก (Biofilms) ของแบคทีเรียครอบคลุมไว้เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปลี่ยนสภาพผิวแร่ให้เป็นสภาพ Biomineralisation เพื่อประโยชน์ในการแต่งแร่ด้วยวิธีอื่นต่อไป แบคทีเรียถูกพบมากถึง 3 ชนิดคือ *Pseudomonas spp.*, *Acinetobacter spp.* และ *Stenotrophomonas spp.* [27]

3.4 แต่งทองแดงออกจากแร่คาร์ลโคไพไรท์ในรัฐยูทาห์

เหมืองแร่ทองแดงบริษัท Kennecott Copper Corporation ยูทาห์ สหรัฐอเมริกา มีการทดลองแต่งแร่ทองแดงออกจากบ่อหางแร่เกรดต่ำของแร่คาร์ลโคไพไรท์ (Chalcopyrite; $CuFeS_2$) การใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดในการแต่งแร่ คือ *Acidthiobacillus ferrooxidans* เพื่อใช้ในกระบวนการออกซิเดชันของเหล็ก ซึ่งคล้ายกับสมการที่ (2) และ (3) และ *Acidithiobacillus thiooxidans* เพื่อใช้ในกระบวนการออกซิเดชันของกำมะถัน [23] โดยสองกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้

สินแร่ทองแดงในรูปเหล็กซัลไฟด์คือ แร่คาร์ลโคไพไรท์ (Chalcopyrite, $CuFeS_2$) ได้ถูกนำมาแปรสภาพในรูปของสารละลายของคิวปริกซัลเฟต (Copper (II) Sulfate; $CuSO_4$) โดยแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์ลโคไพไรท์ และดึงออกซิเจนในอากาศและน้ำในระบบ ส่วนของสารตั้งต้นเมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ คิวปริกซัลเฟตเฟอริกเอซิด (Iron(III) Oxide-hydroxide; $Fe(OH)_3$) และกำมะถัน (ซัลเฟอร์, S) ดังสมการที่ (4)

$$4CuFeS_2 + 11O_2 + 6H_2O \rightarrow 4CuSO_4 + 4Fe(OH)_3 + 4S \quad (4)$$

ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาข้างบน คือ กำมะถันจะถูกแบคทีเรีย *Acidithiobacillus thiooxidans* เข้าทำปฏิกิริยาเคมี โดยดึงออกซิเจนในอากาศและน้ำในระบบ ในส่วนของสารตั้งต้นเมื่อเวลาผ่านไปก็จะเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก ดังสมการที่ (5) และวนไปเรื่อยๆ

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 4H_2SO_4 \quad (5)$$

จากนั้นกรดซัลฟิวริกจะถูกนำไปใช้เพื่อทำให้ระบบนี้เป็นกรด เพื่ออยู่ในสภาพที่เหมาะสมของแบคทีเรีย เพื่อหล่อเลี้ยงสภาวะให้เหมาะสมของกระบวนการเคมี ดังสมการที่ (4) อีกครั้งหนึ่งต่อไป [23]

3.5 การทดลองแต่งสังกะสี-ตะกั่วซัลไฟด์ในปากีสถาน

ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ แร่กาลีนา (Galena; PbS) สฟาเลอไรต์ (Spharlerite; Zns) และไพไรท์ (Pyrite; FeS_2) ถูกนำมาทดลอง ผลจากการวิเคราะห์พบส่วนประกอบ

ทางเคมีของแร่ป้อนเป็น 10% Zn, 15% Pb และ 7% Fe การใช้แบคทีเรียคือ *Acidthiobacillus ferrooxidans* เพื่อให้สังกะสีและตะกั่วอยู่ในรูปสารละลายในสภาวะเป็นกรดด้วยซัลฟิวริก

สินแร่สฟาเรอไรต์ได้ถูกนำมาแปรสภาพในรูปของสารละลายของซิงค์ซัลเฟต (Zinc Sulfate; $ZnSO_4$) โดยแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสฟาเลอไรต์และสารละลายเฟอริกซัลเฟตในส่วนของสารตั้งต้น เมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ซิงค์ซัลเฟตเฟอรัสซัลเฟต กำมะถัน ดังสมการที่ (6) เช่นเดียวกันกับกาลีนาจะกลายเป็นสารละลายลีดด์ซัลเฟต (Lead(II) Sulfate; $PbSO_4$) [28] ดังสมการที่ (7)

$$ZnS+Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow ZnSO_4 + 2FeSO_4 + S \qquad (6)$$

$$PbS+Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow PbSO_4 + 2FeSO_4 + S \qquad (7)$$

ในส่วนของแร่ไพไรท์จะใช้แบคทีเรียอีก *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* เพื่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของกำมะถัน โดยมีปฏิกิริยาเป็นลำดับดังนี้

ไพไรท์ถูกในรูปของสารละลายเฟอริกซัลเฟต โดยแบคทีเรีย *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับไพไรท์ และดึงออกซิเจนในอากาศและน้ำในระบบ ในส่วนของสารตั้งต้น เมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ สารละลายเฟอริกซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก ดังสมการที่ (8)

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2\ FeSO_4 + 2H_2SO_4 \qquad (8)$$

ปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (9) ต่อเนื่องจากสมการที่ (8) แบคทีเรียจะดึงออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างเฟอริกซัลเฟต (ถูกนำไปใช้ในสมการที่ (6) และ (7)) และน้ำ

$$2FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (9)$$

ปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (10) ต่อเนื่องจากสมการที่ (9) ไพไรท์ และเฟอริกซัลเฟต จะดำเนินต่อไปโดยมีแบคทีเรียเป็นผู้ทำปฏิกิริยา ซึ่งจะสร้างสารละลายเฟอริกซัลเฟต และกำมะถัน จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ของสมการที่ (6) และ (7) ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ดังสมการนี้เช่นกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ด้วยกันในระบบ

$$FeS_2 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 3FeSO_4 + 2S \qquad (10)$$

ปฏิกิริยาเคมีตามสมการที่ (11) ต่อเนื่องจากสมการที่ (10) กระบวนการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ที่ถูกทำโดยแบคทีเรีย *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* คือ ออกซิเจนจะถูกดึงจากอากาศมาเติมให้กำมะถัน โดยมีน้ำในระบบมาทำให้เกิดกรดกำมะถัน เป็นผลิตภัณฑ์ในสมการนี้

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 \qquad (11)$$

ผลจากสมการเคมี (8)–(11) สามารถรวมปฏิกิริยาใหม่ดังแสดงในสมการที่ (12) คือ แบคทีเรีย *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับไพไรท์ และดึงออกซิเจนในอากาศ และน้ำในระบบ เพื่อสร้างสารละลายเฟอริกซัลเฟต และกรดซัลฟิวริก เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการเก็บหัวแร่ สังกะสี และตะกั่วนั่นเอง [29]

$$4FeS_2 + 15O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2SO_4 \qquad (12)$$

3.6 การแต่งทองคำและทองแดง ออกจากโทรศัพท์มือถือ PCB บอร์ดและเมนบอร์ดคอมพิวเตอร์ ด้วยเชื้อราในเม็กซิโก

ปัญหาการรีไซเคิลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งคือการเก็บรวบรวมเพื่อให้ได้ปริมาณที่คุ้มค่าต่อการจัดการเชิงอุตสาหกรรม ดังนั้นความพยายามในการแต่งแร่โลหะมีค่าออกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณน้อยเพื่อความคุ้มทุน จึงมีการใช้จุลชีวันประเภท เชื้อรา *Aspergillus niger* โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้เชื้อราในกลุ่มนี้ 2 ชนิดคือ *Aspergillus niger MXPE6* (*A. MXPE6*)

และ *Aspergillus niger MX7* (*A. MX7*) ผลการทดลองพบว่าโลหะทองคำถูกชะได้ถึง 87% ใน PCB บอร์ดและ 28% ในส่วนของขาทองคำในเมนบอร์ด

โลหะทองแดงถูกชะได้ 24% ใน PCB บอร์ด และ 5% ในขาทองคำในเมนบอร์ด [30]

4. ข้อดี ข้อด้อยและข้อควรระวังในการใช้งานเกี่ยวกับการแต่งแร่ด้วยจุลชีวัน

ข้อดีของกระบวนการในการแต่งแร่ด้วยจุลชีวันเป็นกระบวนการที่ประหยัดในส่วนของค่าดำเนินการการควบคุม การซ่อมบำรุง [31] และยังเป็นกระบวนการที่สามารถตรึงเอาแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศมาใช้หรือมาเก็บรักษาไว้ได้ ให้เป็นของแข็งหรือเป็นในรูปกรดซัลฟิวริก สามารถนำมาประยุกต์ในการเก็บหัวแร่จากบ่อทิ้งแร่แล้วเป็นการอนุรักษ์แร่อีกทางเลือกหนึ่ง [29]

ข้อด้อยคือเป็นกระบวนการที่ช้ากว่ากระบวนการสกัดด้วยสารเคมี หรือไพโรไลซิส [32] แบคทีเรียที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่ใช้ในสภาพเป็นกรดซัลฟิวริก การระวังการปนเปื้อนสู่น้ำใต้ดินจากกรด การจะหยุดกระบวนการสนิททันทีไม่สามารถทำได้ต้องอย่างทันทีทันใด ต้องหยุดกระบวนการโดยการดึงสารตั้งต้นออก [29] จุลชีวันบางชนิดเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ เช่น เชื้อรา *Aspergillus niger* เป็นพิษต่อปอดของมนุษย์ [33]

5. การเสนอแนวทางเพื่อเป็นการช่วยแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมของอุตสาหกรรมเหมืองแร่ในประเทศไทย

กรณีเหมืองตะกั่วที่จังหวัดกาญจนบุรี ปัญหาเกิดจากรั่วไหลของบ่อกักเก็บหางแร่จากการลอยแร่ เพราะบ่อกักเก็บที่ถูกออกแบบไว้ไม่เพียงพอ จากนั้นชาวบ้านในชุมชนจึงฟ้องกรมควบคุมมลพิษในปี 2541 [14]

จากเรื่องนี้ถ้ามีการนำ *Acidthiobacillus ferrooxidans* มาใช้ในการเก็บหางแร่ตะกั่วที่ถูกทิ้งและระบายน้ำทิ้งตามค่ามาตรฐาน และนำ *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* มาช่วยตรึงซัลเฟอร์ในระบบน้ำ ก็จะมีการได้ประโยชน์สองทางคือ ได้โลหะตะกั่วเป็นผลิตภัณฑ์ น้ำล้นจากบ่อเก็บหางแร่จะมีตะกั่วปนเปื้อนสู่ธรรมชาติน้อยลง ซัลเฟอร์ในระบบจะถูกตรึงในที่จำกัดเพื่อนำไปใช้งานโดยแบคทีเรียจะปนเปื้อนสู่ธรรมชาติน้อยลง ซึ่งกระบวนการบำบัดนี้ขอเสนอให้มีประมูลราคาจากบริษัทด้านเหมืองแร่มาลงทุนในบริเวณนี้กับทางกรมควบคุมมลพิษและสิ่งแวดล้อมเป็นสัญญาระยะยาวแล้วเก็บรายได้เป็นค่าภาคหลวงแร่ หรือเก็บเป็นค่าสัมปทาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมในช่วงตลอด 19 ปีของกระบวนการศาล

กรณีเหมืองแร่ทองคำอัคราตามข้อมูลทางธรณีวิทยาที่พบปริมาณสารหนู เหล็ก และแมงกานีสในปริมาณสูงตามธรรมชาติ ทั้งก่อนและหลังทำเหมืองแร่ [15]

ในส่วนของปริมาณแมงกานีส สามารถใช้วิธีกรองหรือตกตะกอนก่อนปล่อยสู่สาธารณะ ในส่วนของเหล็กและสารหนูนั้น สามารถนำมาเข้าร่วมกับกระบวนการของแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* เพื่อใช้ในการสร้างสารละลายเฟอริกซัลเฟต และอาร์เซนิกแอซิด เพื่อใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแต่งแร่ นอกเหนือจากการใช้ไซยาไนด์ละลายออกเท่านั้น

กรณีเหมืองดีบุกในตำบลร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช การปนเปื้อนของสารหนูในสิ่งแวดล้อมจากการทำเหมือง จากปี พ.ศ. 2526 [34] เป็นต้นมา พบว่าพื้นที่ดังกล่าวยังคงมีการปนเปื้อนและแพร่กระจายของสารหนูในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดินระดับตื้น และดิน การแก้ไขปัญหาด้วยแบคทีเรีย *Acidthiobacillus ferrooxidans* ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 จนกระทั่งถึงปัจจุบันก็เป็นแนวทางหนึ่งที่ตัวผู้เขียนเห็นว่าจะมีประโยชน์กว่าการทิ้งไว้แบบที่เกิดขึ้นมาในอดีต

วิศวกรรมการแต่งแร่ด้วยจุลชีวันนี้ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทยมาก เพราะไม่มีกระบวนการใช้จริงในประเทศไทย บทความวิชาการชิ้นนี้ เป็นการแนะแนวทางเบื้องต้นสำหรับกระบวนการแยกแร่ที่มีตัวแปรของเวลาที่ไม่จำกัดยกตัวอย่างเช่น กระบวนการปิดเหมือง กระบวนการถอนประทานบัตร หรือเรื่องที่อยู่ในกระบวนการตัดสินของศาล กระบวนการทางกฎหมายนั้น

อาจจะแข่แข็งด้านอุตสาหกรรมการเงิน และการลงทุนได้ แต่ทว่าเรื่องของธรรมชาติที่ได้รับผลกระทบ ปลา นก สัตว์น้ำ ชาวบ้าน พืช ที่อยู่รอบบริเวณพื้นที่พิพาท ยังได้รับผลกระทบอยู่ตลอดเวลา การรักษาด้วยงบประมาณทางสาธารณสุขและการบำบัดสิ่งแวดล้อม จะเป็นเรื่องที่มองภาพรวมแล้วประเทศจะได้รับความเสียหายแต่ฝ่ายเดียวอย่างยาวนาน

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Sand, T. Gehrke, P. G. Jozsa, and A. Schippers, "(Bio) chemistry of bacterial leaching—direct vs. indirect bioleaching," *Hydrometallurgy*, vol. 59, no. 2, pp.159–175, 2001.

[2] J. Niosi and S. E. Reid, "Biotechnology and Nanotechnology: Science-based enabling technologies as windows of opportunity for LDCs?," *World Development*, vol. 35, no. 3, pp. 426–438, 2007.

[3] D. S. Holmes, "Review of International Biohydrometallurgy Symposium, Frankfurt, 2007," *Hydrometallurgy*, vol. 92, no. 1–2, pp. 69–72, 2008.

[4] A. Schippers, A. Breuker, A. Blazejak, K. Bosecker, D. Kock, and T. Wright, "The biogeochemistry and microbiology of sulfidic mine waste and bioleaching dumps and heaps, and novel Fe(II)-oxidizing bacteria," *Hydrometallurgy*, vol. 104, no. 3–4, pp. 342–350, 2010.

[5] A. Cecal, I. Palamaru, D. Humelnicu, K. Popa, V. V. Salaru, V. Rudic, and A. Gulea, "Removal of uranyl ions from residual waters using some algae types," *Czechoslovak Journal of Physics*, vol. 49, no. S1, pp. 987–990, 1999.

[6] Y.-G. Liu, M. Zhou, G.-M. Zeng, X. Wang, X. Li, T. Fan, and W.-H. Xu, "Bioleaching of heavy metals from mine tailings by indigenous sulfur-oxidizing bacteria: Effects of substrate concentration," *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 10, pp. 4124–4129, 2008.

[7] T. Rohwerder, T. Gehrke, K. Kinzler, and W. Sand, "Bioleaching review part A" *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 63, no. 3, pp. 239–248, January, 2003.

[8] V. Torsvik, J. Goksøyr, and F. L.Daae, "High diversity in DNA of soil bacteria," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 56, no. 3, pp. 782–787, 1990.

[9] C. M. Davies and L. M. Evison, "Sunlight and the survival of enteric bacteria in natural waters," *Journal of Applied Bacteriology*, vol. 70, no. 3, pp. 265–274, 1991.

[10] K. Kawahara, K. Tsuruda, M. Morishita, and M. Uchida, "Antibacterial effect of silver-zeolite on oral bacteria under anaerobic conditions," *Dental Materials*, vol. 16, no. 6, pp. 452–455, 2000.

[11] V. Ottova, J. Balcarova, and J. Vymazal, "Microbial characteristics of constructed wetlands," *Water Science and Technology*, vol. 35, no. 5, pp. 117–123, 1997.

[12] S. M. Z. Hossain, C. Ozimok, C. Sicard, S. D. Aguirre, M. M. Ali, Y. Li, and J. D. Brennan, "Multiplexed paper test strip for quantitative bacterial detection," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 403, no. 6, pp. 1567–1576, 2012.

[13] T. D. Brock, K. M. Brock, R. T. Belly, and R. L. Weiss, "Sulfolobus: A new genus of sulfur-oxidizing bacteria living at low pH and high temperature," *Archiv für Mikrobiologie*, vol. 84, no. 1, pp. 54–68, 1972.

[14] Department of Primary Industries and Mines.

(2017, May 8). Summary report on implementation of the solution in lead metal problem at from Kliti, Kanchanaburi [Online], Available: www.dpim.go.th/service/download?articleid=6031

[15] The secretariat of the cabinet, Thailand. (2016, May 12). Report of investigation on the health and environmental issues of Akara resources public company limited [Online], Available: https://f.ptcdn.info/907/042/000/o7mb31ogxpB3XcFITE8-o.jpg

[16] P. C. Kapur and S. P. Mehrotra, *Mineral processing: recent advances and future trends; proceedings of a conference honouring P. C. Kapur on his 60th birthday, Indian Institute of Technology, Kanpur, December 11–15, 1995*. New Delhi: Allied, pp.489–502, 1995.

[17] S. C. B. Bellenberg, R. Barthen, M. Boretska, R. Zhang, W. Sand, and M. Vera, "Manipulation of pyrite colonization and leaching by iron-oxidizing Acidithiobacillus species," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 99, no. 3, pp. 1435–1449, September, 2014.

[18] J.-L. Xia, A.-A. Peng, H. He, Y. Yang, X.-D. Liu, and G.-Z. Qiu, "A new strain *Acidithiobacillus albertensis* BY-05 for bioleaching of metal sulfides ores," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 17, no. 1, pp. 168–175, 2007.

[19] L. Chen, Y. Ren, J. Lin, X. Liu, X. Pang, and J. Lin, "*Acidithiobacillus caldus* sulfur oxidation model based on transcriptome analysis between the wild type and sulfur Oxygenase reductase defective mutant," *PLoS ONE*, vol. 7, no. 9, December, 2012.

[20] S. Hedrich and D. B. Johnson, "Acidithiobacillus ferridurans sp. nov., an acidophilic iron-, sulfur- and hydrogen-metabolizing chemolithotrophic gammaproteobacterium," *International Journal Of Systematic And Evolutionary Microbiology*, vol. 63, no. Pt 11, pp. 4018–4025, 2013.

[21] C. Falagán and D. B. Johnson, "*Acidithiobacillus ferriphilus* sp. nov., a facultatively anaerobic iron- and sulfur-metabolizing extreme acidophile," *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, vol. 66, no. 1, pp. 206–211, January, 2016.

[22] S. Pal, D. Pradhan, T. Das, L. B. Sukla, and G. R. Chaudhury, "Bioleaching of low-grade uranium ore using Acidithiobacillus ferrooxidans," *Indian Journal of Microbiology*, vol. 50, no. 1, pp. 70–75, 2010.

[23] J. Brierley and C. Brierley, "Present and future commercial applications of biohydrometallurgy," *Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century - Proceedings of the International Biohydrometallurgy Symposium Process Metallurgy*, pp. 81–89, 1999.

[24] Society for Microbiology (SASM). (2016, December). *Acidithiobacillus_ferrooxidans*. Society for Microbiology (SASM) [Online]. Available: http://www.sasm.org.za/images/blog/Acidithiobacillus_ferrooxidans.jpg

[25] Wikipedia. (2016, December). Uranium dioxide. Wikipedia [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium_dioxide

[26] D. E. Rawlings, "Microbially-assisted dissolution of minerals and its use in the mining industry," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 76, no. 4, January 2004.

[27] F. Reith, C. M. Zammit, S. S. Shar, B. Etschmann,

R. Bottrill, G. Southam, C. Ta, M. Kilburn, T. Oberthür, A. S. Ball, and J. Brugger, "Biological role in the transformation of platinum-group mineral grains," *Nature Geoscience*, vol. 9, no. 4, pp. 294–298, 2016.

[28] M. Rehman, M. A. Anwar, M. Iqbal, K. Akhtar, A. M. Khalid, and M. A. Ghauri, "Bioleaching of high grade Pb–Zn ore by mesophilic and moderately thermophilic iron and sulphur oxidizers," *Hydrometallurgy*, vol. 97, no. 1–2, pp. 1–7, 2009.

[29] V. Moses and R. E. Cape, *Biotechnology*, *the science and the business*. Chur, Switzerland: Harwood Academic Publishers, pp. 631, 1999.

[30] J. E. Madrigal-Arias, R. Argumedo-Delira, A. Alarcón, M. R. Mendoza-López, O. García-Barradas, J. S. Cruz-Sánchez, R. Ferrera-Cerrato, and M. Jiménez-Fernández, "Bioleaching of gold, copper and nickel from waste cellular phone PCBs and computer goldfinger motherboards by two Aspergillus nigerstrains," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 46, no. 3, pp. 707–713, 2015.

[31] R. Nareshkumar, R. Nagendran, and K. Parvathi, "Bioleaching of heavy metals from contaminated soil using *Acidithiobacillus thiooxidans*: effect of sulfur/soil ratio," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 24, no. 8, pp. 1539–1546, 2007.

[32] D. Mishra, D.-J. Kim, D. Ralph, J.-G. Ahn, and Y.-H. Rhee, "Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using Acidithiobacillus ferrooxidans," *Waste Management*, vol. 28, no. 2, pp. 333–338, 2008.

[33] E. Schuster, N. Dunn-Coleman, J. Frisvad, and P. van Dijck, "On the safety of aspergillus niger - A review," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 59, no. 4–5, pp. 426–435, January 2002.

[34] V. Boonamnuayvitaya. (1999, September 22). A development of biochemical application method for treating arsenic contaminated water resource in ronpibul, Nakhon Si Thammarat [Online], Available: https://www.kmutt.ac.th/rippc/pron214.htm