

บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 Bacterial Leaching หรือ Microbial Leaching

Bacterial Leaching หรือ Microbial Leaching เป็นกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็น Biochemical oxidation process โดยในรายละเอียดของกระบวนการนี้คือ การใช้แบคทีเรียในลักษณะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) ทำให้ตะกอนโลหะซึ่งปกติมักจะอยู่ในรูปของ โลหะซัลไฟด์ (Metal Sulfide , MS) ซึ่งไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรดและมีลักษณะเป็นผลึกละลายตัว (Release) ออกมาอยู่ในรูปของสารละลาย (Metal Extraction) คุณสมบัติของแบคทีเรียประเภทนี้จะต้องสามารถทนได้กับสภาวะที่เป็นกรดอย่างมาก และต้องทนได้กับสภาวะที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักอีกด้วย (ไพทัพย์ - ดันตีเวชวุฒิกุล , 1991)

จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการนำกระบวนการ Bacterial leaching ไปใช้ในการสกัดโลหะหนักออกจากแร่คุณภาพต่ำ (Low grade ore) ซึ่งพบได้ในเหมืองเก่าที่เลิกดำเนินการไปแล้ว ทั้งนี้ปริมาณเนื้อแร่จะมีปริมาณที่ต่ำมากปะปนอยู่กับสารประกอบอื่นและเป็นการจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจถ้าใช้วิธีอื่นในการสกัดเนื้อแร่ออกจากแร่คุณภาพต่ำเหล่านี้ เช่น การสกัดทองแดงออกจาก Low grade copper , ยูเรเนียม , ทองคำ เป็นต้น มีรายงานในสหรัฐอเมริกาว่ามีการนำกระบวนการ Bacterial Leaching นี้มาใช้ในการสกัดทองแดงได้ถึง 18 % ของปริมาณทองแดงทั้งหมดที่ผลิตได้ในประเทศและในปี พ.ศ. 2514 ก็มีรายงานว่าปริมาณทองแดงที่ผลิตได้ในโลกนี้ ประมาณ 5 % มาจากการทำ Bacterial Leaching

ในปัจจุบันนี้ก็ได้มีการนำกระบวนการนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการสกัด นิกเกิล (Ni) , สังกะสี (Zn) , แคดเมียม (Cd) , โคบอลต์ (Co) และยังรวมไปถึงการสกัดน้ำมันออกจากหินน้ำมันอีกด้วย จากการที่ได้มีผู้ทำการทดลองแล้ว พบว่าการทำ Bacterial Leaching จะเสียค่าใช้จ่ายถูกกว่ากรรมวิธีทางเคมีถึง 80 % เพราะใช้สารเคมีน้อย และยังไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย (Tyagi R.D., Couillard D. & Tran F., 1988)

3.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการทำ Bacterial Leaching

แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการทำ Bacterial Leaching นี้ สามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณเหมืองแร่ที่มีน้ำท่วมขัง (mine drainage water) และมีสภาพเป็นกรด ซึ่งบริเวณนี้มักเป็นบริเวณที่มีสารประกอบพวกโลหะซัลไฟด์ตกตะกอนอยู่ด้วย ตัวอย่างของสารประกอบประเภทนี้ก็ได้แก่ FeSO_4 (Pyrite), Mascarite เป็นต้น และแบคทีเรียที่ค่อนข้างจะพบมากและมีบทบาทมากที่สุดคือ *Thiobacillus ferrooxidans* ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม *Thiobacillus* อีกหลายสปีชีส์ ที่นอกจากจะสามารถอยู่ในสภาวะแวดล้อมแบบนี้ได้แล้ว ยังทนความร้อนได้อีกด้วยเรียกว่า " Thermophilic Bacteria " ซึ่งตามธรรมชาติพบว่าแบคทีเรียตระกูล *Thiobacillus* ที่ชอบอุณหภูมิสูงหรือกลุ่มแบคทีเรียผสม (Mixed Culture) สามารถทำงานได้ดีกว่า *Thiobacillus ferrooxidans* เพียงชนิดเดียว ซึ่งจะขอสถาบันถึงดังต่อไปนี้

3.2.1. *Thiobacillus ferrooxidans*

แบคทีเรียชนิดนี้สามารถอยู่ได้ในที่ซึ่งมีซัลเฟอร์ละลายอยู่ในปริมาณสูง ซึ่งได้แก่บริเวณ Drainage Water ของเหมืองถ่านหิน ความสามารถของแบคทีเรียพวกนี้คือสามารถที่จะดึงเอาซัลเฟอร์ออกมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในการดำรงชีวิต นอกจากนี้ตัวมันยังสามารถใช้สารประกอบอินทรีย์อื่นเป็นแหล่งพลังงานได้ด้วยเช่นเหล็ก (Fe^{2+}) , ซัลไฟด์ทั้งในรูปที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน จัดเป็นแบคทีเรียประเภท

" Chemoautotrophs " สามารถออกซิไดซ์ FeSO_4 ได้ที่ pH 3.5

3.2.2. Thiobacillus thiooxidans

แบคทีเรียชนิดนี้ มีความสามารถในการใช้สารอาหารจำกัดกว่าแบคทีเรียชนิดแรก คือไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็ก หรือ โลหะซัลไฟด์ได้ คงใช้ซัลเฟอร์ได้เพียงอย่างเดียว และตัวแบคทีเรียชนิดนี้เองก็ไม่ได้มีส่วนในกระบวนการ Leaching โดยตรง แต่ผลของการใช้ซัลเฟอร์ของแบคทีเรียชนิดนี้ก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก ทำให้ pH ลดลงซึ่งสภาวะนี้เองเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ Thiobacillus ferrooxidans ในกระบวนการ Leaching ซึ่งสามารถ ออกซิไดซ์ โลหะซัลไฟด์ ได้ที่ pH 3.5

3.2.3. Leptospirillum ferrooxidans and mixed cultures of acidophiles

ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ (สูงกว่า 35 องศาเซลเซียส) แบคทีเรียกลุ่มนี้จะช่วย Thiobacillus ferrooxidans ในการทำ Leaching ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิม Leptospirillum ferrooxidans และอื่นๆ เช่น Thiobacillus thiooxidans หรือ Thiobacillus organoparus หรือ Thiobacillus acidophilus ซึ่งถ้ารวมเป็นกลุ่มแบคทีเรียผสม (Mixed Culture) จะสามารถทำให้เกิดการ Leaching ได้อย่างมีประสิทธิภาพตัวอย่างเช่น การทำ Leaching แร่ Pyrite หรือ Chalcopyrite สามารถทำได้โดยใช้ Leptospirillum ferrooxidans และ Thiobacillus organoparus ร่วมกัน แต่ถ้าใช้เพียงตัวใดตัวหนึ่ง การ Leaching ก็จะมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควร

3.2.4. Thermophilic Thiobacillus spp.

แบคทีเรียกลุ่มนี้ สามารถเติบโตในด้านที่มี Pyrite และ Chalcopyrite ที่อุณหภูมิประมาณ 55 องศาเซลเซียส และยังสามารถที่จะใช้ซัลเฟอร์เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย แบคทีเรียกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย Thiobacillus TH1 , TH2 , TH3 , และ Thiobacillus thermosulfidoxidans

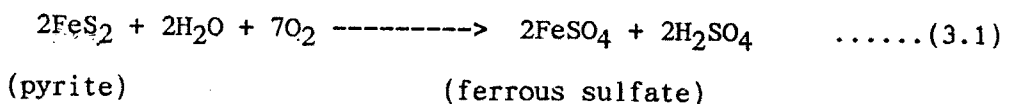
3.2.5. Extreame thermophilic bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้ สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียสบนสารอาหารที่ประกอบด้วย chalcopyrite (CuFeS_2) และ molybdenite (MoS_2) - แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถที่จะ Leaching แร่ Chalcopyrite และ Molybdenite ได้ดีกว่าแบคทีเรียที่ทำงานที่อุณหภูมิมานกลาง (Mesophile)

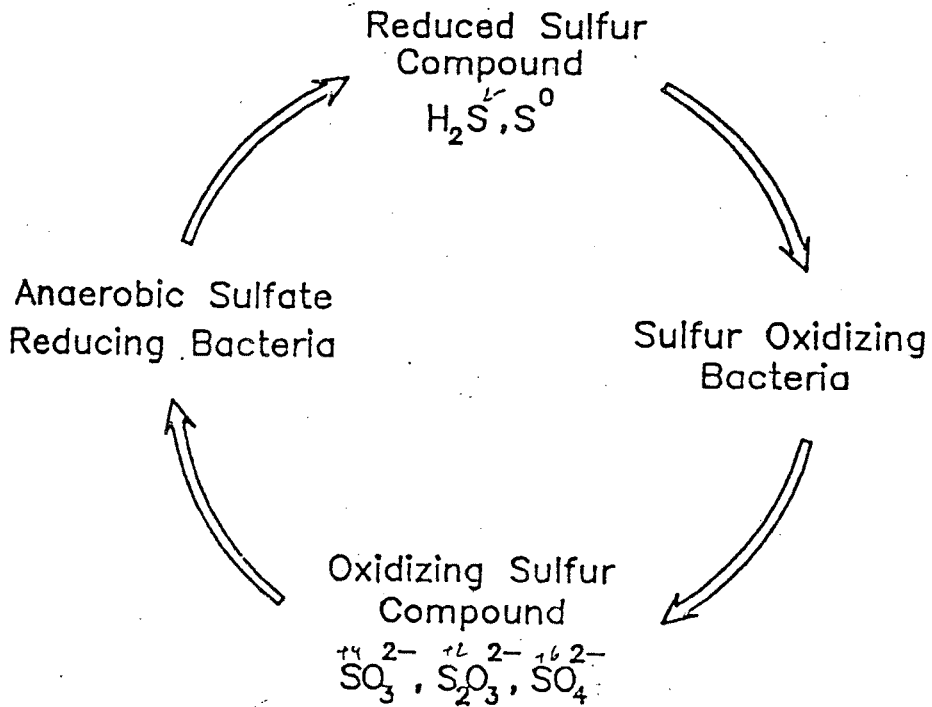
3.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบคทีเรียกลุ่ม *Thiobacillus*

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 ว่าในบริเวณแหล่งน้ำท่วมขังในเหมืองแร่ถ่านหินเป็นแหล่งที่มีภาวะความเป็นกรดสูง และมีสารประกอบพวก Metal Sulphide อยู่ เช่น Iron Sulfides , Mascarite , pyrite เป็นต้น ที่ภาวะเช่นนี้เองเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดแบคทีเรียประเภท " Sulfur and Iron Oxidizing Bacteria "

ปฏิกิริยาทั้งแบบ Chemical และ Biochemical ที่เกิดขึ้นกับสารประกอบเหล็กที่มีอยู่ในแร่ ก่อให้เกิดกรดซัลฟิวริก และตะกอนสีน้ำตาลแดงของเหล็กที่ถูกออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาเหล่านี้เรียกว่า " Yellow Boy " ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกิดขึ้นกับแร่ Pyrite ดังต่อไปนี้



วัฏจักรของซัลเฟอร์ (รูปที่ 3.1) ในธรรมชาตินั้นสามารถอธิบายได้ ดังนี้



รูปที่ 3.1 วัฏจักรของซัลเฟอร์ในธรรมชาติ

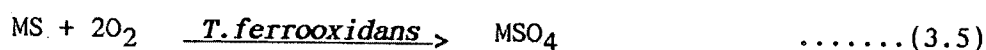
ซัลเฟอร์ที่อยู่ในรูปของ Reduced sulfur Compound (H_2S และ S^0) จะถูกแบคทีเรียประเภท " *Sulfur Oxidizing Bacteria* " เปลี่ยนรูปเป็น Oxidizing Sulfur Compound (SO_3^{2-} , $S_2O_3^{2-}$, SO_4^{2-} , etc.) และในธรรมชาติก็จะมีแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งคอยเปลี่ยนรูปของ Oxidizing Sulfur Compound ไปเป็น Reduced sulfur compound เรียกแบคทีเรียพวกนี้ว่า " *Anaerobic Sulfate Reducing Bacteria* "

3.4 Bacterial Leaching Mechanisms

ปฏิกิริยาในการสกัดโลหะออกจากสารประกอบซัลไฟด์สามารถเกิดได้ 2 วิธีคือ วิธีตรง (Direct Method) และ วิธีอ้อม (Indirect Method) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.1 วิธีตรง (Direct Method) :-

โลหะซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นโลหะซัลเฟต (Metal Sulfate, MSO_4) โดยอาศัยแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* ได้โดยตรงดังสมการ

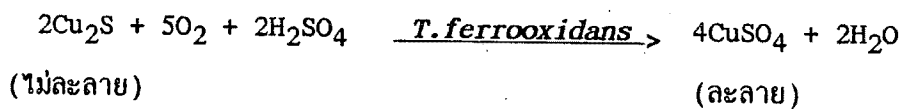


เมื่อ M คือ bivalent metal ซึ่งเมื่ออยู่ในรูป โลหะซัลไฟด์จะไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยา Oxidation แล้วจะได้ โลหะซัลเฟตที่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด ซึ่งสารละลายนี้จะถูกนำไปแยกเอาโลหะออกในขั้นตอนต่อไป

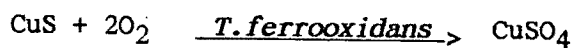
การเกิดปฏิกิริยา Leaching ในลักษณะนี้ เป็นการสัมผัสโดยตรงระหว่างแบคทีเรียกับสารประกอบโลหะซัลไฟด์ ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดเร็วหรือช้าก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแบคทีเรียกับสารประกอบ Metal Sulphide

ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดการ Leaching โดยตรง

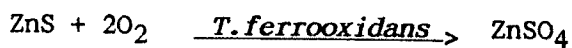
Chalcocite :-



Covellite :-

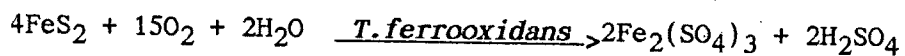


Sphalerite :-



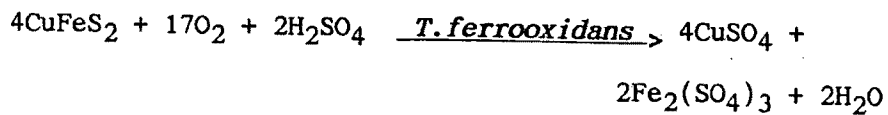
[Torma และคณะ, 1970]

Pyrite :-



[Lundgren และคณะ, 1980]

Chalcopyrite :-



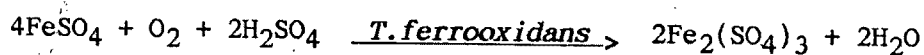
Molybdenite :-



3.4.2 วิธีอ้อม (Indirect Method) :-

การ Leaching โลหะที่เกิดจากแบคทีเรียโดยทางอ้อมเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1. แบคทีเรียออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) เป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+})

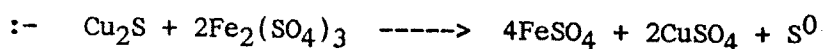


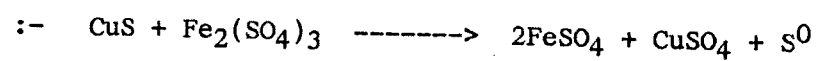
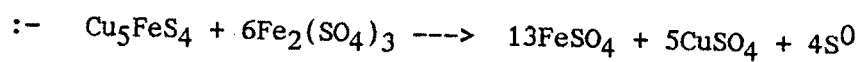
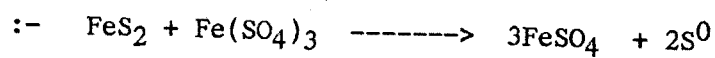
ขั้นตอนที่ 2. เกิดการละลาย (dissolution) ของโลหะเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ ทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะ เกิดเป็น Metal Sulfate ดังสมการ



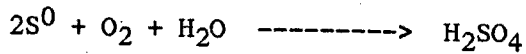
เมื่อ M คือ bivalent metal ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Chalcocite

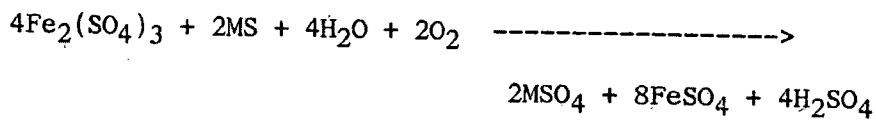


Covellite**Bornite****Sphalerite****Pyrite****Chalcopyrite****Molybdenite**

ส่วน S^0 ที่เกิดขึ้นก็จะถูกออกซิไดซ์ต่อไปโดย O_2 ดังสมการต่อไปนี้



หรือถ้าจะเขียนสมการรวมยอดของขั้นตอนที่ 2 ก็จะสามารถเขียนได้เป็น



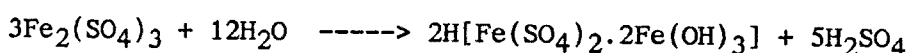
ขั้นตอนที่ 3. เหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์โดย *Thiobacillus ferrooxidans* ให้ได้เป็นเหล็กเฟอริก (Fe^{3+}) กลับไปซ้ำในขั้นตอนที่ 2 อีก



จะเห็นว่าปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3 นี้ได้เคยกล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.3 ว่าถ้าไม่มีแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้ามาก

ข้อแตกต่างระหว่างการเกิดปฏิกิริยา Leaching แบบทางตรงกับทางอ้อมก็คือ การสัมผัสกับโลหะซัลไฟด์โดยตรงที่การเกิดปฏิกิริยาแบบทางตรงนั้นการเกิด Leaching ได้จากการสัมผัสโดยตรงระหว่างแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* กับ โลหะซัลไฟด์ แต่ปฏิกิริยาแบบทางอ้อมนั้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากเหล็กเฟอริก (Fe^{3+}) ที่ได้จากการออกซิเดชันของเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+})

แม้ว่าการเกิดเหล็กเฟอร์ริกเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการ Leaching ทางอ้อมก็ตาม แต่การที่มีเหล็กเฟอร์ริกอยู่ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพลดลงได้ Kingma และ Silver พบว่าเหล็กเฟอร์ริกที่อยู่ในรูป $Fe_2(SO_4)_3$ จะเปลี่ยนเป็นเหล็กเฟอร์ริกในรูปของ Jarosite และเกิดเป็นตะกอนขึ้นดังสมการต่อไปนี้



การตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริก เป็นสาเหตุหนึ่ง ของการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Leaching (Moss และ Anderson, 1968) Kino และคณะ (1981) พบว่าในระหว่างการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* และ *Thiobacillus thiooxidans* ถ้ามีตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกเกิดขึ้น จะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสอง

โดยทั่วไปแล้วการเกิดกระบวนการ Leaching ตามธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม เนื่องจากในธรรมชาตินอกจากจะพบแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการทำ Leaching แล้วยังพบแร่เหล็กซึ่งสามารถถูกออกซิไดซ์ได้เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ก็จะทำให้เกิดกระบวนการเริ่มต้นเป็นกระบวนการทางตรง แต่ถ้าเมื่อไหร่ที่มีผลผลิตของเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ออกมา ก็จะชักนำเข้าสู่กระบวนการทางอ้อมโดยอัตโนมัติทันที

3.5 ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการทำ Leaching

3.5.1 pH

จากการศึกษาของ Torma และคณะ (1970) ถึงช่วง pH ที่แบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* สามารถทำการ Leaching สังกะสีได้ดีที่สุดได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราการสกัดสังกะสีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่ pH ต่างๆ

pH	อัตราการสกัดสังกะสี (มิลลิกรัม/ลิตร/ชั่วโมง)	ความเข้มข้นของสังกะสี (กรัม/ลิตร)
1.5	99.2	19.8
2.0	369.6	70.3
2.5 *	375.9 *	71.4 *
3.0	373.7	54.1
3.5	326.8	49.3
4.0	255.1	36.4

ที่มา :- Torma และคณะ ,1970

จากตารางจะเห็นว่าประสิทธิภาพของการ Leaching ที่ดีที่สุดอยู่ที่ pH ประมาณ 2.5 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่ใกล้เคียงกับการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* และจากการศึกษาของ Silverman และ Lundgren (1959) พบว่า *Thiobacillus ferrooxidans* สามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสได้อย่างรวดเร็วที่ pH 2.5-4.2 ซึ่งได้ผลการทดลองตรงกับ Detz และ Barvinchak (1979) ที่พบว่า *Thiobacillus ferrooxidans* ทำงานได้ดีที่สุดที่ pH 2.5

การที่อัตราการ Leaching ลดลงที่ pH สูงกว่า 3 นั้น สามารถอธิบายได้ว่า เหล็กเพอริกเกิดการตกตะกอนในรูปของ $Fe(OH)_3$ คลุมอยู่บนผิวแร่ทำให้เกิดการขัดขวางการ Leaching ส่งผลให้กระบวนการ Leaching เกิดได้น้อยลง ตารางที่ 3.2 แสดงถึงผลของ pH ต่อการตกตะกอนของเหล็ก

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า pH เริ่มต้น ,pH สุดท้าย และการตกตะกอนของเกลือเฟอร์ริก

ค่าการปรับ pH	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	การตกตะกอน (กรัม/100 มล.) ของอาหารเลี้ยงเชื้อ	ร้อยละ การตกตะกอนสัมพัทธ์ (%)
1.46	1.44	2.03	0.0188	2.15
1.81	1.78	2.26	0.3948	45.20
2.02	1.98	2.18	0.6792	77.80
2.50	2.42	2.02	0.8732	100.00
2.98	2.60	2.06	0.9641	110.40
3.67	2.80	2.04	1.0637	121.80

หมายเหตุ : ทำการทดลองแบบทีละเท ด้วยเชื้อ *Thiobacillus ferrooxidans* strain WU-66 B ระยะเวลา 96 ชั่วโมง

ที่มา :- King และคณะ,(1981)

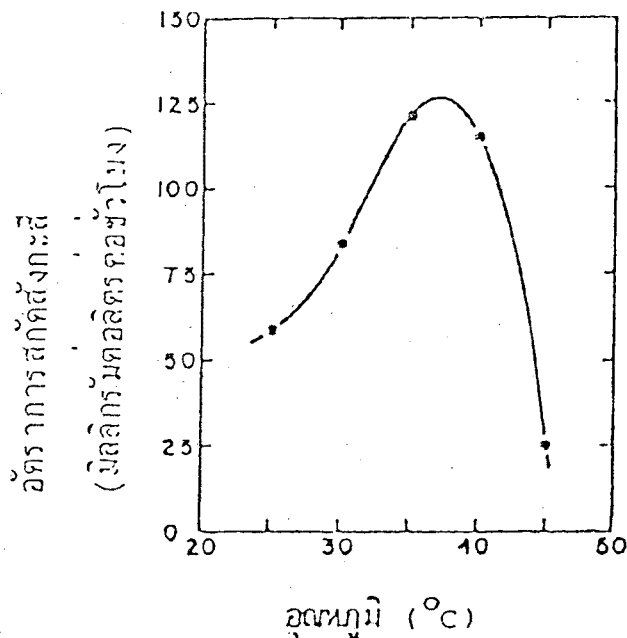
จากตารางจะเห็นว่า ที่ pH 1.46 มีการตกตะกอนน้อยมาก แต่เมื่อ pH สูงขึ้น การตกตะกอนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ การยับยั้งกระบวนการ Leaching ที่ pH สูงเป็นผลเนื่องมาจากการขัดขวางการสัมผัสระหว่างสารละลาย (ที่มี *Thiobacillus ferrooxidans*) กับตัวอย่างผิวแร่ แต่การยับยั้งกระบวนการ Leaching ที่เกิดขึ้นที่ pH ต่ำ เป็นผลเนื่องมาจากผลของ pH ที่ยับยั้งกระบวนการ Metabolism ของแบคทีเรีย ที่ pH ต่ำกว่า 2 อัตราการสกัดโลหะหนักจะถูกยับยั้ง (Karivko และคณะ,1977) Andrew และ Maczuga (1982) พบว่า ที่ pH ต่ำกว่า 1 *Thiobacillus ferrooxidans* จะหยุดทำงาน

3.5.2 ORP

ORP ที่เหมาะสมต้องต่ำกว่า 500 mv. เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของเหล็ก
ในรูป ไฮดรอกไซด์หรือเฟอร์รัสซัลเฟต

3.5.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับ *Thiobacillus ferrooxidans* อยู่ในช่วง
20-35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำที่สุดที่แบคทีเรีย ยังสามารถทำงานได้อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส
ถ้าอุณหภูมิลดลงถึง 10 องศาเซลเซียส จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย เมื่ออุณหภูมิขึ้นสูงถึง
40 องศาเซลเซียส อัตราการออกซิเดชันของ Fe^{2+} จะลดลงอย่างมาก และถ้าอุณหภูมิอยู่ใน
ช่วง 45 - 50 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน ดังรูปที่ 3.2



ที่มา : Torma และคณะ ,1970

รูปที่ 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสกัดสังกะสีที่ pH 2.5

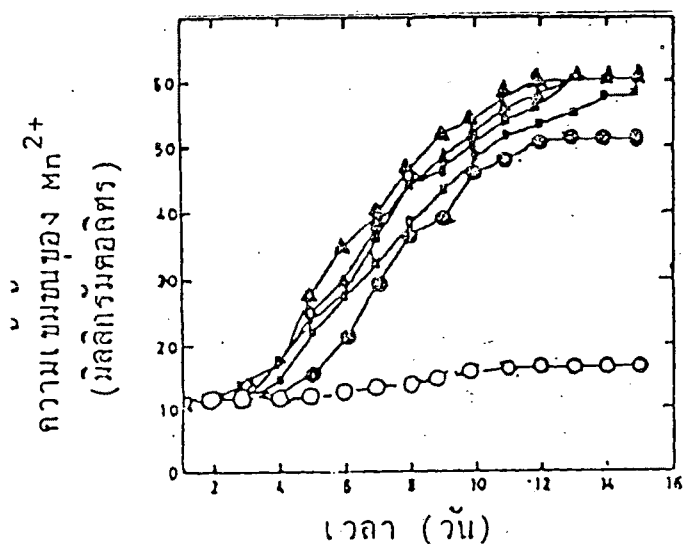
3.5.4 สารอาหาร

สารอาหารหลักที่เป็นที่ต้องการของแบคทีเรียพวก Chemosynthesis ประกอบไปด้วย แอมโมเนียที่ประกอบไปด้วยแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญที่สุด ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่ใช้ในขั้นแรกๆของกระบวนการผลิตพลังงาน ส่วนแมกนีเซียมจำเป็นสำหรับปฏิกิริยาการตรึง CO_2 ความเข้มข้นของ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ และ K_2HPO_4 ที่เหมาะสมคือ 3 และ 0.5 กรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ (Torma และคณะ, 1970)

3.5.5 เฟอร์รัสไอออน และซัลเฟอร์

กระบวนการ Leaching ทางอ้อมเกิดขึ้นโดยผ่านการออกซิไดซ์ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ปริมาณของเฟอร์รัสจึงมีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันเฟอร์รัส Silverman และ Tuovinen (1959) พบว่าการออกซิเดชันเหล็กโดย *Thiobacillus ferrooxidans* ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Fe^{2+} อย่างไรก็ตามการออกซิเดชันของ Fe^{2+} ยังขึ้นกับสภาพแวดล้อม เช่น pH และนอกจากนี้ Vuorinen และ Tuovinen (1987) พบว่าการออกซิเดชัน Fe^{2+} โดย *Thiobacillus ferrooxidans* ขึ้นกับความเข้มข้นของ Pyrite โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของ Pyrite ที่ร้อยละ 5 และ 10 มีปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 2 กรัมต่อลิตร และเกิดตะกอนเหล็กเฟอร์ริกร้อยละ 49-56 ในขณะที่ความเข้มข้นของ Pyrite ที่ร้อยละ 2.5 มีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสเพียง 0.5 กรัมต่อลิตร เกิดตะกอนเหล็กเฟอร์ริกถึงร้อยละ 86

การออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ มีบทบาทที่สำคัญในการสกัดโลหะโดยกระบวนการ Leaching โดยตรง นอกจากนั้นการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์อาจมีส่วนช่วยในกระบวนการ Leaching ทางอ้อม Ghosh และ Imai (1985) พบว่าแมงกานีสถูกสกัดออกมาจากแมงกานีสไดออกไซด์ โดย *Thiobacillus ferrooxidans* ได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกัมมะถัน ดังรูปที่ 3.3



0% 0.5% 0.8% 1% 1.2% 1.5%

รูปที่ 3.3 การสกัดแมงกานีสที่ความเข้มข้นของกำมะถันต่าง ๆ กัน

3.6 ผลการศึกษาที่ผ่านมา

3.6.1 การใช้ Bacterial Leaching ในการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซิงเกต

ไพฑิพย์, 2531 ได้ทำวิจัยโดยใช้ Bacterial Leaching ในการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซิงเกต โดยใช้แร่ตัวอย่างที่ประกอบด้วยซิงเกต ร้อยละ 38 สังกะสีร้อยละ 41 และไม่พบว่ามีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ *Thiobacillus ferrooxidans* ผลการศึกษาพบว่า สังกะสีสามารถถูกสกัดออกมาได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีการเติมแบคทีเรียอยู่ กรณีที่มีแบคทีเรียและสภาวะที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* คือที่ pH ประมาณ 2.8 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และมีเหล็กเฟอร์รัสเป็นองค์ประกอบของสารอาหาร พบว่าจะเกิดการละลายของสังกะสีได้มากกว่าในกรณีที่ไม่มีแบคทีเรียอยู่ และในสภาวะแวดล้อมที่คล้ายคลึงกันเมื่อมีแบคทีเรียสังกะสีสามารถละลายออกมาได้หมดภายใน 14 วัน ในขณะที่เมื่อไม่มีแบคทีเรียสังกะสีละลายออกมาเพียงร้อยละ 40 ของสังกะสีที่มี

อยู่ทั้งหมดในตัวอย่างแรก จากการนี้เองจึงสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการละลายของสังกะสีจึงมีทั้งปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาชีววิทยา

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาชีววิทยาก็คือ pH และปริมาณเหล็กเพอร์ส (Fe^{2+}) pH เริ่มต้นที่เป็นกรดประมาณ 2.8 ส่งเสริมอัตราการ Leaching ทั้งปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาชีววิทยา ในปฏิกิริยาเคมี pH ที่เป็นกรดช่วยส่งเสริมอัตราการเกิดออกซิเดชันของเหล็กเพอร์สไปเป็นเหล็กเพอริก และปฏิกิริยาระหว่างเหล็กเพอริกกับสังกะสีเป็นสังกะสีซัลเฟต เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุด pH ในสารละลายประมาณ 3.43 เนื่องจาก pH ในปฏิกิริยานี้ไม่ต่ำพอที่จะทำให้เกิดการละลายของแร่ซิงเกตที่ผ่านการ Leaching โดยปฏิกิริยาเคมีจึงมีแร่ซิงเกตเหลืออยู่ถึงร้อยละ 35

ในปฏิกิริยาชีววิทยา pH 2.8 เป็น pH ที่เหมาะสมและช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Thiobacillus ferrooxidans* ทำให้แบคทีเรียออกซิไดซ์เหล็กเพอร์สไปเป็นเหล็กเพอริก และได้พลังงานที่แบคทีเรียนำไปใช้ในการเจริญเติบโต เหล็กเพอริกทำปฏิกิริยากับสังกะสีเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเคมี แม้ว่าปฏิกิริยาเคมีและปฏิกิริยาชีววิทยาต้องการเหล็กเพอร์ส แต่ในปฏิกิริยาเคมีต้องการปริมาณที่สูงกว่าต่อน้ำหนักแร่ที่เท่ากัน เนื่องจากในปฏิกิริยาชีววิทยาแบคทีเรีย สามารถทำให้เกิดการหมุนเวียนของเหล็กเพอริกไปเป็นเหล็กเพอร์สได้อีก ซึ่งต่างจากปฏิกิริยาเคมีที่เมื่อเหล็กเพอร์สถูกออกซิไดซ์หมดปฏิกิริยาจะหยุดทันทีจากการทดลองพบว่า การ Leaching สังกะสีซิงเกต 1 กรัมด้วยกรรมวิธีทางเคมีต้องใช้เหล็กเพอร์ส 2 กรัมในขณะที่การ Leaching สังกะสีซิงเกต 1 กรัมด้วยกรรมวิธีทางชีวจะใช้เหล็กเพอร์สเพียง 1 กรัมเท่านั้น

นอกจากอัตราการออกซิไดซ์เหล็กเพอร์สไปเป็นเหล็กเพอริกโดยแบคทีเรียเกิดได้เร็วกว่าในปฏิกิริยาเคมีแล้ว การเจริญเติบโตของแบคทีเรียยังทำให้เกิดกรดซัลฟิวริก มีผลทำให้ pH ต่ำลง โดยพบว่า pH ในสารละลายมีค่า 1.98 ซึ่ง pH ที่ต่ำลงนี้เพิ่มการละลายของซิงเกตให้มากขึ้น ตัวอย่างแรกที่ผ่านการ Leaching โดยปฏิกิริยาชีววิทยาจะมีปริมาณซิงเกต

เหลือเพียงร้อยละ 24 แต่แร่ซัลไฟด์ที่ละลายออกไปมีถึงร้อยละ 14 ขณะในปฏิกิริยาทางเคมีการละลายมีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้น โดยซัลไฟด์ที่ละลายออกไปมากขึ้นในปฏิกิริยาทางชีวะอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ได้สังกะสีที่สกัดโดยกระบวนการชีววิทยาสูงกว่ากระบวนการทางเคมี เพราะทำให้สังกะสีที่มีอยู่ในตัวอย่างแร่มีรอกาสแทนปฏิกิริยากับสารละลาย และเกิดการ Leaching ได้มากขึ้น

เมื่อ pH ของสารละลายตั้งต้นสูงกว่า 2.8 ปฏิกิริยาการสกัดสังกะสีที่เกิดขึ้นในระยะแรกเป็นปฏิกิริยาเคมีไม่ว่าสภาวะมีแบคทีเรียหรือไม่มีแบคทีเรียก็ตาม เพอริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ pH ต่ำลง ในกรณีที่เลี้ยงแบคทีเรียใน pH ที่ต่ำลงทำให้เกิดการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย กล่าวได้ว่าการละลายสังกะสีที่เกิดขึ้นในระยะหลังเกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาชีววิทยา ซึ่งในกรณีดังกล่าวปริมาณสังกะสีที่ได้เมื่อในสภาวะมีแบคทีเรียอยู่มากกว่าในสภาวะไม่มีแบคทีเรีย เมื่อเทียบในระยะเวลาที่เท่ากัน pH สุดท้ายของสารละลายเท่ากับ 1.98 และ 3.43 เมื่อมีและไม่มีแบคทีเรียตามลำดับ

เนื่องจากการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* ต้องการ pH ต่ำ การเลี้ยง *Thiobacillus thiooxidans* ร่วมกับ *Thiobacillus ferrooxidans* โดยการเติมซัลเฟอร์เป็นแหล่งพลังงานของ *Thiobacillus thiooxidans* ทำให้ *Thiobacillus thiooxidans* ผลิตกรดซัลฟิวริกทำให้ pH ต่ำลงอันมีต่อการเพิ่มการเจริญเติบโตของ *Thiobacillus ferrooxidans* ได้ดีกว่าเมื่อ *Thiobacillus ferrooxidans* อยู่ตามลำพัง

3.6.2 การสกัดน้ำมันจากหินน้ำมัน

หินน้ำมันประกอบไปด้วยส่วนของสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง กับส่วนที่เป็นแร่ธาตุ (mineral matrix) ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้จะจับกับสารอินทรีย์อยู่ ส่วนของแร่ธาตุเหล่านี้ทำให้การนำหินน้ำมันมาซึ่งมีประสิทธิภาพลดลง เป็นต้นว่า ในการที่จะสกัด

เอาน้ำมันออกมาจากหินน้ำมันโดยการใช้ความร้อน (Retorting) แร่ธาตุเหล่านี้จะทำให้ความร้อนเข้าไปถึงส่วนของสารอินทรีย์ได้ยากขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการสกัดออกมา ซึ่งผลเสียที่ตามมาอีกประการหนึ่งคือ เมื่อใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์บางตัว เช่น 3,4 benzopyrene phenolic ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบหายใจ และยังสามารถได้สารพวก polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งเชื่อกันว่าเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) ดังนั้นถ้าได้มีการกำจัดแร่ธาตุเหล่านี้ออกไปก่อนก็จะทำให้การนำหินน้ำมันมาใช้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการสกัดน้ำมันจากหินน้ำมันนี้จะใช้แบคทีเรียตระกูล " *Thiobacillus* " ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ซึ่งสามารถออกซิไดซ์พวกกำมะถัน (Sulfur oxidizing Bacteria) ทำให้เกิดการตกกำมะถัน ที่สามารถละลายสารพวกคาร์บอนเนตที่จับอยู่กับส่วนของสารอินทรีย์ในหินน้ำมัน หินน้ำมันที่ผ่านกระบวนการ Bacteria leaching จะมีความพรุน (Porosity) และความซึมผ่านได้ (Permeability) เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่น (Retorting) ลดลง รวมถึงจะได้น้ำมันเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งผลของการ Leaching สามารถแสดงได้ดังนี้

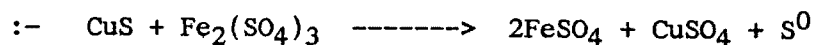
การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในหินน้ำมัน ที่ผ่านกระบวนการ Leaching	ประสิทธิภาพ
ปริมาตรของรูพรุนที่เพิ่มขึ้น	จากไม่มีเป็น 50-100 μm^3
Oxidation Rate	เพิ่มขึ้น 3-4 เท่า
น้ำมันที่ได้	เพิ่มขึ้น 30 %
อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด	ลดลงอย่างน้อย 50 c

กรดซัลฟิวริกที่เกิดจากการออกซิไดซ์กำมะถันโดย "*Thiobacillus*" จะไปละลายคาร์บอเนตทำให้เกิดเป็น CaSO_4 ซึ่งก่อให้เกิดครุพูนในหินน้ำมันส่งผลให้การใช้ความร้อนในการสกัดน้ำมันลดลง

3.6.3 การสกัดแร่ทองแดง

การสกัดแร่ทองแดงด้วยกระบวนการ Bacterial leaching ทำได้โดยสกัดทองแดงออกจาก Covellite (CuS), Chalcocite (Cu_2S) และ Chalcopyrite (CuFeS_2) ดังสมการ

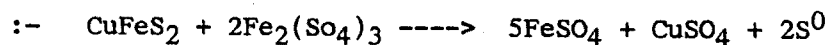
Covellite



Chalcocite

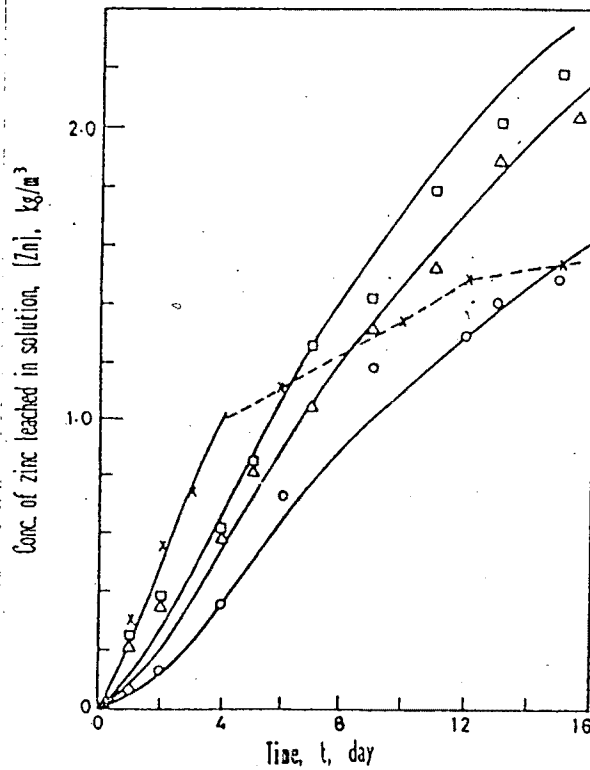


Chalcopyrite



3.6.4 การสกัดแร่สังกะสี

ได้มีการศึกษาการทำ Bioleaching ของ ZnS โดย *Thiobacillus ferrooxidans* ในการทดลองแบบทีละเท ซึ่งมีการ Mixing อย่างดี ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ pH 2.2 โดย ZnS ที่ใช้ในการทดลองเป็นแร่ธรรมชาติชื่อ Natural Sphalerite ซึ่งนำมาจากเหมืองในญี่ปุ่นชื่อ Hanaoka Mine ประกอบไปด้วย สังกะสี 55.7 % , เหล็ก 3 % , ตะกั่ว 3.06 % , ทองแดง 1.02 % และ กำมะถัน 31.6 % ผลของการ Leaching เป็นดังนี้



ที่มา : Yasuhiro Konishi, Hideaki Kubo and Satoru Asai, 1992

รูปที่ 3.4 แสดงผลการทำ Bioleaching สังกะสีด้วย *Thiobacillus ferrooxidans* โดยใช้ Fe³⁺ ที่สภาวะเริ่มต้นต่างกัน ดังนี้

X Fe ³⁺	1.0	kg./Cu.m.	Fe ³⁺	0.5	kg./Cu.m.
Fe ³⁺	0.3	kg./Cu.m.	Fe ³⁺	0.0	kg./Cu.m.

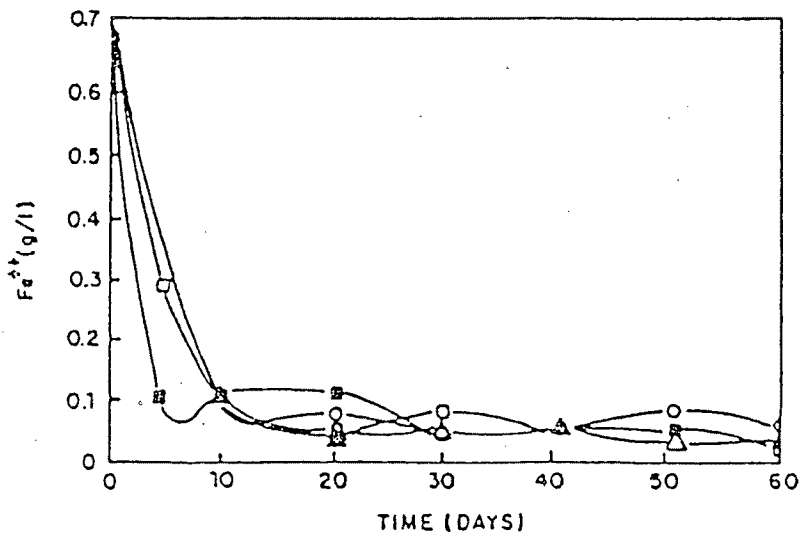
จากรูปที่ 3.4 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของการ Leaching จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Process) นานขึ้น สิ่งที่สังเกตได้อีก 2 ประการคือ ประสิทธิภาพการ Leaching จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ Fe^{3+} ในสถานะเริ่มต้นมากขึ้น แต่การมี Fe^{3+} ในสถานะเริ่มต้นที่มากก็มิได้เกิดผลดีเสมอไป ดังรูปที่แสดงเส้นประ คือผลของการตกตะกอนของสารประกอบ Fe^{3+} อยู่บนผิวของสิ่งกีดขวางประสิทธิภาพของ Leaching ลดลง

3.6.5 การทำ Phosphate Rock Bioleaching

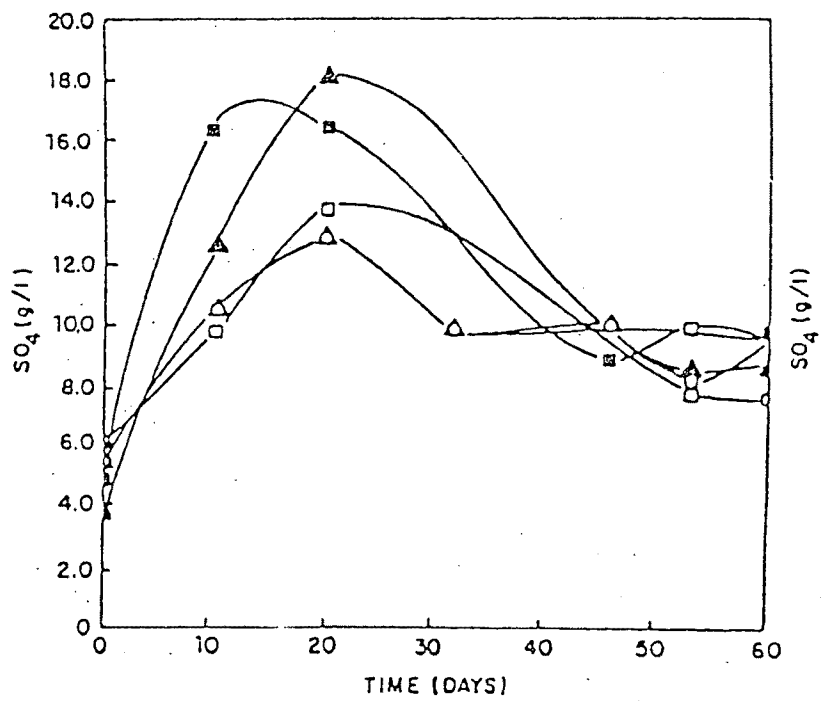
งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่น่าสนใจคือ การทำ Phosphate Rock Bioleaching โดยใช้ *Thiobacillus ferrooxidans* และ *Thiobacillus thiooxidans* โดยที่ในการทดลองจะใช้ Pyritiferous เป็น Substrate สำหรับ *Thiobacillus ferrooxidans* ในปริมาณ 10 g/l และใช้ Phosphate Rock ตั้งแต่ 2.5 ถึง 40 g/l โดยจะแบ่งการทดลองเป็น 5 ชุด โดยมีอัตราส่วนของ Pyritiferous : Phosphate Rock ดังต่อไปนี้

Reactor ที่ 1	มีอัตราส่วน Pyritiferous : Phosphate Rock	10 : 2.5
Reactor ที่ 2	มีอัตราส่วน Pyritiferous : Phosphate Rock	10 : 5
Reactor ที่ 3	มีอัตราส่วน Pyritiferous : Phosphate Rock	10 : 10
Reactor ที่ 4	มีอัตราส่วน Pyritiferous : Phosphate Rock	10 : 20
Reactor ที่ 5	มีอัตราส่วน Pyritiferous : Phosphate Rock	10 : 40

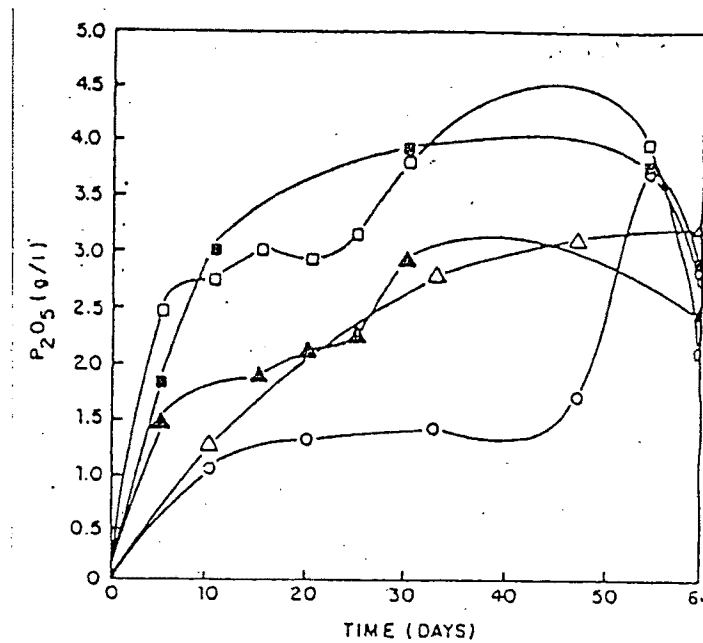
ผลของการวิจัยแสดงไว้ดังรูป



รูปที่ 3.5 แสดงถึงการลดลงของ Fe^{2+} ขณะทำการทดลอง เนื่องจากถูกแบคทีเรียหน้าไบรซ์



รูปที่ 3.6 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของ SO_4^{2-} ขณะทำการทดลอง เนื่องจากเป็นผลผลิตของปฏิกิริยา



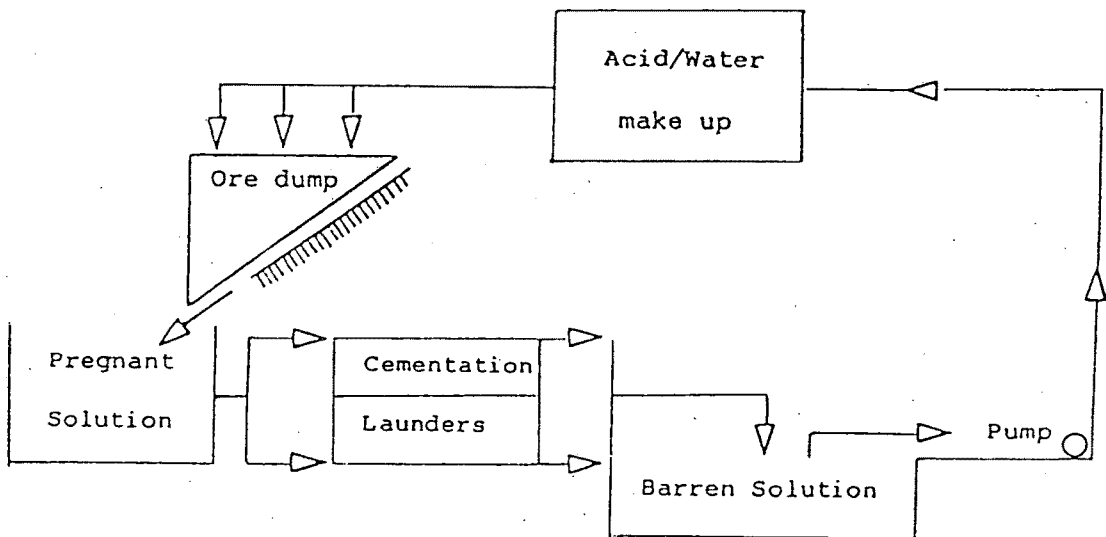
รูปที่ 3.7 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของ P_2O_5 ขณะทำการทดลอง ซึ่งเกิดจากการ Leaching

3.6.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการ Leaching ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ทองแดง

ระบบ Bioleaching ที่ใช้ในการสกัดทองแดงเป็นระบบที่เรียกว่า dump leaching โดยใช้กับแร่เกรดต่ำ หรือกับหินจากเหมืองที่ผ่านการทำเหมืองโดยปกติมาแล้ว และหินเหล่านี้ยังมีปริมาณทองแดงจำนวนหนึ่งเหลืออยู่ ซึ่งถ้าหาวิธีปกติมาสกัดจะไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ หินเหล่านี้ถูกนำมาจากบริเวณที่มีการทำเหมืองเดิม มากองรวมกันไว้ซึ่งบริเวณที่นำมากองมักเป็นบริเวณหุบเขา เพื่อไม่ให้เกิดการพังของกองหิน กองหินนี้อาจมีความสูงถึง 1,200 ฟุต มีปริมาณหินถึง 4 พันล้านตัน ตัวอย่างเช่นการทำ dump leaching ที่ใกล้กับเมือง Salt Lake ในรัฐยูทาห์ของสหรัฐอเมริกา หลังจากที่มีการกองหินแล้วทำการพ่นสารละลายที่มี pH ประมาณ 1.9-2.4 ลงไปเหนือกองหินนั้น การให้สารละลายโดยการพ่นเป็นการเพิ่มปริมาณของออกซิเจนที่มีความสำคัญทั้งแก่ปฏิกิริยาเคมี และชีวภาพ

โดยปกติแล้วไม่มีความจำเป็นต้องเติมแบคทีเรียลงไปอีก เพราะมีอยู่ในธรรมชาติแล้ว แต่การที่ต้องพ่นสารละลายที่มี pH 1.9-2.4 ก็เพื่อปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม ทำให้แบคทีเรียที่มีอยู่แล้วเจริญเติบโต แบคทีเรียที่พบบ่อยคือ *Thiobacillus ferrooxidans* *Thiobacillus thiooxidans*

ทองแดงที่ถูกสกัดออกมาในสารละลายจะอยู่ในรูปของ CuSO_4 สารละลายที่ได้เรียกว่า Pregnant หรือ Metal Laden เพื่อให้การแยกทองแดงออกจากสารละลายมีความคุ้ม ในการเศรษฐกิจควรมีความเข้มข้นของทองแดงไม่ต่ำกว่า 1-2 กรัมต่อลิตร ดังนั้นสารละลายที่มีทองแดงในปริมาณที่ต่ำกว่านี้จะถูกนำพ่นกลับลงไปในกองหินใหม่ จนกว่าจะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นตามต้องการ จากนั้นทำการแยกทองแดงออกจากสารละลายโดยการทำปฏิกิริยากับเหล็กเพอร์ไรต์ หรือใช้สกัดด้วยตัวทำละลาย สารละลายที่แยกเอาทองแดงออกแล้วจะถูกนำกลับไปใช้พ่นในกองหินใหม่ ดังรูปที่ 3.8

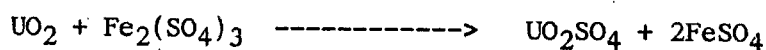


รูปที่ 3.8 แสดงกระบวนการสกัดทองแดงจากแร่เกรดต่ำโดยใช้ dump leaching

3.6.7 การสกัดแร่ยูเรเนียม

การใช้วิธี Bioleaching สกัดแร่ยูเรเนียม เกิดหลังจากที่มีการใช้วิธีนี้กับแร่ทองแดง การใช้ Bioleaching กับยูเรเนียมนี้จะใช้ในบริเวณที่บริเวณเหมืองแร่ยูเรเนียมโดยตรง แต่เป็นเหมืองที่ปิดแล้ว เนื่องจากมีปริมาณของยูเรเนียมเหลืออยู่ต่ำ (ร้อยละ 0.01 - 0.05 U_3O_8) สารละลายที่ใช้ Leaching จะถูกฉีดไปตามผนังอุโมงค์เก่าที่ถูกขุดทิ้งไว้ การฉีดจะดำเนินไปเป็นช่วง ๆ เป็นเวลาประมาณ 3 เดือน สารละลายที่ได้มี pH ประมาณ 2.3 - 2.8 มียูเรเนียมละลายอยู่ในปริมาณที่มากพอที่ให้ผลคุ้มค่าเศรษฐกิจ ที่เมืองสแตนรอกาน คานาดา สามารถเก็บ U_3O_8 โดยวิธีดังกล่าวได้ถึงเดือนละ 7.5 ตัน ส่วนการใช้ dump leaching เช่นที่ใช้กับทองแดงไม่นิยมใช้กับยูเรเนียม

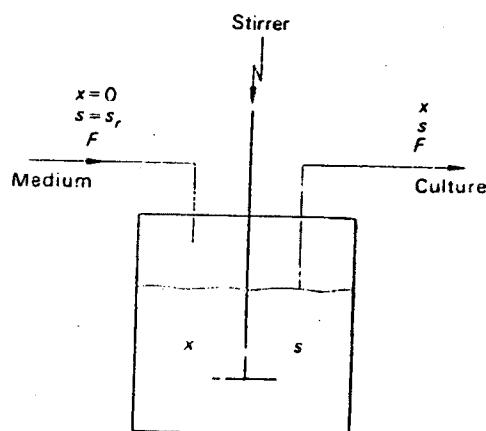
การสกัดยูเรเนียมโดยแบคทีเรียชั้น แแบคทีเรียไม่ได้สัมผัสกับหินแร่ที่มียูเรเนียมโดยตรง แต่แบคทีเรียผลิต Fe^{3+} จาก Pyrite และสารละลาย Fe^{2+} โดยที่ Fe^{3+} จะทำปฏิกิริยากับ ยูเรเนียม เปลี่ยนจาก U^{4+} เป็น U^{6+} ที่ละลายได้ในสารละลายกรดเจือจาง ดังสมการต่อไปนี้



หลังจากนั้นสารละลายที่มียูเรเนียมจึงถูกนำไปแยกยูเรเนียมอีกขั้นตอนหนึ่ง

3.7 Chemostat Process

ระบบการเลี้ยงเชื้อด้วยวิธี Continuous Process มี 2 วิธีคือ 1.Plug-flow และ 2.Chemostat ซึ่ง Plug-flow เป็นการเลี้ยงเชื้อผ่าน Tube หรือ Chanel โดยปราศจากการ Mixing ส่วน Chemostat เป็นการเลี้ยงเชื้อที่มีการ Mixing อย่างสมบูรณ์ของตะกอนจุลินทรีย์ (Biomass) ในขณะที่บ่อนอาหารด้วยอัตราคงที่ ดังรูปที่ 3.9



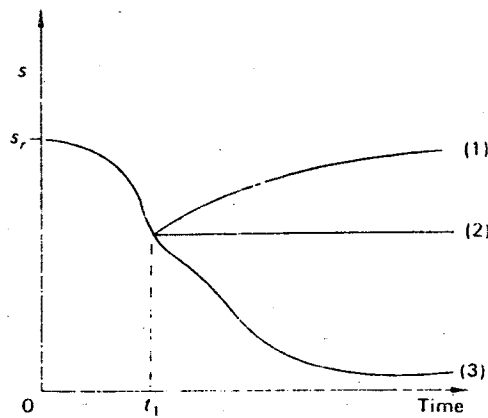
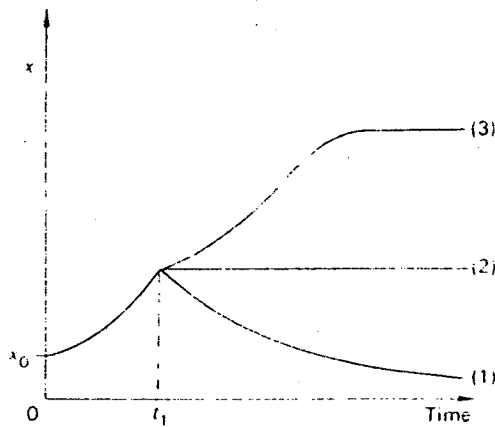
รูปที่ 3.9 แสดง Chemostat Diagram ซึ่งตะกอนจุลินทรีย์แสดงด้วยสัญลักษณ์ x และปริมาณสารอาหารแสดงด้วยสัญลักษณ์ s

จากรูป การเลี้ยงเชื้อด้วยวิธี Chemostat ประกอบด้วย เชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเลี้ยงในสารอาหาร (Fresh medium) ซึ่งบ่อนเข้าสู่ระบบด้วยอัตราคงที่และความเข้มข้นของเชื้อ - แบคทีเรียจะคงที่ เนื่องจากมีการ Over flow ออกด้วยอัตราเดียวกัน ซึ่งการเลี้ยงเชื้อวิธีนี้ จะต้องมีการ Mixing กันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเติมสารอาหารจะใช้วิธีหยดผ่านท่อสารอาหาร ซึ่งวิธีการนี้ เวลาที่ใช้ในการผสมสารอาหารให้กับเชื้อแบคทีเรียใช้เวลาอย่างมาก ซึ่งหาได้จาก

$$t_r = V/F$$

โดยที่ V = ปริมาณของ Reactor และ F = อัตราการป้อนสารอาหาร

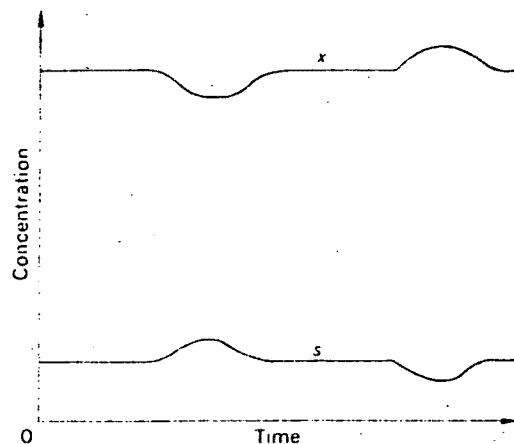
เมื่อพิจารณาถึงการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในปฏิกิริยา ซึ่งมีการเติมสารอาหารเพียงทางเดียว ดังรูป 3.9 ดังนั้น เมื่อเริ่มป้อนสารอาหาร ผลลัพธ์ของปฏิกิริยาจะมีโอกาสเป็นไปได้ 3 กรณี ดังรูปที่ 3.10



กรณีแรก คือ ถ้าอัตราการระบายออก (Washout) มากกว่าอัตราการเจริญเติบโต ดังนั้น ปริมาณจุลินทรีย์จะมีแนวโน้มลดลง และ ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารจะเพิ่มขึ้น ดังเส้นที่ 1

กรณีที่ 2 ก็คือ อัตราการระบายออกเริ่มต้นมีค่าเท่ากับอัตราการเจริญเติบโต กรณีนี้ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตด้วยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth ; μ) ในกรณีนี้ จะเป็น Steady State ที่จุลินทรีย์ และปริมาณสารอาหารจะอยู่ในภาวะคงที่ แต่อย่างไรก็ตาม ภาวะเช่นนี้ก็ยังไม่เสถียร เพราะถ้ามีผลกระทบก็จะทำให้ระบบเปลี่ยนแปลงอย่างภาวะได้

กรณีที่ 3 กรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ อัตราการระบายออกเริ่มต้นน้อยกว่าอัตราการเติบโตสูงสุด กรณีนี้จะทำให้ความเข้มข้นของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกรณีนี้ทำให้ปริมาณสาร - อาหารลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะลดลงด้วย จนกว่าอัตราการเจริญเติบโตจะเท่ากับอัตราการระบายออก ซึ่งทำให้อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ $< \mu$



รูปที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่า ในขณะที่ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ลดลงที่เวลาใด ๆ

ปริมาณความเข้มข้นของสารอาหารจะเพิ่มขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อความเข้มข้นของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น ปริมาณสารอาหารจะลดลงในช่วงเวลาเดียวกัน

3.8 Specific Growth Rate (อัตราการเจริญเติบโตเฉพาะ)

ในการที่จะหาอัตราการเจริญเติบโต (Growth Rate) และความเข้มข้นของจุลินทรีย์ และสารอาหารภายใต้สภาวะต่าง ๆ นั้น ถ้ากำหนดให้ μ = อัตราการเจริญเติบโตเฉพาะแล้ว

$$F/V = D$$

โดยที่

D = Duration Rate มีหน่วยเป็น อัตราการไหลต่อหน่วยปริมาตร

การเพิ่มขึ้นของจุลินทรีย์ หาได้โดย Mass Balance ดังนี้

$$\text{Net Increase in Biomass} = \text{Growth-Output}$$

ในระยะเวลาใดเวลาหนึ่ง (dt) สามารถแสดง Mass Balance ได้ดังสมการ

$$Vdx = V\mu x \cdot dt - Fx \cdot dt$$

หารตลอดด้วย $V \cdot dt$

$$dx/dt = (\mu - D)x$$

ในกรณีที่ เป็น Steady State เมื่อ $dx/dt = 0$ จะได้ $\mu = D$