บทที่ 3

ทฤษฎี

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thiobacillus ferrooxidans

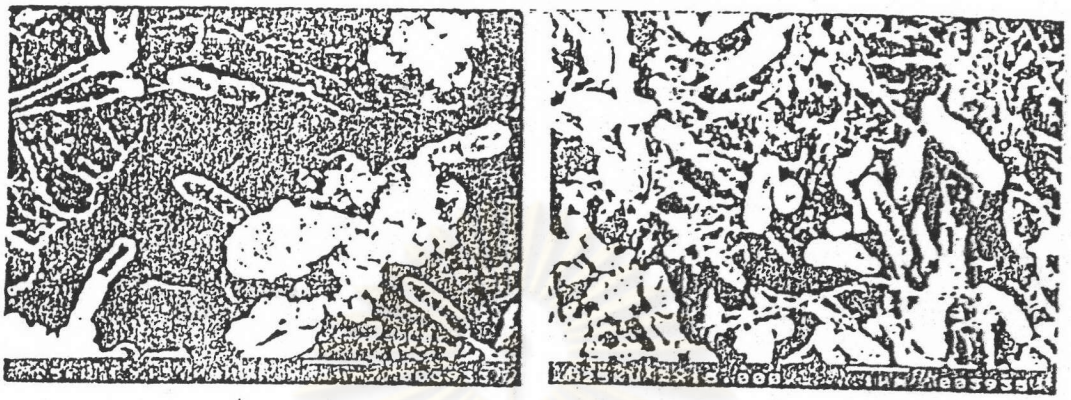
เป็นแบคทีเรีย สปีชีส์หนึ่งของ จีนัส Thiobacillus มีบทบาทเกี่ยวข้องกับการไบโอลิชชิ่งมากที่สุด แยกได้ครั้งแรกจากเหมืองถ่านหิน โดย Clomer และ Hinkle ปีค.ศ.1947 มีรูปร่างแบบแท่ง (rods) ดังรูปที่ 3.1 มักอยู่เดี่ยว ๆ หรือจับกันเป็นคู่ มีขนาด 0.5 X 1.0 m เคลื่อนที่โดย flagellum ไม่สร้างสปอร์ ย้อมสีติดแกรมลบ

หากอยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว (liguid medium) ที่มีเฟอร์รัสซัลเฟตที่pH 1.6 จะเปลี่ยนรูปจากสีเขียวจาง ๆ ไปเป็นสีเหลืองอำพันถึงน้ำตาลแดงของเฟอร์ริกซัลเฟตแต่ที่ pH ตั้งแต่ 1.9 ขึ้นไป จะตกตะกอนและถูกเคลือบด้วย jarosite

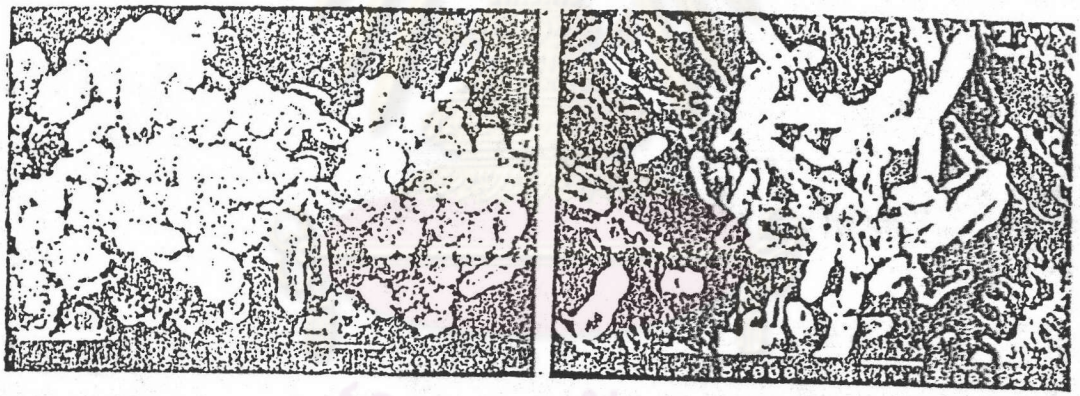
สามารถออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์ และเติบโตบนเหล็กเฟอร์รัส (ferrousiron),ไพไรท์ (pyrite) แร่ซัลไฟด์หลายชนิด ได้พลังงานในการเจริญเติบโตและการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ จากการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส และสารอนินทรีย์ซัลเฟอร์บางชนิด ใช้เกลือแอมโมเนียมหรือไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจน

เนื่องจากเป็นแบคทีเรียประเภทใช้อากาศ (aerobic bacteria) จึงต้องการ อากาศอย่างเพียงเพื่อเป็นปัจจัยในการเจริญเติบโต อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30-35^{o}c และสามารถ เติบโตได้ที่อุณหภูมิ 10 - 37 ^{o}C (จะไม่เติบโตที่อุณหภูมิ 42 ^{o}C) เจริญเติบโตได้ดีในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด pH ที่เหมาะสมคือประมาณ 2.5 และสามารถเติบโตได้ที่ pH 1.3 - pH 4.5

พบในสถานที่หลายแห่งทั่วโลก ที่พบว่ามีเหล็กที่สามารถออกซิไดซ์ได้(oxidizable iron), แร่ซัลไฟด์ และซัลเฟอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำทิ้งจากเหมืองแร่ซัลไฟด์หรือเหมืองแร่ถ่านหิน ซึ่งมีสภาพเป็นกรด



(ก.) (ข.)



(ค.) (ง.)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ อิเลคตรอน ของ Thiobacillus ferrooxidans ด้วยกำลังขยาย 15,000 เท่า (บริบูรณ์,2537)

Michael R. Hofman et al.,1981 ทำการทดลองโดยใช้ **Thiobacillus ferrooxidans** หลายสายพันธุ์ที่แตกต่างกัน ทำการลิชชิ่ง FeS_2 จากถ่านหินพบว่า **Thiobacillus ferrooxidans** ATCC 19859 เป็นสายพันธุ์ที่มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งสูงสุด

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิชชิ่ง

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิชชิ่ง มักเป็นแบคทีเรีย ที่อยู่ในน้ำบริเวณเหมืองแร่แบคทีเรียที่พบ เป็นพวกที่เจริญเติบโตได้ดี ในที่มี pH เป็นกรด (Acidiophile) แบคทีเรียที่มีบทบาทมากคือ **Thiobacillus ferrooxidans** ในธรรมชาติ พบว่าจุลินทรีย์ผสม กลุ่ม Thiobacillus รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ชอบอุณหภูมิสูง ทำงานได้ดีกว่าการใช้ **Thiobacillus ferrooxidans** เพียงชนิดเดียว

จุลินทรีย์กลุ่ม Thiobacillus ประกอบด้วย

ก. **Thiobacillus ferrooxidans**

พบบริเวณ Drainage Water ของเหมืองถ่านหินซึ่งเป็นบริเวณที่มีซัลเฟอร์สูง แบคทีเรียพวกนี้ สามารถดึงเอาซัลเฟอร์ออกมาใช้เป็นพวก Chemoautotroph ได้พลังงานจากการออกซิไดซ์เหล็ก, ซัลเฟอร์, ซัลไฟด์ที่ละลายและไม่ละลาย, สารประกอบซัลเฟอร์ และได้แหล่งคาร์บอนจากการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

ข. **Thiobacillus thiooxidans**

แบคทีเรียกลุ่มนี้ต่างจาก **Thiobacillus ferrooxidans** โดยไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กหรือโลหะซัลไฟด์ในทุกสภาวะแวดล้อมแต่ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์ที่ละลายน้ำได้ **Thiobacillus thiooxidans** ไม่เกี่ยวข้องกับการลิชชิ่งโดยตรงแต่ส่วนช่วย **Thiobacillus ferrooxidans** โดยออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ได้กรดซัลฟูริก ทำให้ pH ลดลงเหมาะแก่การเจริญเติบโตและทำงานของ **Thiobacillus ferrooxidans**

ค. **Leptospirillum ferrooxidans และ Mixed culture ของ acidophiles**

พวกนี้ช่วย **Thiobacillus ferrooxidans**ในการลิชชิ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส การเกิดไอโอลิชชิ่ง โดย **Leptospirillum ferrooxidans** อาจเกิดจากการทำงานร่วมกัน

ระหว่าง **Leptospirllum ferrooxidans** กับแบคทีเรียอื่น ๆ เช่น **Thiobacillus thiooxidans**, **Thiobacillus organoparus** หรือ **Thiobacillus acidophilus**

มีหลักฐานที่แสดงให้เห็นว่า จุลินทรีย์ผสมทำงานดีกว่าจุลินทรีย์บริสุทธิ์ เช่นการออกซิไดซ์ Pyrite หรือ Chalcopyrite โดย **Leptospirillum ferrooxidans** และ **Thiobacillus organoparus** (Markosyan,1973) ซึ่งพบว่าถ้าใช้จุลินทรีย์ชนิดใดชนิดหนึ่งไม่สามารถย่อยสลาย Pyrite หรือ Chalcopyrite ได้เหมือนกับเมื่อใช้จุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน

ง. Thermophilic thiobacillus

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้เจริญบน Pyrite,Chalcopyrite ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์

จ. Extreme thermophilic

bacteria พวกนี้เจริญได้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส Substrate ที่ใช้คือ Chalcopyrite ($CUFeS_2$) และ malybdenite(MoS_2) จุลินทรีย์กลุ่มนี้ย่อยสลาย Chalcopyrite และ Molybdenite ได้ดีกว่าจุลินทรีย์ที่เป็นพวกที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (Mesophile)

นอกจากจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับลิชชิ่งโดยตรงแล้ว ยังมีจุลินทรีย์อีกหลายชนิด ที่ทำให้พีเอช ต่ำลง ทำให้เกิดสภาวะเหมาะสมกับจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิชชิ่ง

กระบวนการลิชชิ่งที่เกิดโดยจุลินทรีย์

กระบวนการลิชชิ่งที่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรีย อาจเกิดขึ้นได้ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม ดังต่อไปนี้

ก. วิธีโดยตรง (Direct leaching)

แบคทีเรียใช้เอ็นไซม์ ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของแร่ที่มีความไวต่อการออกซิเดชั่น จากการออกซิไดซ์สารอนินทรีย์ แบคทีเรียได้พลังงานจากการถ่ายทอดอิเลคตรอนจากสารอนินทรีย์ เช่น เหล็กหรือกำมะถันไปยังออกซิเจน ถ้าเขียนสมการทั่วไปของการลิชชิ่งทางตรงได้ดังต่อไปนี้

Bacteria

$$MS + 2O_2 \text{ ---------> } MSO_4$$

M คือ bivalent metal ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด เมื่อเกิดการออกซิไดซ์ซัลไฟด์เกิดเป็นโลหะซัลเฟตที่ละลายได้ ซึ่งจะนำสารละลายนี้ไปแยกเอาโลหะหนักออกต่อไป

ตัวอย่างปฏิกิริยาของการเกิดการลิชชิ่งโดยตรงกับแร่ชนิดต่าง ๆ มีดังนี้

Chalcocite : $2Cu_2S + 5O_2 + 2H_2SO_4 \text{ ----------> } 4CuSO_4 + 2H_2O$

Covellite : $CuS + 2O_2 \text{ ---------> } CuSO_4$

Sphalerite : $ZnS + 2O_2 \text{ ----------> } ZnSO_4$ [Torma และคณะ(1970)]

ข. วิธีโดยอ้อม (Indirect leaching)

การลิชชิ่งโลหะที่เกิดจากจุลินทรีย์โดยทางอ้อมเกิดเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. แบคทีเรียออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสเป็นเหล็กเฟอร์ริก

$$4FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 \text{ -------> } 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (1)$$

2. เกิดการละลาย (dissolution) ของโลหะ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง $Fe_2(SO_4)_3$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะเกิดเป็นโลหะซัลเฟต ดังสมการข้างล่าง

$$MS + 2Fe^{3+} \text{----------> } M^{2+} + 2Fe^{2+} + S^o \qquad (2)$$

M คือ bivalent metal ดังตัวอย่างต่อไปนี้

Chalcocite : $Cu_2S + 2Fe_2(SO_4)_3 \text{--------> } 4FeSO_4 + 2CuSO_4 + S^o$

Covellite : $CuS + Fe_2(SO_4)_3 \text{----------> } 2FeSO_4 + CuSO_4 + S^o$

Bornite : $Cu_5FeS_4 + 6Fe_2(SO_4)_3 \text{-----} > 3FeSO_4 + SCuSO_4 + 4S^o$

3. เหล็กเฟอร์รัสที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์โดย **Thiobacillus ferrooxidans** ให้ได้เหล็กเฟอร์ริกกลับไปใช้ในสมการที่ 2 อีก

$$4FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 \text{--------} > 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \qquad (3)$$

การไลโอฟิไลซ์ (Lyophilization)

การไลโอฟิไลซ์ (Lyophilization) หรือ Freeze - drying เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลาย ในการเก็บรักษาจุลชีพต่างๆ และจุลชีพที่ผ่านการไลโอฟิไลซ์นั้นเก็บรักษาได้ง่าย คือเพียงเก็บในอุณหภูมิที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาและสะดวกในการขนส่ง

หลักการสำคัญในการทำไลโอฟิไลซ์ คือการกำจัดน้ำออกจากจุลชีพที่แข็งตัวอย่างเฉียบพลันด้วยความเย็น เมื่อจุลชีพถูกทำให้อยู่ในสถานะของแข็งด้วยความเย็นแล้ว จะกำจัดน้ำโดยดึงน้ำออกในสถานะก๊าซ (ในรูปของไอน้ำ) ด้วยวิธีนี้ จะรักษาโครงสร้างของจุลชีพไว้ได้ สำหรับวิธีการทำให้จุลชีพที่ผ่านการทำการไลโอฟิไลซ์กลับสู่สภาพเดิม กระทำโดยให้ความชื้นกลับคืนสู่จุลชีพนั้นอีกครั้ง (rehydration)

ในทางปฏิบัติ ก่อนที่จะทำให้จุลชีพแข็งตัว จะผสม medium ลงไปกับจุลชีพเพื่อปกป้องความเสียหาย ที่อาจเกิดขึ้นกับจุลชีพ จากการทำให้แข็งด้วยความเย็น (freezing) และการทำแห้ง (drying) ซึ่ง Medium ที่ใช้กับจุลชีพแต่ละชนิดจะต่างกันไป Medium สำหรับ Bacteria มีหลายชนิด ได้แก่

-Skim milk นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศไทยเนื่องจากจะมีลักษณะเป็น floc ให้จุลชีพเกาะ และเป็นแหล่งคาร์บอนที่ดี

- Sucrose (12%) นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา
- Inositol serum นิยมใช้ในประเทศอังกฤษ
- Inositsl broth นิยมใช้ในประเทศอังกฤษ

การเลือกใช้ medium ต้องพิจารณาความเหมาะสมหลายด้าน เช่น ประสิทธิภาพ, ราคา, ความยากง่ายในการเตรียม medium เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการทำ การไลโอฟิไลซ์คือ

การรักษาสภาพของจุลชีพไว้ได้นานที่สุด ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับขั้นตอนการไลโอฟิไลซ์ที่ถูกต้อง และที่สำคัญที่สุด คือความเหมาะกับการทำการไลโอฟิไลซ์ของสปีชีส์จุลชีพนั้น ๆเอง

ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการลิชชิ่ง (Leaching)

1. พีเอช (pH)

จากตารางที่ 3.1จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของการลิชชิ่งที่ดีที่สุดอยู่ที่ pH ประมาณ 2.5 ซึ่งเป็นช่วง pH ที่ใกล้เคียงกับการเจริญเติบโตของ **Thiobacillus ferrooxidans** และจากการศึกษาของ Silverman และ Lundgren,1959 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531 พบว่า **Thiobacillus ferrooxidans** สามารถออกซิไดซ์เฟอรัสได้อย่างรวดเร็วที่ pH 2.5-4.2 ซึ่งได้ผลการทดลองตรงกับ Detz และ Barvinchak,1979 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531 ที่พบว่า **Thiobacillus ferrooxidans** ทำงานได้ดีที่สุดที่ pH 2.5

ตารางที่3.1 แสดงอัตราการสกัดสังกะสีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ที่ pH ต่าง ๆ (Torma และคณะ ,1970 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531)

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

Tyagi และคณะ,1988 ทำการทดลองโดยใช้ **Thiobacillus ferrooxidans** ลิชชิ่งสลัดจ์ anaerobic digested sludge พบว่า ประสิทธิภาพของการลิชชิ่งโลหะหนักทุกชนิดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสลัดจ์ลดลงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นและ pH ลดลง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณการละลายสูงสุดของโลหะหนักจากสลัดจ์แอนแอโรบิค ที่ digest แล้ว (Tyagi และ คณะ,1988)

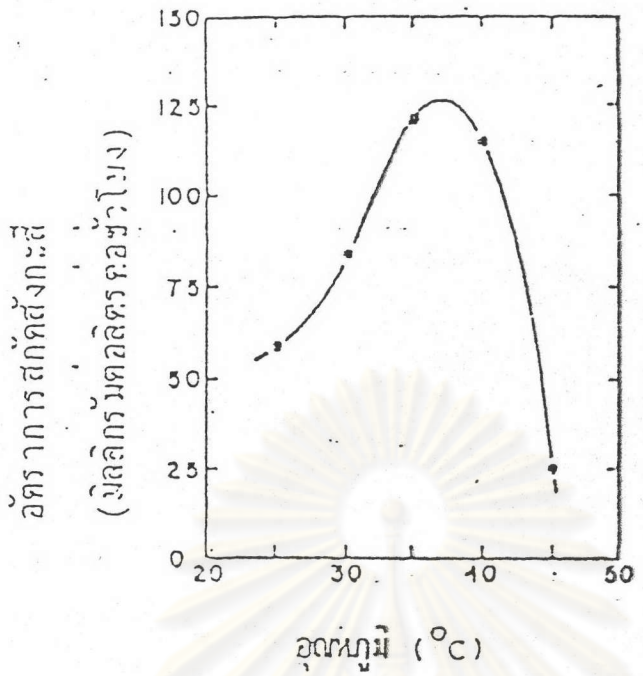
pH	ความเข้มข้นสลัดจ์ (กรัม/ลิตร)	ปริมาณโลหะหนักละลาย (%)		
		Zn	Pb	Cu
1.5	5	-	86.00	86.95
	15	89.95	71.68	75.36
	21	80.35	61.44	74.50
	35	78.12	49.10	55.90
	45	78.12	-	55.07
2.0	5	93.75	55.91	47.80
	15	88.54	-	69.50
	21	74.40	56.30	48.65
	35	66.96	47.90	55.90
	45	60.76	-	46.37
2.5	21	-	43.52	39.33
3.0	21	74.40	15.36	16.83
3.5	21	58.00	-	2.00
4.0	21	23.32	-	-

2. ORP

ORP ที่เหมาะสมต้องต่ำกว่า 500 mv. เพื่อหลีกเลี่ยงการตกตะกอนของเหล็ก ในรูป ไฮดรอกไซด์หรือเฟอรัสซัลเฟต

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับ **Thiobacillus ferrooxidans** อยู่ในช่วง 20-35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำที่สุดที่แบคทีเรีย ยังสามารถทำงานได้อยู่ที่ 15 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิลดลงถึง 10 องศาเซลเซียส จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย เมื่ออุณหภูมิขึ้นสูงถึง 40 องศาเซลเซียส อัตราการออกซิเดชั่นของ Fe^{2+} จะลดลงอย่างมาก และถ้าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 45 - 50 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน รูปที่ 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสกัดสังกะสีที่ พีเอช 2.5 โดย Torma และคณะ,1970 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531



รูปที่ 3.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่ออัตราการสกัดสังกะสีที่ พีเอช 2.5
(Torma และคณะ,1970 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531)

4. สารอาหาร

สารอาหารหลักที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ เป็นแหล่งพลังงาน ได้แก่เหล็กเฟอร์รัส (Ferrous ions) และแร่ธาตุต่าง ๆ ได้แก่ แอมโมเนีย, ซัลเฟต, โปแทสเซียม, ฟอสเฟต, แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งต้องเตรียมให้ครบในสารอาหารเลี้ยงเชื้อส่วนธาตุคาร์บอน แบคทีเรียจะได้จากการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากอากาศ (Lundgren และ Silver,1980 อ้างถึงใน Tyagi และคณะ,1991)

5. เฟอรัสไอออน และซัลเฟอร์

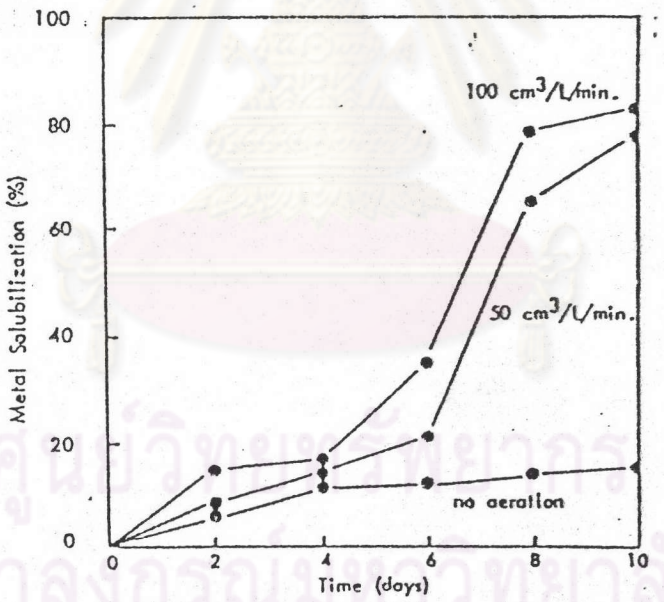
กระบวนการลิชชิ่งทางอ้อม เกิดขึ้นโดยผ่านการออกซิไดซ์ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ปริมาณของเฟอรัสจึงมีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันเฟอรัส Silverman และ Tuovinen ,1959 อ้างถึงใน ไพทิพย์,2531 พบว่าการออกซิเดชั่นเหล็ก โดย **Thiobacillus ferrooxidans** ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Fe^{2+} อย่างไรก็ตามการออกซิเดชันของ ยังขึ้นกับสภาพแวดล้อม เช่น พีเอช

6. พื้นที่ผิวสัมผัส

พื้นที่ผิวสัมผัสในที่นี้ หมายถึง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแบคทีเรียกับ สารประกอบโลหะหนักนั้น ๆ Razzell และ Trussell,1962 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการลิชชิ่งแร่ Chalcopyrite โดย **Thiobacillus ferrooxidans** จะแปรตามจำนวนพื้นที่ผิวสัมผัสของแร่กับ **Thiobacillus ferrooxidans**

7. อากาศ

Wong และ Henry,1984 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการลิชชิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ ปริมาณอากาศซึ่งจะมีผลส่งให้การลิชชิ่งมากขึ้นเมื่อปริมาณอากาศมากขึ้น ดังรูปที่ 3.2 แสดงการลิชชิ่งแคดเมียมออกจากสลัดจ์โดยเติมปริมาณอากาศเป็น 100, 50 ลูกบาศก์เซ็นติเมตร/ลิตรของสลัดจ์/นาที และไม่เติมอากาศ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงผลของปริมาณอากาศที่มีต่อการลิชชิ่งแคดเมียมออกจากสลัดจ์
(Wong และ Henry,1984)

ผลการศึกษาที่ผ่านมา

1. การใช้ **Thiobacillus ferrooxidans** สกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน

บริบูรณ์, 2537 ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการสกัดโลหะหนัก ออกจากตะกอนซัลไฟด์ โดยแบคทีเรีย **Thiobacillus ferrooxidans** ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ในถังปฏิกรณ์ขนาด 15 ลิตร โดยมีตัวแปรได้แก่ ระยะเวลาเก็บกักและความเข้มข้นสารอาหาร $FeSO_4.7H_2O$ ตะกอนซัลไฟด์ที่ใช้ เป็นตะกอนสังเคราะห์มี 3 ชนิดได้แก่ CuS, NiS และ ZnS ที่มีความเข้มข้น 200 และ 400 มิลลิกรัม/ลิตรผลการทดลองพบว่า ปริมาณโลหะหนักถูกสกัดออกมาได้ดีที่ระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของโลหะซัลไฟด์ 200 มิลลิกรัม/ลิตร แบคทีเรียสามารถสกัด Cu, Ni และ Zn ได้ร้อยละ 100, 100 และ 55 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของโลหะซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัม/ลิตร แบคทีเรียสามารถสกัด Cu, Ni และ Zn ได้ร้อยละ 86. 58, 80.10 และ 65.94 ตามลำดับ ค่า pH ที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนักอยู่ในช่วง 2.3 - 2.5

2. การใช้ Bacterial Leaching ในการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซิลิเกต

ไพทิพย์ ,2531 ได้ทำวิจัยโดยใช้ Bacterial Leaching ในการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซิลิเกต โดยใช้แร่ตัวอย่างที่ประกอบด้วยซิลิเกต ร้อยละ 38 สังกะสีร้อยละ 41 และไม่พบว่ามีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ **Thiobacillus ferrooxidans** ผลการศึกษา พบว่า สังกะสีสามารถถูกสกัดออกมาได้ ทั้งในสภาวะที่ มีและไม่มีแบคทีเรียอยู่ กรณีที่มีแบคทีเรียและสภาวะที่เหมาะสม กับการเจริญเติบโตของ **Thiobacillus ferrooxidans** คือ ที่ pH ประมาณ 2.8 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และ เหล็กเฟอรัสเป็นองค์ประกอบของสารอาหาร พบว่าจะเกิดการละลายของสังกะสีได้มากกว่า ในกรณีที่ไม่มีแบคทีเรียอยู่และในสภาวะแวดล้อมที่คล้ายคลึงกัน เมื่อมีแบคทีเรียสังกะสีละลายออกมาได้หมด ภายใน 14 วัน ในขณะที่ เมื่อไม่มีแบคทีเรีย สังกะสีละลายออกมาเพียงร้อยละ 40 ของสังกะสีที่มีอยู่ทั้งหมดในตัวอย่างแร่ จากการนี้เอง จึงสามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการละลายของสังกะสีจึงมีทั้ง ปฏิกิริยาเคมี และปฏิกิริยาชีววิทยา

3. การใช้ไบโอลิชชิ่งในการสกัดยูเรเนียม

การใช้ไบโอลิชชิ่งในการสกัดยูเรเนียม เกิดหลังจากที่มีการใช้กับทองแดง การใช้ไบโอลิชชิ่งกับยูเรเนียม ใช้ในเหมืองที่ทำยูเรเนียมโดยตรง แต่เป็นเหมืองที่ปิดแล้วเนื่องจากมี

ปริมาณยูเรเนียมเหลืออยู่ต่ำ (ร้อยละ 0.01 -0.05 U_3O_8) โดยใช้สารละลายที่ใช้ลิชชิ่งฉีดไปตามฝาผนังของอุโมงค์เก่าที่ถูกขุดทิ้งไว้ การฉีดดำเนินเป็นช่วงๆ เป็นเวลาประมาณ 3 เดือน สารละลายที่ได้มี พีเอชประมาณ 2.3 - 2.8 มียูเรเนียมละลายอยู่ในปริมาณมากพอ ที่ให้ผลคุ้มทางเศรษฐกิจ ที่เหมืองแสตนร็อก ประเทศแคนาดา สามารถเก็บยูเรเนียมโดยวิธีดังกล่าวได้ถึงเดือนละ 7.5 ตัน

4. การกำจัดซัลเฟอร์ออกจากถ่านหินโดยวิธีไบโอลิชชิ่ง

ประเสริฐ, 2536 ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการกำจัดไพไรต์ซัลเฟอร์ ในถ่านหินลิกไนต์จากแหล่งแม่เมาะจ.ลำปาง ซึ่งมีซัลเฟอร์ทั้งหมดร้อยละ5.49 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักอยู่ในรูปไพไรต์ซัลเฟอ ร์ อินทรีย์ซัลเฟอร์และซัลเฟตซัลเฟอร์ ร้อยละ 1.89, 2.07 และ 1.53 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักตามลำดับ จากการทดลองโดยใช้ **Thiobacillus ferrooxidans** ATCC 19859 ในอาหารเลี้ยงเชื้อ 9K พบว่า เมื่อปริมาณหัวเชื้อตั้งต้นมากขึ้น สามารถเร่งปฏิกิริยาไบโอลิชชิ่งให้เกิดเร็วขึ้น พื้นที่ผิวและปริมาณถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง มีผลต่อความสามารถ ในการกำจัดไพไรต์ ซัลเฟอร์ในถ่านหิน โดยพบว่า เมื่อใช้ถ่านหินขนาดใหญ่ขึ้น และปริมาณมากขึ้น ไพไรต์ ซัลเฟอร์ ในถ่านหินถูกกำจัดได้น้อยลง อุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการกำจัดไพไรต์ซัลเฟอร์ในถ่านหิน คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส การลิชชิ่งเกิดจาก ปฏิกิริยาเคมีมากกว่าปฏิกิริยาชีวเคมี จากงานวิจัยนี้เมื่อใช้หัวเชื้อตั้งต้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ต่อปริมาตร ถ่านหินขนาด 80/100 เมช ปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ความเข้มข้นเฟอร์รัสซัลเฟต ในสารละลาย 20 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด ไพไรต์ซัลเฟอร์ ในถ่านหินได้กว่าร้อยละ 80 ของไพไรต์ซัลเฟอร์ทั้งหมดในถ่านหินเมื่อทำการทดลองได้ 9 วันและกว่าร้อยละ 96 เมื่อทำการทดลองได้ 21 วัน เมื่อไม่มีการใส่หัวเชื้อตั้งต้น การกำจัดไพไรต์ซัลเฟอร์ในถ่านหินทำได้เพียงประมาณร้อยละ20 เมื่อทำการทดลองได้ 21 วัน

5. การใช้ไบโอลิชชิ่งกำจัดโลหะหนักจากสลัดจ์ชุมชน (Municipal Sludge)

เนื่องจากมีการใช้ไบโอลิชชิ่งสกัดกำจัดโลหะหนักจากสลัดจ์ชุมชนหลายการทดลอง แต่เนื่องจากลักษณะสมบัติของสลัดจ์ ที่ใช้ทำการทดลองต่างกัน จึงให้ผลการทดลองที่ต่างกัน และไม่สามารถสรุปผลของประสิทธิภาพ **Thiobacillus ferrooxidans** ในการลิชชิ่งได้ชัดเจน เช่น

Wong และ Henry,1983 อ้างถึงใน Couillard และคณะ,1991 การทดลองโดยถังปฏิกรณ์แบบทีละเท โดยใช้สลัดจ์จากกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 พบว่าสามารถลิชชิ่ง Zn ได้ 87 % , Cu 65 % , Ni 78 % และ Pb 0 % ในเวลา 8 วัน

การทดลองของ Tyagi และคณะ,1988 อ้างถึงใน Couillard และคณะ,1991 การทดลองโดยถังปฏิกรณ์แบบทีละเท โดยใช้สลัดจ์จากกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 พบว่า สามารถลิชชิ่ง Zn ได้ 95 % , Cu 75 % และ Pb 55 % ในเวลา 10 วัน

Couillard และ Mercier , 1990 ทำการทดลองโดยถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTR) และทำการควบคุม pH เท่ากับ 4 ตลอดการทดลอง และเติม $FeSO_4.7H_2O$ 1 กรัม/ลิตร พบว่า สามารถลิชชิ่ง Zn 77 %, Cu 62 % และ ทำการทดลองโดยถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบเวียนสลัดจ์ (CSTRWR) โดยใช้การเวียนสลัดจ์เท่ากับ 50 % พบว่าสามารถลิชชิ่ง Zn 64 %, Cu 50 % ในเวลา 3 วัน

Tyagi และคณะ,1991 ทำการทดลอง โดยถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTRWR) และเติม $FeSO_4.7H_2O$ 4 กรัม/ลิตร และทำการควบคุม pH เท่ากับ 4.5 โดยใช้การเวียนสลัดจ์เท่ากับ 50 % พบว่าสามารถลิชชิ่ง Zn ได้ 94 % , Cu 91 % และ Ni 8 % ในเวลาประมาณ 1 วัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย