

บทที่ 2

บททวนเอกสาร

2.1 นิกเกิลและบทบาทในอุตสาหกรรมชุบโลหะ

2.1.1 คุณสมบัติของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะสีขาวด้าน มีความคล้ายกับเหล็กในด้านความเหนียวและมีความแข็งมากกว่าเหล็ก มีความคล้ายกับทองแดงในด้านการเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะไม่เกิดที่อุณหภูมิห้องและเมื่อเผาถึง 700-800°C อีกทั้งนิกเกิลยังสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก (มันัส, 2538) ซึ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของนิกเกิลและคุณสมบัติเชิงกลแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติเชิงกลของโลหะนิกเกิล (มันัส, 2538)

มวลอะตอม	58.69	
โครงสร้างระบบผลึก	face centered cubic ($a = 3.516 \text{ \AA}$)	
ความหนาแน่น (ที่ 25°C)	8.89	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อุณหภูมิหลอมเหลว	1435-1445	องศาเซลเซียส
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2730	องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (ที่ 27-100°C)	0.130	แคลลอรี่ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	7.38	แคลลอรี่ต่อกรัม
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่ 27-100°C)	13×10^{-6}	ต่อองศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ที่ 20°C)	9.5	ไมโครโอมเซนติเมตร
สัมประสิทธิ์นำความร้อน (ที่ 27-100°C)	0.145	แคลลอรี่ต่อตารางเซนติเมตร
ความแข็งแรงหรือความต้านทานแรงดึง	47	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
พิกัดความยืดหยุ่น	15	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
อัตราการยืดตัว	40%	
ความแข็ง	110	HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	21000	กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

2.1.2 บทบาทของโลหะนิกเกิลในอุตสาหกรรมชุบโลหะ

เนื่องจากนิกเกิลทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีมาก จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมชุบโลหะ เพื่อรักษาเนื้อโลหะเดิมไม่ให้เกิดสนิมง่าย และถ้ามีการเติมน้ำยาเงาในขณะที่ชุบจะทำให้ผิวนิกเกิลมีสีชาวดำเงิน ซึ่งจะทำให้โลหะที่ชุบมีความสวยงามอีกด้วย

การชุบนิกเกิลมีหลายแบบด้วยกัน ได้แก่ นิกเกิลดำ นิกเกิลกิ่งเงา และ นิกเกิลเงา ซึ่งมีบทบาทในอุตสาหกรรมชุบโลหะอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีการชุบนิกเกิลแบบนิกเกิลดำ และ ซาตินนิกเกิล

สารละลายน้ำยาชุบ ประกอบไปด้วย นิกเกิลที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กรดบอริก (H_3BO_3) และน้ำยาเงา ซึ่งนิกเกิลที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือ นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4 \cdot 7H_2O$) ที่แตกตัวให้นิกเกิลไอออนไปจับเคลือบบนผิวโลหะที่ต้องการชุบ และ นิกเกิลคลอไรด์ ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$) ที่แตกตัวให้นิกเกิลไอออน และคลอไรด์ไอออน โดยที่คลอไรด์ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายน้ำยาชุบทำให้ประสิทธิภาพของการชุบโลหะดีขึ้น ส่วนกรดบอริก (H_3BO_3) ทำหน้าที่ควบคุมค่าพีเอชของสารละลายน้ำยาชุบให้คงที่ และน้ำยาเงาช่วยเคลือบผิวนิกเกิลที่เรียงตัวเป็นชั้นบางบนผิวโลหะที่ต้องการชุบ

2.1.3 สถานการณ์นิกเกิลในประเทศไทย

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตนิกเกิลได้เอง จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแท่ง แผ่น และแถบ ปริมาณการนำเข้าในแต่ละปีมีมูลค่ามากกว่า 300 ล้านบาทและมีแนวโน้มในการนำเข้านิกเกิลเพิ่มขึ้นทุกปี ราคาการซื้อขายภายในประเทศไทยโดยเฉลี่ยประมาณ 220 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับการส่งออกนิกเกิลส่วนมากอยู่ในรูปเศษโลหะ คิดเป็นมูลค่าประมาณ ปีละ 4 ล้านบาท (กรมทรัพยากรธรณี, 2537)

2.2 กระบวนการ Bacterial leaching

Bacterial leaching คือ กระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อละลายโลหะออกจากกากตะกอน โดยการทำให้ตะกอนโลหะที่อยู่ในรูปสารประกอบไม่ละลายน้ำ ซึ่งปกติจะอยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์ (Metal sulfide, MS) มีลักษณะเป็นผลึกที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรดนั้น ละลายตัวออกมาอยู่ในรูปสารประกอบละลายน้ำที่ละลายน้ำได้ ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายโลหะซัลเฟต (Metal sulfate, MSO_4) ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการนี้จะต้องสามารถทนสภาพที่เป็นกรด และทนสภาวะที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักได้

2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Bacterial leaching

เนื่องจากคุณสมบัติของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Bacterial leaching นั้นจะต้องสามารถทนสภาวะที่เป็นกรด และทนสภาวะที่มีความเข้มข้นของโลหะได้ ดังนั้น มักจะพบจุลินทรีย์ดังกล่าวในบริเวณเหมืองแร่ที่มีน้ำท่วมขัง ซึ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Bacterial leaching แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.3.1 Autotrophic Microorganism

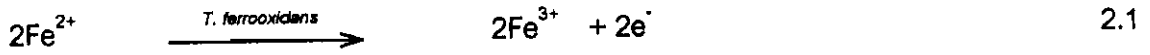
จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ได้พลังงานจากการออกซิไดส์สารประกอบอนินทรีย์ โดยเฉพาะเหล็กเฟอร์ไรต์ ซัลเฟอร์ และ โลหะซัลไฟด์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นแหล่งคาร์บอนและต้องการธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) ควบคู่ไปกับธาตุอาหารรอง ได้แก่ โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^+) แคลเซียม (Ca^+) โซเดียม (Na^+) และ โคบอลต์ (Co^+)

2.3.1.1 *Thiobacillus ferrooxidans*

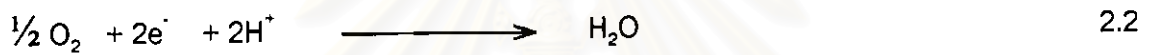
T. ferrooxidans เป็นแบคทีเรียชนิดพืชนีึ่งของจีนัส *Thiobacillus* มีรูปร่างเป็นแท่งขนาดกว้าง 0.5-0.6 ไมครอน และความยาว 1.0-2.0 ไมครอน มักจะดำรงชีพแบบเดี่ยวๆหรือจับกันเป็นคู่ สามารถเคลื่อนที่ได้โดยใช้แฟลกเจลลา 1 เส้น (single flagellated) ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming) ย้อมสีติดแกรมลบ (Hutchins และคณะ, 1986) และมีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 อย่างดังนี้

1. เป็น chemolithotropic bacteria สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์ไรต์ (Fe^{2+}) สารประกอบซัลเฟอร์ (H_2S , S^0 และ $S_2O_3^{2-}$) และโลหะซัลไฟด์ เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ในกระบวนการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำหน้าที่อื่นๆในกระบวนการเมตาบอลิซึม ซึ่งบางสายพันธุ์สามารถเจริญเติบโตบนสารประกอบไฮโดรเจน
2. ต้องการสภาวะ aerobic ในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโต
3. เป็น mesophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้เมื่ออุณหภูมิอยู่ระหว่าง $20-40^{\circ}C$ และสามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์ไรต์ได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ $33^{\circ}C$ โดยที่อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์ไรต์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $33^{\circ}C$
4. เป็น acidophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 1-4.5 และเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเมื่อค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 2-2.3

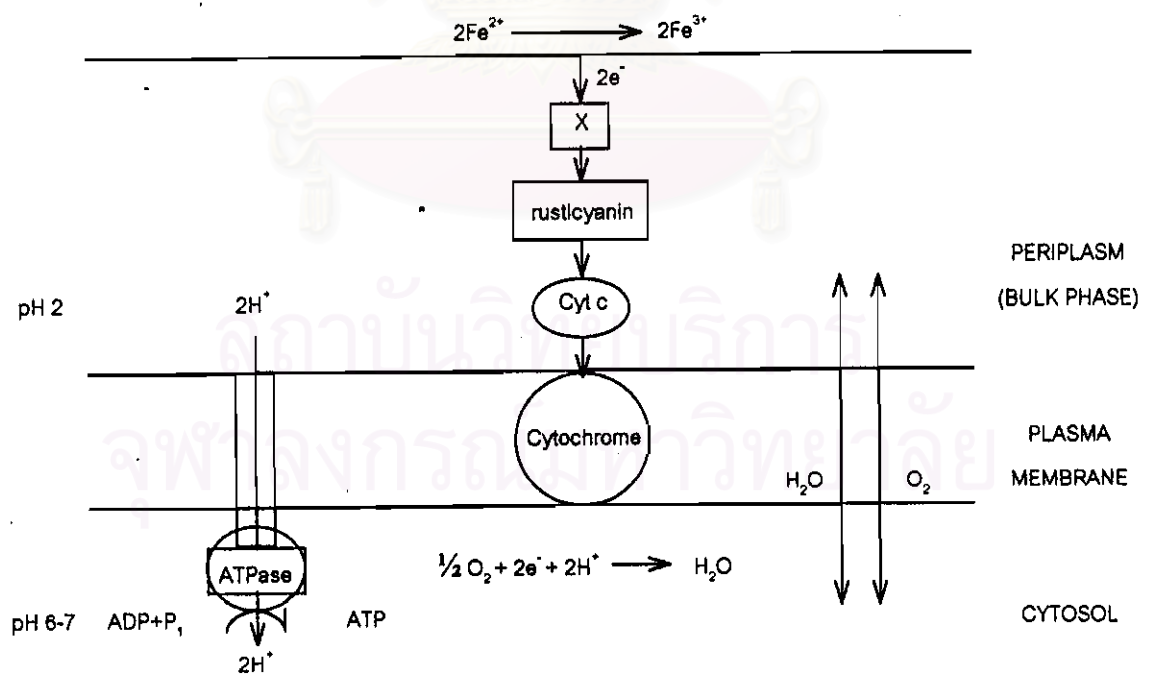
เฟอร์ริตอซอนที่เป็นแหล่งพลังงานของ *T. ferrooxidans* ซึ่งคงตัวอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดจะถูกออกซิไดส์โดยการปล่อยอิเล็กตรอน (Lundgren และ Silver, 1980) ดังสมการที่ 2.1



อิเล็กตรอนที่ถูกดึงจากเฟอร์ริตอซอนจะถูกส่งไปยัง periplasmic cytochrome c โดยการส่งผ่านนี้จะเกี่ยวข้องกับโปรตีนที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ (copper protien) ที่เรียกว่า rusticyanin ซึ่ง cytochrome c ที่ถูกรีดิวส์ จะจับกับผิวของ plasma membrane แล้วส่งอิเล็กตรอนผ่านไปยัง cytochrome oxidase ซึ่งอยู่ด้านผิวในของ plasma membrane จากนั้น cytochrome oxidase ที่ถูกรีดิวส์ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดน้ำ ดังสมการที่ 2.2

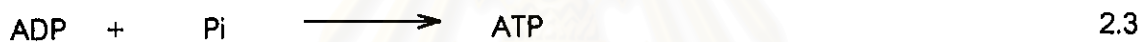


ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของ *T. ferrooxidans* ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นโมเดลแสดงการออกซิไดส์เฟอร์ริตอซอนของ *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย

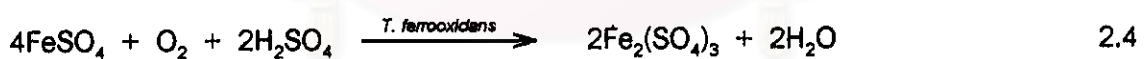


รูปที่ 2.1 การออกซิไดส์เฟอร์ริตอซอนโดย *T. ferrooxidans* (Ehrlich, 1981)

พลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการออกซิเดชันของ *T. ferrooxidans* เกิดจากกลไกการเคลื่อนที่ไปมาของโปรตอนผ่าน plasma membrane ซึ่งการเคลื่อนที่ของโปรตอนเกิดจากความแตกต่างของค่าพีเอชดังนี้ ค่าพีเอชต่ำทำให้ความเข้มข้นของโปรตอนใน acid periplasm สูงกว่าใน cytoplasm ของ *T. ferrooxidans* ซึ่งมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง และเหตุผลอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโปรตอนคือ transmembrane electrical potential ซึ่งการส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจนผ่านระบบการขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport system) เกิดจากการปั๊มโปรตอนจาก cytoplasm เข้าสู่ periplasm ในขณะเดียวกันเกิดการใช้โปรตอนในกระบวนการไฮโดรไลซิสเฟอร์ริกอิออน และเกิดกระบวนการออกซิเดชันเฟอร์รัสอิออน โดยสิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดความแตกต่างของโปรตอนพลังงานควบคู่ เช่น การสังเคราะห์ ATP เกิดจาก plasma membrane ขอมให้โปรตอนผ่านเข้าไปใน periplasm จับกับบริเวณที่ ATPase ยึดเหนี่ยวกับเมมเบรน โดยที่ ATPase ประกอบด้วยช่องซึ่งยอมให้โปรตอนผ่าน (proton channel) ไปยัง cytoplasm ได้โดยตรง และผลจากการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการสังเคราะห์ ATP โดย ATPase ดังแสดงในสมการที่ 2.3

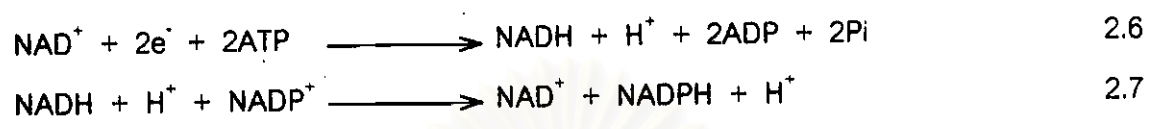


การออกซิไดส์เฟอร์รัสอิออน 2 โมเลกุล จะได้อิเล็กตรอน 1 คู่ โดยการส่งผ่านทางออกซิเจน จะได้พลังงาน 1 ATP โดยที่ปฏิกิริยาทั้งหมดของเหล็กที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ มีดังนี้



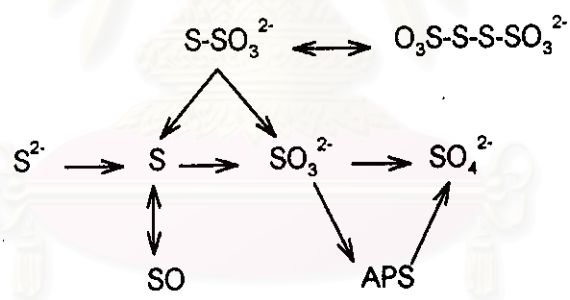
จากกระบวนการออกซิเดชัน ตามสมการที่ 2.4 ได้ผลิตภัณฑ์คือ เฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งจะทำการปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำ ตามสมการที่ 2.5 เกิดเป็น เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริก โดยที่การเกิดปฏิกิริยาทั้งสองชนิดจะต้องรักษาสสมดุลของอิเล็กตรอนและโปรตอนไว้ ทำให้เกิดเป็นสารประกอบคอมเพล็กซ์ระหว่างเฟอร์ริกซัลเฟตและเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ที่เรียกว่า จาโรไซต์ (jarosite) ซึ่งจะเห็นเป็นตะกอนสีเหลืองและสีน้ำตาลแดง

ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพวก autotroph อีก 2 ปฏิกิริยา คือ การเกิดพลังงานรีดิวส์ และการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตพลังงานของเมตาบอลิซึม การเปลี่ยนรูปของ pyridine nucleotides (NADH, NADPH) ทำให้เกิดพลังงานรีดิวส์ เกิดการออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7



โดยที่ปฏิกิริยาการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ *T. ferrooxidans* จะควบคุมไปกับการผลิตพลังงานจากการออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน ปฏิกิริยาหลักทั้งสองจะถูกควบคุมโดยสรีระและความต้องการแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์

สารประกอบซัลเฟอร์ประกอบด้วยสารประกอบที่ละลายน้ำ เช่น S^{2-} , H_2S , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ และ $n(\text{S-S})^{2-}$ และสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ธาตุซัลเฟอร์และโลหะซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการออกซิเดชันในกระบวนการลิซซิ่งโลหะซัลไฟด์โดยทั่วไป



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์โดยแบคทีเรียกลุ่ม Thiobacillus (Lundgren และ Silver, 1980)

จากรูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์โดยแบคทีเรียกลุ่ม Thiobacillus โดยที่การออกซิเดชันซัลเฟอร์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่หนึ่ง ซัลเฟอร์จะเสีย 2 อิเลคตรอนโดยเอนไซม์ sulfide oxidase และเกิด polymerization ของการเกิดซัลเฟอร์อะตอมขึ้น จากนั้นขั้นที่สอง เกิดการออกซิเดชันของ polysulfide สายสั้นไปเป็นสารประกอบ polymeric sulfur โดยที่เอนไซม์ส่วนหนึ่งของ *T. ferrooxidans* ถูกเตรียมไว้สำหรับการออกซิไดส์ซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ

2.3.1.2 *Thiobacillus thiooxidans*

T. thiooxidans เป็นแบคทีเรียอีกชนิดหนึ่งของจำพวก *Thiobacillus* มีรูปร่างเป็นแท่งสั้น ขนาดกว้าง 0.5-0.6 ไมครอน และความยาว 1.0-2.0 ไมครอน มักจะดำรงชีพแบบเดี่ยวๆหรือจับกันเป็นคู่ เหมือนกับ *T. ferrooxidans* และมีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 อย่างดังนี้

1. เป็น chemolithotropic bacteria สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์ และโลหะซัลไฟด์ เพื่อให้ได้พลังงานมาใช้ในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโต
2. ต้องการสภาวะ aerobic ในการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโต
3. เป็น mesophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้เมื่ออุณหภูมิอยู่ระหว่าง 10-37°C โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-30°C
4. เป็น acidophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อค่าพีเอชประมาณ 4 และพีเอชที่สูงกว่า 6 และต่ำกว่า 0.5 จะยับยั้งการเจริญเติบโต

เนื่องจากแบคทีเรีย *T. thiooxidans* มีคุณสมบัติที่แตกต่างจาก *T. ferrooxidans* คือไม่สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์ไรต์ได้ แต่สามารถออกซิไดส์สารประกอบซัลเฟอร์ได้กรดซัลฟิวริก ดังแสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9 จึงทำให้แบคทีเรียชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการ Bacterial leaching



2.3.1.3 *Leptospirillum ferrooxidans*

แบคทีเรียชนิดนี้มีคุณสมบัติที่คล้ายกับ *T. ferrooxidans* ดังนี้ เป็นแบคทีเรียแกรมลบ สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่เป็นกรด และระดับอุณหภูมิปานกลาง ได้พลังงานจากการออกซิไดส์สารประกอบอนินทรีย์ เนื่องจากแบคทีเรีย *L. ferrooxidans* สามารถออกซิไดส์เหล็ก แต่ไม่สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์ได้ ดังนั้นการทำงานร่วมกันของ *L. ferrooxidans* และแบคทีเรียชนิดอื่นที่สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์ได้ ที่เรียกว่า Mixed culture จะทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการ Bacterial leaching สูงขึ้น

2.3.1.4 Moderate thermophilic bacteria

แบคทีเรียกลุ่มนี้มีลักษณะดังนี้ สามารถออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนและซัลเฟอร์ไรด์ และช่วยเร่งปฏิกิริยาการลิวชิ่งของโลหะ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน สามารถออกซิไดส์แร่ไพไรต์ได้ที่อุณหภูมิ 55°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงจึงทำให้น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรม (Hutchins และคณะ, 1986) ซึ่งกลุ่ม Thermophilic thiobacillus bacteria ก็เป็นส่วนหนึ่งของแบคทีเรียกลุ่มนี้ เช่น *Thiobacillus TH1* *Thiobacillus TH2* *Thiobacillus TH3* และ *Thiobacillus thermosulfidoxidans*

2.3.1.5 Extreme thermophilic bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้อยู่ในกลุ่ม sulfobolus มีลักษณะรูปร่างกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.7-1.0 ไมครอน สามารถดำรงชีวิตและเจริญเติบโตที่อุณหภูมิสูงประมาณ 65-80°C จึงมักพบในน้ำพุร้อน ได้พลังงานจากการออกซิไดส์ซัลเฟอร์และบางสายพันธุ์สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้

2.3.2 Heterrotrophic Microorganism

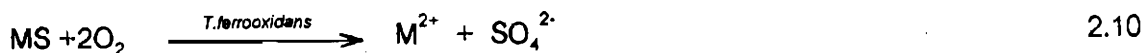
จุลินทรีย์กลุ่มนี้ประกอบไปด้วยแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งได้พลังงานและคาร์บอนจากการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ และผลิตสารลิวชิ่ง (leaching reagent) หรือสารเมตาบอไลต์ (metabolites) ได้แก่ กรดกลูโคนิก กรดแลคติก กรดออกซาลิก กรดอะซิติก และ กรดไกลโคเจน เป็นต้น ซึ่งทำให้พีเอชของสารละลายลดลงนั่นคือปริมาณไฮโดรเจนไอออนสำหรับจับกับโลหะในกระบวนการลิวชิ่งเพิ่มขึ้น (Laheen, 1989)

2.4 กลไกการเกิดกระบวนการ Bacterial leaching

กลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ กลไกโดยตรง (Direct method) และกลไกโดยอ้อม (Indirect method) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 กลไกโดยตรง (Direct method)

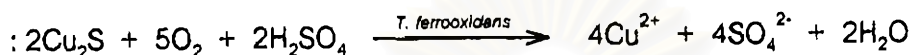
แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะออกซิไดส์โลหะซัลไฟด์ไปเป็นโลหะซัลเฟตได้โดยตรงเมื่อไม่มีเหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วใช้พลังงานจากการถ่ายทอดอิเล็กตรอนนั้นในการเจริญเติบโต ดังสมการ



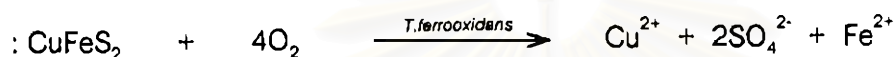
เมื่อ M คือ bivalent metal ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์จะไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจะอยู่ในรูปโลหะซัลเฟตที่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด ซึ่งจะนำสารละลายนี้ไปแยกเอาโลหะออกในขั้นตอนต่อไป

ตัวอย่างปฏิกิริยา

Chalcocite (Johnson, 1989)



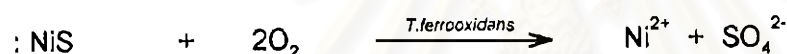
Chalcopyrite (Shrihari และคณะ, 1991)



Covellite (Johnson, 1989)



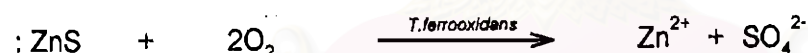
Nickel sulfide (Kai และคณะ, 1995)



Pyrite (Baldi และคณะ, 1992)



Sphalerite (Konishi และคณะ, 1992)



2.4.2 กลไกโดยอ้อม (Indirect method)

แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะออกซิไดส์ เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไปเป็นเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโลหะซัลไฟด์ เกิดเป็นโลหะซัลเฟต ดังสมการต่อไปนี้

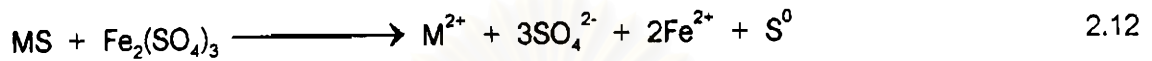
ขั้นตอนที่ 1 แบคทีเรียจะออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสเป็นเฟอร์ริก



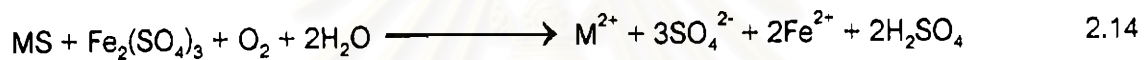
ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นช้ามากเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าปฏิกิริยานี้มีแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้อัตราการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10^6 เท่า

จากการศึกษาของ Leathen และคณะ (1956) พบว่าแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถออกซิไดส์ เหล็กเฟอร์ไรต์ (Fe^{2+}) ปริมาณ 200 มิลลิกรัม/ลิตร ได้หมดภายในระยะเวลา 3 วัน ในขณะที่ปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาเองจะใช้เวลาประมาณ 2 ปี

ขั้นตอนที่ 2 เกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กเฟอร์ริก (Fe^{3+}) กับโลหะซัลไฟด์ ทำให้เกิดการละลายตัวของโลหะไปเป็น โลหะซัลเฟต และ S^0 ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์ต่อไปด้วย O_2



ดังนั้นจะได้ปฏิกิริยารวมในขั้นตอนที่ 2 ดังนี้



เมื่อ M คือ bivalent metal เหล็กเฟอร์ริกที่เกิดขึ้นจากการออกซิไดส์ในขั้นตอนที่ 2 นั้นจะถูกนำไปใช้ในขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

ตัวอย่างปฏิกิริยา

Arsenopyrite (Mandl และคณะ, 1996)



Chalcopyrite (Shrihari และคณะ, 1991)



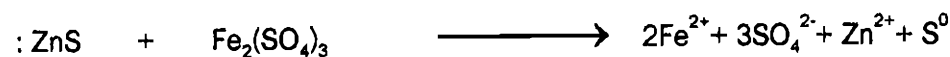
Nickel sulfide (Kai และคณะ, 1995)



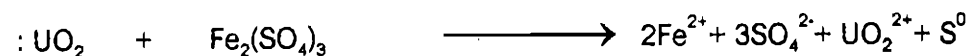
Pyrite (Hoffman และคณะ, 1981)



Sphalerite (Harvey และ Crundwell, 1997)



Uranium (Guay และ Silver, 1977)



2.5 ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการ Bacterial leaching

2.5.1 ชนิดและปริมาณแบคทีเรีย

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Bacterial leaching มีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีความสามารถและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการlixingที่แตกต่างกัน Tyagi และคณะ (1988) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายในระบบไร้ออกซิเจนโดยแบคทีเรียทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า การใช้เชื้อผสมระหว่าง *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* สามารถสร้างกรดได้ดีกว่าการใช้เชื้อเพียงชนิดเดียว ทำให้พีเอชของระบบต่ำกว่า และเกิดการlixingโลหะหนักออกมาได้มากกว่าประมาณ 10%

จากการศึกษาของ Lizama และ Suzuki (1991) พบว่า การสกัดสังกะสีออกจากแร่สฟาเลอไรต์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* *T. thiooxidans* และเชื้อผสมระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพ 36% 8.3% และ 25% ตามลำดับ และการสกัดทองแดงออกจากแร่คาลโคไพไรต์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* *T. thiooxidans* และเชื้อผสมระหว่างแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพ 10% 0.8% และ 10% ตามลำดับ แสดงว่าการสกัดทองแดงเป็นผลมาจากเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เพียงอย่างเดียว

Lawson (1997) ศึกษากระบวนการlixingของค้ำและนิกเกิลออกจากแร่ซัลไฟด์ โดยการใช้เชื้อผสมระหว่าง *T. ferrooxidans* *T. thiooxidans* และ *L. ferrooxidans* พบว่าเชื้อแบคทีเรียที่มีการเจริญเติบโตมากที่สุด คือ เชื้อ *L. ferrooxidans* เพราะมีความสามารถในการใช้สารอาหารได้เร็worงลงมาคือเชื้อ *T. thiooxidans* และถ้าหากมีซัลเฟอร์เข้ามาในระบบหรือระบบมีความเป็นพิษของโลหะหนักสูงมากจนมีผลกระทบต่อเชื้อชนิดอื่น จะทำให้เชื้อ *T. thiooxidans* เป็นเชื้อที่เด่นที่สุดในระบบแทน

นอกจากชนิดของแบคทีเรียที่มีผลต่อการlixingแล้ว ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียก็มีความสำคัญด้วย Battaglia และคณะ (1994) ศึกษาผลการศึกษาการสกัด cobaltiferous pyrite โดยใช้เชื้อผสมระหว่าง *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเซลล์แบคทีเรียเริ่มต้น จะมีผลต่อ kinetic ช่วงแรกคือ log phase ลดลง ทำให้การสกัดในช่วงแรกเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลรวมทั้งหมดของกระบวนการlixingที่เกิดขึ้น พบว่าการเพิ่มปริมาณเซลล์เริ่มต้นไม่มีผลต่อการสกัดโคบอลต์ โดยที่จำนวนแบคทีเรียที่เหมาะสมสำหรับการสกัดโลหะอยู่ระหว่าง 10^5 - 10^6 เซลล์ต่อกรัมของแร่ (พัฒนา, 2536)

2.5.2 พีเอช (pH)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการlixing ส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะกรด เช่น เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อค่าพีเอชประมาณ 1.0-4.5 และสามารถออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนไปเป็นเฟอร์ริกไอออนได้ดีที่สุดเมื่อค่าพีเอชประมาณ 2.0-2.3 (Jensen และ Webb, 1995) แต่เนื่องจากแร่ธาตุทำให้ค่าพีเอชของระบบสูงขึ้นโดยการแลกเปลี่ยนไอออน หรือองค์ประกอบของแร่มีสารประกอบที่ดูดซับกรด เช่น สารประกอบคาร์บอเนต ดังนั้นการควบคุมค่าพีเอชของระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียจึงมีความสำคัญอย่างมาก

Manoz และคณะ (1995) ศึกษาการlixingแร่ยูเรเนียม โดยเชื้อผสมของแบคทีเรียในกลุ่ม *Thiobacillus* พบว่าการปรับค่าพีเอชของการทดลองในอยู่ในช่วง 1.5-3.0 ตลอดการทดลองจะทำให้ประสิทธิภาพการlixingสูงกว่า การทดลองที่ไม่มีการปรับค่าพีเอช โดยที่การปรับค่าพีเอชต่ำกว่าจะได้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า

2.5.3 อุณหภูมิ (Temperature)

Mesophilic bacteria เช่น *T. ferrooxidans* *T. thiooxidans* และ *L. ferrooxidans* สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 40°C แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 40°C จะทำให้แบคทีเรียสูญเสียกิจกรรมของเซลล์ เช่น การออกซิไดส์แหล่งพลังงาน และการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียอยู่ในช่วง 30 ± 3 °C ในขณะที่ Moderate thermophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง 40-60 °C และ Extreme thermophilic bacteria สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 80 °C (Ahonen และ Touvinen , 1992) แสดงว่าอุณหภูมิมิมีผลกระทบต่ออัตราการเกิดกระบวนการlixingโดยแบคทีเรีย

Torma และคณะ (1970) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสกัดแร่สฟาเลอร์ไรต์โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* มีค่าระหว่าง 28-40 °C และกิจกรรมของเซลล์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงมากกว่า 45 °C เมื่อทำการศึกษาในระบบขวดเฉย่า ที่มีปริมาณแร่ 5.3% pulp density และค่าพีเอช 2.5

Ahonen และ Touvinen (1992) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการlixingแร่ซัลไฟด์โดยแบคทีเรียใน air lift column โดยแปรค่าอุณหภูมิต่างกันในช่วง 7-28 °C การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลต่อ kinetic คือช่วง lag phase สั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดเพิ่มขึ้น

Blais และคณะ (1993) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนชุมชนในระบบขวดเฉย่า โดยแปรค่าอุณหภูมิต่างกันในช่วง 7-42 °C พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนักเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิมิมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

Strimekanond และคณะ (1992) ศึกษาการสกัดแร่แมงกานีสไดออกไซด์โดยใช้ thermophilic bacteria โดยแปรค่าอุณหภูมิระหว่าง 4-70 °C พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50 °C จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 °C จะมีประสิทธิภาพต่ำ

2.5.4 ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการlixing นั้นต้องการออกซิเจนเพื่อออกซิไดส์เฟอร์รัสไอออนและซัลเฟอไรให้ได้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต และต้องการก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสร้างเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย ดังแสดงในสมการที่ 2.15



ความเข้มข้นของออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอยู่ในช่วง 0.05 - 60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ถ้าความเข้มข้นต่ำเกินไปจะทำให้แบคทีเรียหยุดการเจริญเติบโต และถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้แบคทีเรียตาย (พัฒนา, 2536)

จากการศึกษาของ Ehrlich และ Fox (1967) พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ *T. ferrooxidans* ที่เจริญบนเฟอร์รัสซัลเฟต มีค่าลดลง 76% เมื่อมีการดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ และอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น 30% เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้แก่ระบบ

Munoz และคณะ (1995) ศึกษาการสกัดแร่ยูเรเนียมที่มีแร่ไพไรต์เป็นองค์ประกอบ ในระบบขูดเชย่า โดยใช้แร่ 5% pulp density ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็ว 150 รอบต่อนาที พบว่า การเติมอากาศที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น 5% ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการlixing ซึ่งแสดงว่า การกวนในระบบขูดเชย่ามีการให้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเพียงพอ

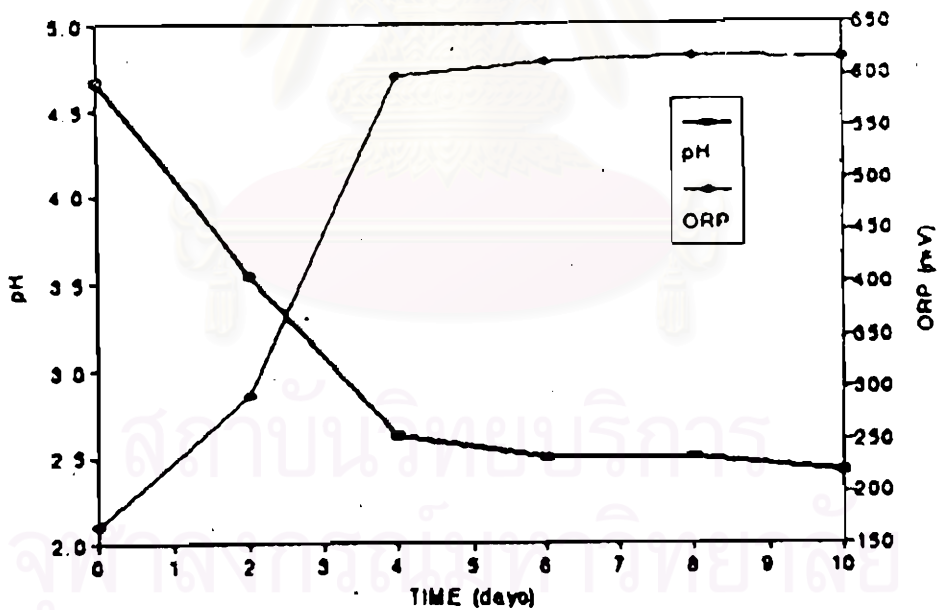
2.5.5 โออาร์พี (Oxidation-Reduction Potential, ORP)

ค่าโออาร์พี เป็นการวัดแนวโน้มว่าธาตุชนิดไหนเป็นผู้ให้หรือรับอิเล็กตรอนและใช้วัดความสามารถในการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน (Lundgren และ Silver, 1980) สำหรับกระบวนการlixing โดย *T. ferrooxidans* ค่าโออาร์พีที่เหมาะสมต้องต่ำกว่า 500 mV. เพื่อป้องกันการตกตะกอนของเฟอร์รัสซัลเฟตในกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบ Indirect method ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงาน of แบคทีเรียลดลง

Lizama และ Suzuki (1991) ศึกษาการสัมผัสมันระหว่างโลหะซัลไฟด์ 2 ชนิด คือ แร่ไพไรต์ (FeS_2) และแร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS_2) พบว่า แร่ไพไรต์ซึ่งมีค่าไออาร์พีสูงกว่าทำหน้าที่เป็น cathode และแร่คาลโคไพไรต์ซึ่งมีค่าไออาร์พีต่ำกว่าทำหน้าที่เป็น anode

Natarajan (1992) ศึกษาผลของการใช้ไฟฟ้ากระแสตรงต่อการสกัดสังกะสีออกจากแร่สฟาเลอไรต์ แร่ไพไรต์ และแร่คาลโคไพไรต์ โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่า แร่แต่ละชนิดมีพฤติกรรมในการละลายแตกต่างกัน โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการละลายแร่แต่ละชนิดคือ -500 +600 และ +400 mV. ตามลำดับ นอกจากนี้การ applied potential ที่ 500 mV. จะทำให้เกิด electrochemical reduction ของเฟอร์ริกไอออน ซึ่งช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. ferrooxidans* และเพิ่มประสิทธิภาพการลิกซ์ซิง

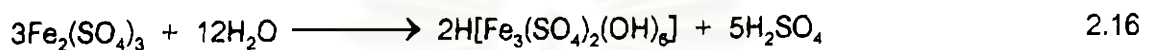
จากการศึกษาของ Zagury และคณะ (1994) พบว่าการใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในกระบวนการลิกซ์ซิง ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงจนกระทั่งมีค่าพีเอชประมาณ 2.5 ซึ่งเป็นสภาวะกรดที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. ferrooxidans* ในขณะที่ค่าไออาร์พีของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งคงที่ประมาณ 600-650 mV. ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าไออาร์พีในกระบวนการลิกซ์ซิงโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* (Zagury และคณะ, 1994)

2.5.6 ปริมาณเฟอร์ริธอออน และเฟอริกฮอออน

ความเข้มข้นของเฟอร์ริธอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อกระบวนการลิวซิงแบบ Indirect method เนื่องจากแบคทีเรียจะออกซิไดส์เฟอร์ริธอออนไปเป็นเฟอริกฮอออน ดังนั้น ปริมาณเฟอร์ริธอออนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อแบคทีเรียมีกิจกรรมเพิ่มขึ้น จะทำให้มีปริมาณเหล็กเฟอริกฮอออนมากเกินไป และอาจเกิดเป็นสารประกอบคอมเพล็กซ์ ซึ่งตกตะกอนอยู่ในรูปสารประกอบจาโรไซด์ ดังสมการที่ 2.16 และจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียลดลง (Curutchet และคณะ, 1992)



จากการศึกษาของ Kino และคณะ (1981) พบว่า มีการตกตะกอนของเกลือเฟอริกเนื่อง จากสารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้นทำให้เกิดการตกตะกอนของเกลือเฟอริกเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดง ผลตามตารางที่ 2.2

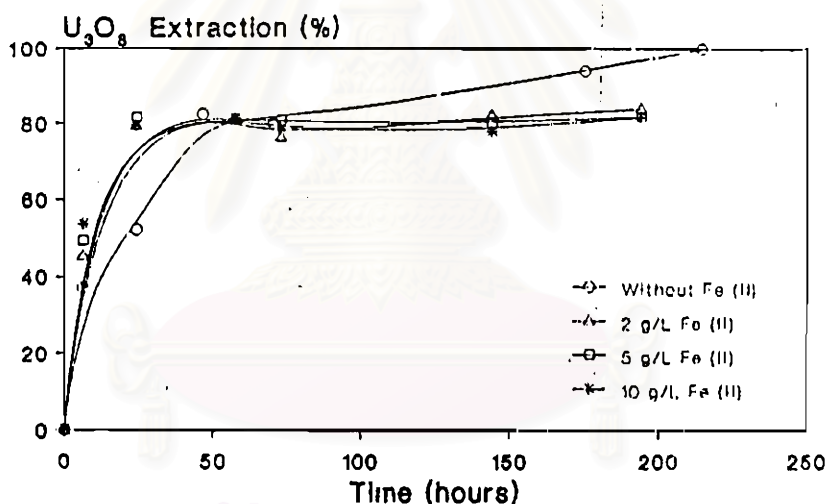
ตารางที่ 2.2 ค่าพีเอชและการตกตะกอนของเกลือเฟอริก ในกระบวนการลิวซิงโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* WU-66 B (Kino และคณะ, 1981)

ทำการปรับ พีเอช	พีเอช เริ่มต้น	พีเอช สุดท้าย	การตกตะกอนของอาหาร เลี้ยงเชื้อ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	ร้อยละการตกตะกอน สัมพัทธ์ (%)
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

Byner และ Anderson (1957) ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฟอร์ริธอออนต่อการสกัดแร่ ซัลไฟด์ โดยแปรค่าความเข้มข้นของเฟอร์ริธอออนในช่วง 0-6 กรัม/ลิตร พบว่าความเข้มข้นของ เฟอร์ริธอออนที่เหมาะสมสำหรับการลิวซิงโมลิบดีนัมออกจากแร่ซัลไฟด์ คือ 4 กรัม/ลิตร

Couillard และ Chartier (1993) ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฟอร์ริสอออนต่อกระบวนการลิกซิงซึ่งตะกั่วออกจากตะกอนในลำน้ำโดยใช้ *T. ferrooxidans* โดยการแปรความเข้มข้นของเฟอร์ริสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ดังนี้ 5 10 20 และ 30% พบว่า ความเข้มข้นของเฟอร์ริสซัลเฟต 30% ทำให้ประสิทธิภาพการสกัดตะกั่วลดลง

Munoz และคณะ (1995) ศึกษาผลของความเข้มข้นของเฟอร์ริสอออนต่อการสกัดแร่ยูเรเนียมซึ่งมีแร่ไพไรต์เจือปน พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์ริสอออนในสารละลายในช่วง 0-10 กรัม/ลิตร จะทำให้การสกัดแร่ยูเรเนียมใน 50 ชั่วโมงแรกเพิ่มขึ้น แต่ในที่สุดการเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์ริสอออนก็ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแร่ยูเรเนียม ซึ่งอธิบายได้ว่าเฟอร์ริสอออนช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่เมื่อกิจกรรมของแบคทีเรียเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณเหล็กเฟอร์ริกมากเกินไปจนกระทั่งตกตะกอนในรูปของจาโรไซต์ ซึ่งขัดขวางไม่ให้สารละลายลิกซิงสัมผัสกับแร่

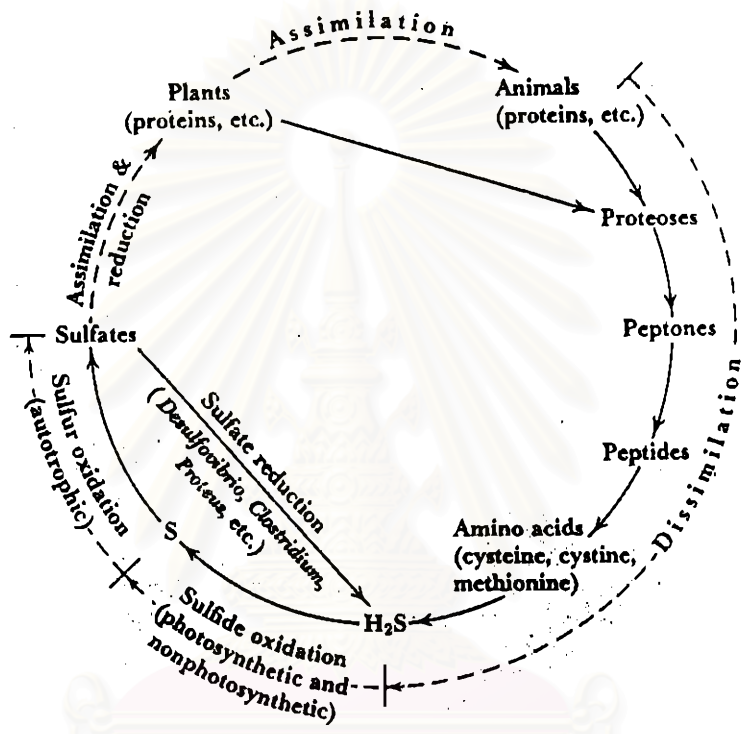


รูปที่ 2.4 ผลของความเข้มข้นของเฟอร์ริสอออนในการสกัดแร่ยูเรเนียมโดยใช้แบคทีเรียที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และ 5% pulp density (Munoz และคณะ, 1995)

Lizama และคณะ (1997) ศึกษาการลิกซิงทองแดงออกจากแร่คาลโคไซด์โดยใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* พบว่า เชื้อ *T. ferrooxidans* ซึ่งเจริญอยู่บนอนุภาคเหล็กเฟอร์ริก สามารถลิกซิงทองแดงได้เร็วกว่า การถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริก 5.3 กรัม/ลิตร กับแร่ โดยที่ความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์ริกมากกว่า 5.3 กรัม/ลิตร จะมีผลยับยั้งการลิกซิงทองแดงโดยแบคทีเรีย

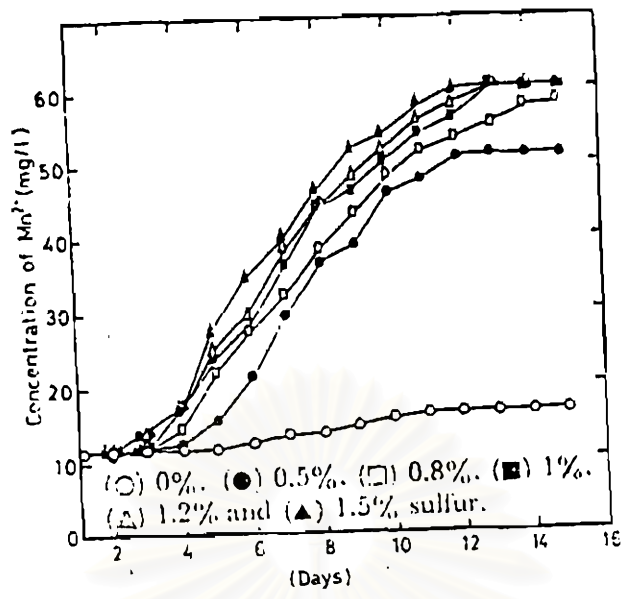
2.5.7 ปริมาณซัลเฟอร์

ธาตุซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปซัลเฟต เมื่อพิจารณาวัฏจักรซัลเฟอร์ พบว่ามีแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดส์ธาตุซัลเฟอร์ไปเป็นซัลเฟตได้อย่างรวดเร็วในสภาวะ aerobic จากนั้นซัลเฟตจะถูกรีดิวส์เพื่อรวมเข้าไปในสารประกอบอินทรีย์ แต่ถ้าเกิดสภาวะ anaerobic จะมีแบคทีเรียอีกประเภทหนึ่งซึ่งสามารถรีดิวส์ซัลเฟตเกิดเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วัฏจักรซัลเฟอร์ในธรรมชาติ (Carpenter, 1967)

ซัลเฟอร์มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ซึ่งโดยแบคทีเรียแบบ Direct method เนื่องจากการออกซิไดส์ซัลเฟอร์เพื่อให้ได้ซัลเฟตไปจับกับไอออนของโลหะเกิดเป็นโลหะซัลเฟต นอกจากนี้ซัลเฟอร์ยังมีบทบาทในกระบวนการแบบ Indirect method อีกด้วย จากการศึกษาของ Ghosh และ Imai (1985) พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดแมงกานีสออกจากแมงกานีสไดออกไซด์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเฟอร์ริกซัลเฟต (Fe(SO₄)₃) ในสารอาหาร 9K medium ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของแมงกานีสที่สกัดได้ เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ต่างๆกัน (Ghosh และ Imai, 1985)

2.5.8 สารอาหาร

แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการลิซซิงเป็น chemoautotrophic bacteria ต้องการสารอาหารประเภทสารอนินทรีย์ที่ประกอบไปด้วย ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโปแตสเซียม (K) และธาตุอาหารรอง ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg⁺) แคลเซียม (Ca⁺) โซเดียม (Na⁺) และโคบอลต์ (Co⁺) ซึ่งมีแอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญที่สุด ฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่ใช้ในขั้นตอนแรกของกระบวนการผลิตพลังงาน และแมกนีเซียมจำเป็นสำหรับปฏิกิริยาการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Torma และคณะ (1970) พบว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนียมซัลเฟตและโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เหมาะสม สำหรับสารอาหารที่ใช้ในกระบวนการลิซซิงโดย *T. ferrooxidans* คือ 3 และ 0.5 กรัม/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ Battaglia และคณะ (1994) พบว่า การขาดแอมโมเนียมความเข้มข้นของแมกนีเซียมต่ำกว่า 0.05 กรัม/ลิตร และความเข้มข้นของโปแตสเซียมต่ำกว่า 0.3 กรัม/ลิตร จะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

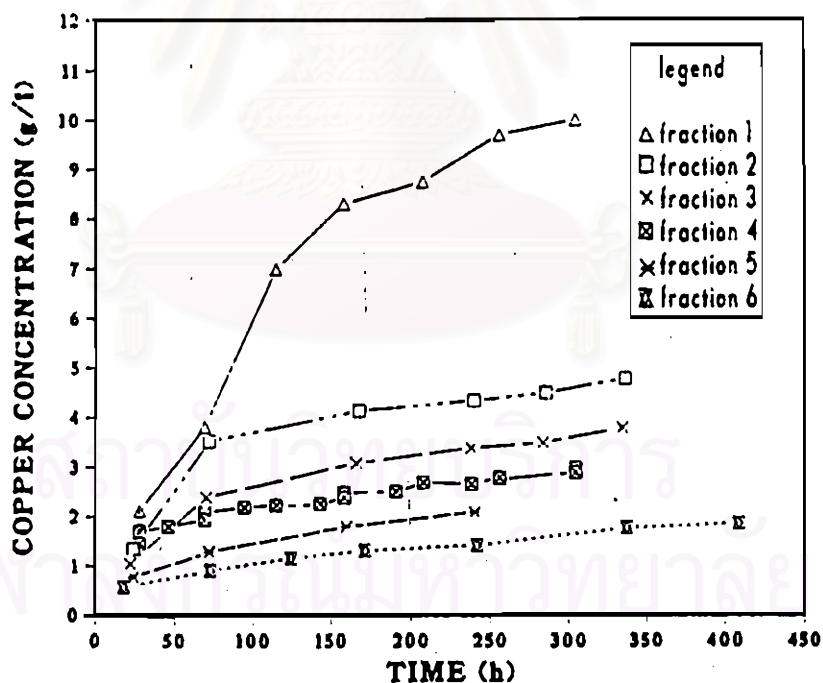
Niemela และคณะ (1994) ศึกษาผลกระทบจากปริมาณฟอสฟอรัสและไนโตรเจนที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียมและไนเตรท พบว่า เหล็กที่ละลายออกจากแร่ไพไรต์เกิดจากปฏิกิริยาเคมีเป็นหลัก ในขณะที่มีการเกิดออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออนโดยแบคทีเรีย ปริมาณฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อการเพิ่ม

อัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กเฟอร์ไรต์ เนื่องจากมีฟอสเฟตที่ละลายออกจากแร่อยู่แล้ว ปริมาณแอมโมเนียที่เหมาะสมคือ 6 มิลลิโมลาร์ จะเพิ่มอัตราการออกซิเดชันของเหล็กเฟอร์ไรต์ แต่ ถ้าเติมไนเตรท 6 มิลลิโมลาร์ จะเกิดผลตรงกันข้ามคือ จะลดอัตราการออกซิเดชันของเหล็กเฟอร์ไรต์

2.5.9 ขนาดอนุภาค และ พื้นที่ผิวสัมผัส

สำหรับการลิขชิงในระบบขวดเขย่า อัตราการลิขชิงจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสและขนาดอนุภาคของแร่ ดังนั้น อนุภาคขนาดเล็ก จะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงสามารถสกัดโลหะหนักได้มากขึ้นในขณะที่มวลทั้งหมดของอนุภาคแร่เท่าเดิม แต่สำหรับการลิขชิงในคอลัมน์ ถ้าขนาดอนุภาคเล็กเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของทางเดินของสารละลายสำหรับการลิขชิง เกิดการไหลเขาะเป็นร่อง และปัญหาการถ่ายเทอากาศในระบบ (ทองบรอนซ์, 2540)

Zurita และ Branion (1986) พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากกากตะกอนที่มีอนุภาคขนาดเล็ก จะมีประสิทธิภาพดีกว่า ดังแสดงผลในรูปที่ 2.7 เมื่อขนาดอนุภาคที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.20 2.68 2.76 3.53 5.98 และ 6.45 ไมโครเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 ความเข้มข้นของทองแดงที่ถูกสกัด เมื่อขนาดของอนุภาคกากตะกอนต่างกัน (Zurita และ Branion, 1986)

จากการศึกษาในระบบขวดเขย่าของ Bryner และ Anderson (1957) ศึกษาการสกัดโมลิบดีนัมออกจากแร่ซัลไฟด์ที่มีขนาด 10-30 30-60 และเล็กกว่า 60 mesh พบว่า แร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 60 mesh ถูกสกัดโมลิบดีนัมออกมาได้มากที่สุด และแร่ขนาด 10-30 mesh ถูกสกัดโมลิบดีนัมออกมาได้น้อยที่สุด

2.5.10 ความเป็นพิษของโลหะ

โลหะที่ถูกสกัดออกมาจากแร่ มีความเป็นพิษต่อการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย โดยเฉพาะระบบที่มีการรีไซเคิลสารละลายสำหรับการลิขซึ่ง อาจทำให้ความเข้มข้นของโลหะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเป็นพิษร้ายแรง แต่เนื่องจาก acidophilic bacteria มี potential uptake site บริเวณผนังเซลล์ ทำหน้าที่ป้องกันการเข้าสู่เซลล์ จึงมีแนวโน้มที่จะทนความเข้มข้นสูงๆของโลหะบางชนิดได้ เช่น เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* สามารถทนต่อความเข้มข้นของโคบอลต์ได้ถึง 15 กรัม/ลิตร (Battaglia และคณะ, 1994) นอกจากนี้ เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถทนต่อความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆได้ตามตารางที่ 2.4 แต่อย่างไรก็ตามสามารถปรับปรุงสภาพพันธุ์ของแบคทีเรียให้มีความทนทานต่อสภาวะที่มีโลหะหนักความเข้มข้นสูงได้ โดยการเพาะเลี้ยงเชื้อในสารอาหารที่มีโลหะหนัก และเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักทีละน้อย (Kai และคณะ, 1995)

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่ยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* (Runsia และคณะ, 1995)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)
Ag ⁺	> 6.4	Mn ²⁺	1,200
As ⁺	640	Zn ²⁺	4,800
Cd ²⁺	30.4	Al ³⁺	34,800
Hg ²⁺	4.6	Cr ³⁺	32
Mg ²⁺	12,000	Mo ⁶⁺	50

2.6 ผลการศึกษาที่ผ่านมา

Sakaguchi และ Silver (1976) ศึกษา สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดทองแดงออกจากแร่คาลโดไฟไรต์โดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่าที่ค่าพีเอช 2.3 อุณหภูมิ 35°C และปริมาณแร่ 22% pulp density เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถสกัดทองแดงได้ 80%

Wong และ Henry (1984) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้แบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ ซึ่งในกากตะกอนมีโลหะหนัก แคดเมียม ทองแดง เหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว และ สังกะสี เจือปนอยู่ 145 1,830 31,150 510 750 และ 7,660 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมกากตะกอน ตามลำดับ พบว่า การสกัดที่สภาวะกรดค่าพีเอช 2 อุณหภูมิ 25°C และมีการเติมอากาศ 100 ลบ.ซม.อากาศ/ลิตร/นาทึ จะได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

Lizama และ Suzuki (1988) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากแร่ซัลไฟด์ซึ่งประกอบไปด้วย pyrite chalcopyrite sphalerite pyrrhotite calcite และ diorite โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* จากการทดลองพบว่า การใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถทำการสกัดเหล็กได้ 10-22% สกัดสังกะสีได้ 68-76% และสกัดทองแดงได้ 7-10% ภายใน 18 วัน ส่วนการใช้เชื้อ *T. thiooxidans* ภายใน 14 วันสามารถสกัดโลหะหนักได้น้อยกว่า

Lizama และ Suzuki (1989) ศึกษาการลิกซ์ซึ่งแร่คุณภาพต่ำในคอลัมน์ โดยเชื้อผลมระหว่างแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ในสารอาหารที่มีปริมาณฟอสเฟตต่ำ พบว่าการทดลองภายใน 30 วัน มีประสิทธิภาพการลิกซ์ซิง ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 5.57% และ 7.93% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการลิกซ์ซิงสูงกว่าการใช้เชื้อแบคทีเรียเพียงชนิดเดียว

Couillard และ Mercier (1990) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนของน้ำเสียชุมชนโดยใช้แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (CSTR) และในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องซึ่งมีการเวียนสลับ 50% (CSTRWR) โดยควบคุมค่า พีเอชเท่ากับ 4 พบว่าแบคทีเรียจะทำงานได้ดีที่สุดเมื่อมีการเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 3 กรัม/ลิตร และมีเวลาเก็บกักเซลล์ 3 วัน ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการรีดซิงค์โลหะหนักโดยใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* ในระบบ CSTR และ CSTRWR (Couillard และ Mercier, 1990)

ความเข้มข้น FeSO ₄ ·7H ₂ O (กรัม/ลิตร)	เวลาเก็บ กักเซลล์ (วัน)	% การสกัดโลหะหนัก							
		นิกเกิล		แคดเมียม		ทองแดง		สังกะสี	
		CSTR	CSTRWR	CSTR	CSTRWR	CSTR	CSTRWR	CSTR	CSTRWR
1	1	28.7	23.8	83.3	85.0	-	-	-	-
1	2	28.6	21.5	76.9	76.9	-	-	-	-
1	3	82.4	83.0	66.7	66.7	-	-	-	-
1	4	38.3	39.1	100	-	-	-	-	-
3	3	94.8	93.0	64.6	66.7	62.6	50.1	77.4	64.1

หมายเหตุ (-) หมายถึง ไม่มีผลการทดลอง

Cwalina และคณะ (1990) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสกัดทองแดงออกจากแร่โคเวลไลต์ (CuS) และแร่คาลโคไพไรต์ (CuFeS₂) โดยการใช่และไม่ใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าแบคทีเรียช่วยส่งเสริมการสกัดทองแดงออกจากแร่โคเวลไลต์และแร่คาลโคไพไรต์ได้ประมาณ 100 และ 400% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรสกัดโดยไม่ใช้แบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2.5

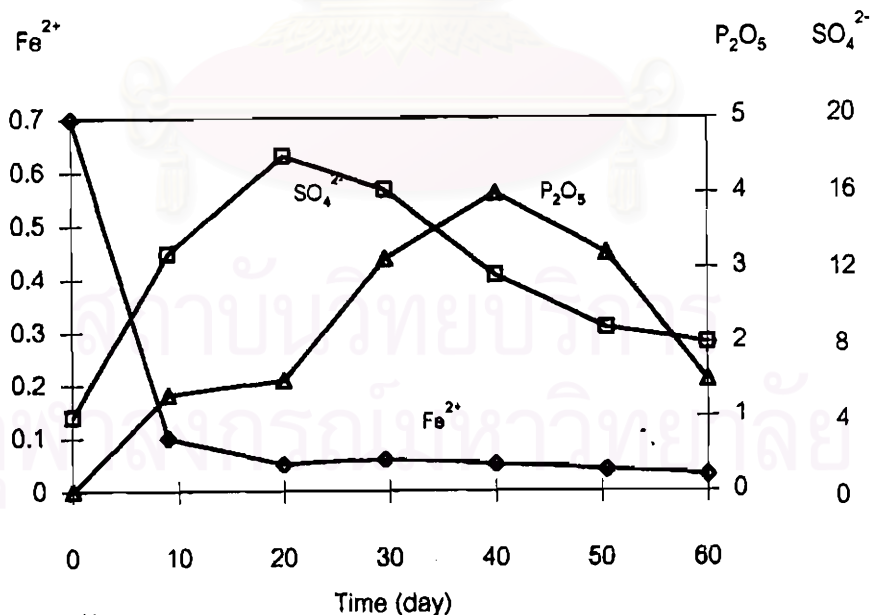
ตารางที่ 2.5 การสกัดทองแดงออกจากแร่โคเวลไลต์และแร่คาลโคไพไรต์ โดยใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* (Cwalina และคณะ, 1990)

ชนิดแร่	ตัวแปรที่ศึกษา	แบคทีเรีย	ระยะเวลาสำหรับการสกัด (วัน)			
			5	10	15	20
CuS	ปริมาณทองแดงละลายสะสม (กรัม/ลิตร)	ใช่	11.2	16.0	18.7	20.6
		ไม่ใช่	5.1	8.3	10.1	11.2
	อัตราการสกัดทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร-ชั่วโมง)	ใช่	93.3	40.0	23.8	15.8
		ไม่ใช่	43.3	25.0	15.0	10.0
CuFeS ₂	ปริมาณทองแดงละลายสะสม (กรัม/ลิตร)	ใช่	5.4	8.8	9.6	10.3
		ไม่ใช่	1.6	2.3	2.4	2.5
	อัตราการสกัดทองแดง (มิลลิกรัม/ลิตร-ชั่วโมง)	ใช่	45.0	28.3	6.7	5.8
		ไม่ใช่	13.3	5.8	1.7	1.7

Couillard และคณะ (1991) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่มีการย่อยสลายในสภาวะ aerobic โดยใช้แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เติบโตในถังปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุกากตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แล้ว และถังปฏิกรณ์ซึ่งบรรจุกากตะกอนที่ยังคงเกิดการย่อยสลายอยู่ จะทำให้โลหะหนักละลายออกมาสูงสุดในวันที่ 10 และวันที่ 1 หลังจากเติมแบคทีเรีย ตามลำดับ เมื่อการทดลองนี้ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 4 และมีการเติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 3 กรัม/ลิตร เป็นแหล่งพลังงาน

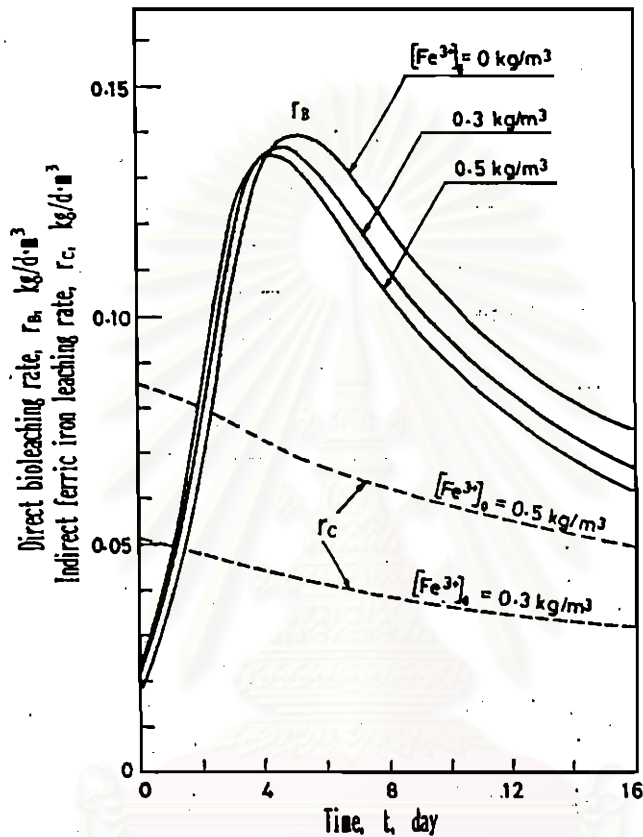
Costa และคณะ (1992) ศึกษาประสิทธิภาพของการlixing Phosphate rock โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ในการทดลองนี้มีการควบคุมตัวแปรอิสระ 3 อย่าง คือ ปริมาณ Pyritiferous ปริมาณ Phosphate rock และชนิดของสารอาหาร ซึ่งผลการทดลองพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของ Fe^{2+} ลดลงเนื่องจากถูกแบคทีเรียนำไปใช้ ส่วนความเข้มข้นของ SO_4^{2-} เพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นผลผลิตของปฏิกิริยา และความเข้มข้นของ P_2O_5 เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการ Bacterial leaching ดังแสดงในรูปที่ 2.8

นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการละลาย P_2O_5 เมื่อใช้สารอาหาร 9K medium และเมื่อใช้แอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 3 กรัม/ลิตร มีค่าในช่วง 12%-100% และ 12%-89% ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ปริมาณ Fe^{2+} P_2O_5 และ SO_4^{2-} (กรัม/ลิตร) เมื่อ Pyritiferous : Phosphate rock เท่ากับ 1:1 (Costa และคณะ , 1992)

Konishi และคณะ (1992) ศึกษาและเปรียบเทียบ อัตราเร็วของปฏิกิริยาการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซัลไฟด์ ในกระบวนการlixingซึ่งโดยปกติที่เรีย ทั้งกลไกแบบ Direct method และ Indirect method โดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการสกัดสังกะสีเมื่อเกิดปฏิกิริยาแบบ Direct method และ Indirect method (Konishi และคณะ , 1992)

Mustin และคณะ (1992) ศึกษาลักษณะความพรุนในแร่ไพไรต์ ที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่าเมื่อทำการทดลอง 60 วัน แบคทีเรียจะสามารถกัดกร่อน แร่ไพไรต์ได้ 57% ของปริมาตรเริ่มต้น และ เพิ่มความพรุนภายในขนาด 2 ไมโครเมตร ได้ 34% ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น 42%

บริบูรณ์ (2537) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากตะกอนซัลไฟด์ โดยการใช้แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในถังปฏิกริยาขนาด 15 ลิตร ที่เวลาเก็บกักและความเข้มข้นของเฟอร์รัสซัลเฟต ต่างๆกัน ตะกอนโลหะซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ CuS NiS และ ZnS ซึ่งถูกทำให้เข้มข้น 200 และ 400 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักจะดีที่สุด เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 4 วัน และประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่างกัน แสดงผลตามตารางที่ 2.6 เมื่อค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2.3-2.5

ตารางที่ 2.6 ประสิทธิภาพการสกัดโลหะหนักในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน (บริบูรณ์, 2537)

ความเข้มข้นโลหะซัลไฟด์ (มิลลิกรัม/ลิตร)	FeSO ₄ ·7H ₂ O (กรัม/ลิตร)	% การสกัดโลหะหนัก		
		ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
200	1	100	100	55
400	1	86.58	80.10	65.94
400	0.5	81.70	65.48	54.19

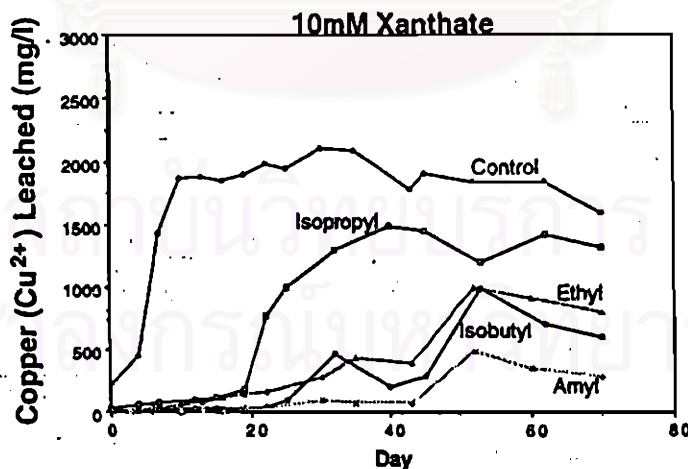
Pistaccio และคณะ (1994) ศึกษาการสกัดโมลิบดีนัมโดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่า ประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติม tensioactive agent tween 80 สามารถสกัดโมลิบดีนัมได้ 16 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ 27 วัน เมื่อเติม tween 80 ปริมาณ 5 มิลลิลิตร/ลิตร ในสภาวะที่ไม่มีเหล็ก เฟอร์รัสเป็นแหล่งพลังงานจะเกิดกระบวนการแบบ direct method

Zagury และคณะ (1994) ศึกษาการปรับปรุงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เพื่อใช้ใน กระบวนการสกัดโลหะหนักออกจากดินที่ปนเปื้อน โดยทำการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียในสภาวะที่มี ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และอุณหภูมิ $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ กระทำซ้ำๆจนกระทั่งค่าโออาร์ทีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 500-600 mV. และค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงจนต่ำกว่า 2.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ ลิขซึ่งโดยแบคทีเรีย เมื่อนำแบคทีเรียที่ได้รับการปรับปรุงพันธุ์แล้ว ไปใช้สกัดโลหะหนักออกจาก ดินที่ปนเปื้อน ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด พบว่าสามารถสกัด Zn $57 \pm 32\%$ Mn $57 \pm 28\%$ และ Cu $49 \pm 13\%$

สุวิสา (2538) ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดสังกะสีออกจากสังกะสีซัลไฟด์ โดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการไลโอไฟไลซ์ ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท ขนาด 15 ลิตร จากการทดลองพบว่า การไลโอไฟไลซ์สามารถเก็บเชื้อไว้ได้อย่างน้อย 16 เดือน ที่อุณหภูมิ 0 หรือ 4°C โดยใช้ Skin milk medium หรือ Sucrose medium นอกจากนี้ยัง พบว่า ค่าพีเอช 1.5-2 เป็นช่วงที่เหมาะสม ปริมาณแร่ที่เหมาะสม คือ 10.6 กรัมต่อสารละลาย 15 ลิตร แบคทีเรียสามารถสกัดสังกะสีได้ 24.2% ของปริมาณสังกะสีในแร่ และการใช้แบคทีเรียที่ผ่านหรือไม่ผ่านการไลโอไฟไลซ์นั้นได้ประสิทธิภาพการสกัดสังกะสีใกล้เคียงกัน

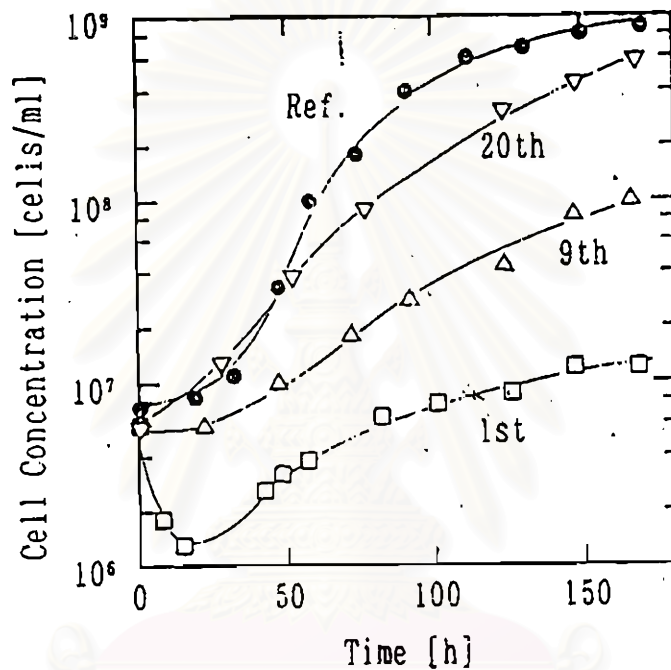
Konishi และคณะ (1995) ศึกษาการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. thiooxidans* ที่เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคซัลเฟอร์ ในถังปฏิกรณ์ที่ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิ 30°C พบว่าเชื้อ *T. thiooxidans* สามารถเจริญได้ประมาณ 10^5 - 10^8 เซลล์/มิลลิลิตร โดยที่สามารถเกาะติดผิวอนุภาคซัลเฟอร์ได้ 4.57×10^7 เซลล์/กรัมซัลเฟอร์

Loon และ Madgwick (1995) ทำการศึกษาผลกระทบจากการเติม Xanthate floatation reagents ลงไปในกระบวนการสกัดทองแดงออกจากแร่คาลโคไพไรต์โดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่าเมื่อมีการเติม 10 มิลลิโมลาร์ ของ isopropyl isobutyl ethyl และ amyl จะทำให้ปริมาณทองแดงที่ละลายออกมาลดลง 30% 53% 53% และ 77% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปริมาณทองแดงที่ละลายออกมาเมื่อมีการเติม Xanthate floatation reagents (Loon และ Madgwick, 1995)

Kai และคณะ (1995) เนื่องจากแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สายพันธุ์ดั้งเดิมนั้นสามารถเจริญเติบโตได้บนสารตัวกลางที่มีเหล็กเฟอร์ไรต์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาศึกษาเพื่อปรับปรุงสายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรียให้มีความเคยชินกับความเข้มข้นของโลหะหนักนิกเกิล เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสกัดนิกเกิลออกจากนิกเกิลซัลไฟด์ โดยการเพาะเลี้ยงเชื้อในสารตัวกลางที่มีนิกเกิลเจือปนอยู่ แล้วกระทำอย่างนี้ซ้ำๆ เพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิลอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ในสารตัวกลางที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ปริมาณเซลล์แบคทีเรียในการปรับปรุงสายพันธุ์ (Kai และคณะ, 1995)

Canfell และคณะ (1997) ศึกษาการใช้เชื้อผสมของแบคทีเรียกลุ่ม *Thiobacillus* เพื่อสกัดทองแดงออกจากแร่คาลโคไพไรต์ในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร และมีความสูง 2.0 เมตร ซึ่งบรรจุแร่ขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร พบว่า การเติมโลหะเงิน 200 มิลลิกรัม ลงในแร่ จะเพิ่มประสิทธิภาพการลิกซ์ซิงได้ จากการลิกซ์ซิงภายใน 160 วัน มีสามารถสกัดทองแดงได้ 66% เมื่อใช้อัตราการไหล 10 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 32°C