

บทที่ 2

ตรวจสอบเอกสาร

1. นิกเกิล (Nickel)

1.1 คุณสมบัติของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะสีขาวเงิน เหนียวและแข็งกว่าเหล็ก มีความคล้ายคลึงกับเหล็กด้านความต้านแรงและความเหนียว คล้ายคลึงกับทองแดงในด้านการต้านการเกิดออกไซด์ (oxide) และทนการกัดกร่อน ทนสารเคมีต่างๆ รวมทั้งด่าง ไม่เกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิห้องและเมื่อเผาถึง 700 - 800 องศาเซลเซียส สมบัติทางฟิสิกส์บางประการของนิกเกิลแสดงดังต่อไปนี้ (มันส์ สติริจินดา, 2538)

น้ำหนักอะตอม	58.69	
โครงสร้างระบบผลึก	face centered cubic	($a = 3.516 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (25 องศาเซลเซียส)	8.89	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อุณหภูมิหลอมเหลว	1435- 1445	องศาเซลเซียส
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2730	องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (27- 100 องศาเซลเซียส)	0.130	แคลลอรี่ต่อกรัมองศาเซลเซียส
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	73.8	แคลลอรี่ต่อกรัม
สัมประสิทธิ์การขยาย (27- 100 องศาเซลเซียส)	13×10^{-6}	ต่อองศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (20 องศาเซลเซียส)	9.5	ไมโครโอห์มเซนติเมตร
ส.ป.ส.ตัวนำความร้อน (27- 100 องศาเซลเซียส)	0.145	แคลลอรี่คูลอมป์ต่อตารางเซนติเมตร

1.2 ประโยชน์ของนิกเกิล

การใช้ประโยชน์จากนิกเกิล มีได้ขึ้นกับกิจการหนึ่งกิจการใด แต่จะจัดกระจายไปในกิจการต่างๆ ได้แก่

อุตสาหกรรมสารเคมีและกลั่นน้ำมัน

เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้นิกเกิลในรูปของโลหะเจือในชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่สัมผัสกับสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าเจือ และเหล็กกล้าทนความร้อน โลหะนิกเกิลเจือที่ผ่านการแปรรูปหรือหล่อ มีนิกเกิล 95 - 99 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นภาชนะในการผลิตโซดาไฟเข้มข้น โลหะทองแดงเจือนิกเกิล และโลหะนิกเกิลเจือทองแดง ใช้ทำมาตรน้ำ ประตุน้ำ ท่อในอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อน วัสดุกรองซึ่งทนการกัดกร่อนจากน้ำเกลือ

เครื่องบินและยานอวกาศ

โลหะนิกเกิลที่ใช้กับเครื่องบินและยานอวกาศ อยู่ในรูปโลหะเจือพิเศษ ซึ่งต้านความเค้น และทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โลหะเจือพิเศษเกือบทั้งหมดมีนิกเกิลหรือมีนิกเกิลเป็นโลหะหลัก โลหะเจือพิเศษที่อยู่ในเครื่องบินส่วนใหญ่อยู่ในอุปกรณ์รักษาระดับความดันอากาศที่ดูดเข้าเครื่องยนต์ในระดับสูง และเครื่องยนต์ไอพ่น นอกจากนี้การใช้นิกเกิลยังอยู่ในรูปการเคลือบผิวชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่างๆ ในเครื่องบิน

นอกจากนี้นิกเกิลยังเป็นองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งใช้ในเครื่องบินและในยานอวกาศในส่วนที่ใช้อุณหภูมิสูง ภาชนะเก็บความดัน และท่อของเหลว ส่วนยึด และระบบกลไกต่างๆ

รถยนต์และอุปกรณ์

นิกเกิลที่ใช้ในรถยนต์อยู่ในลักษณะผิวเคลือบของส่วนประดับ นอกจากนี้รถประจำทางใหญ่ๆ และรถบรรทุกบางคันมีตัวถังทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดมีนิกเกิล นิกเกิลเจือแมงกานีส (Mn) และซิลิคอน (Si) ประมาณร้อยละ 4 และ 1 ตามลำดับ และใช้เป็นอิเล็กโทรด (electrode) สำหรับจุดประกายไฟของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

เครื่องจักรไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์และอะไหล่

โลหะเจือด้านทานมีนิกเกิลมากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นนิกเกิลส่วนใหญ่ในอุปกรณ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ ใช้นิกเกิลเป็น แอโนด (anode) กริด (grid) แคโทด (cathod) และลวดยึด โดยอาศัยคุณสมบัติยึดติด ความต้านแรง ด้านความเปราะเนื่องจากกำมะถัน และคุณลักษณะการปล่อยอิเล็กตรอน

จากคุณสมบัติติดแม่เหล็กนิกเกิลจึงใช้เป็นอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ที่สำคัญที่สุดคือ เครื่องแปลงกำลัง (transducer) สำหรับพลังงานเหนือเสียง (ultrasonic energy) ในเครื่องกำเนิดเหนือเสียงที่ใช้ในอุปกรณ์เสียงก้องใต้น้ำเพื่องานสำรวจใต้น้ำ การเดินเรือ การหาตำแหน่งปลา

และหาตำแหน่งเรือดำน้ำ และใช้ในการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเคลือบผิวในอุตสาหกรรมเคลือบโลหะ

โลหะนิกเกิลเจือเงินใช้เป็นสปริงแบนในระบบถ่ายทอดโทรศัพท์ ปุ่มสัมผัสแบบเลื่อนในสวิตช์เต้าเสียบ และเต้ารับซึ่งทนการกัดกร่อน

โลหะนิกเกิลเจือเหล็กชนิดแม่เหล็กอ่อนมีคุณสมบัติขั้วแม่เหล็กสูง ใช้ในอุปกรณ์สื่อสารทางไกล อิเล็กทรอนิกส์ จอแม่เหล็กสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องบันทึกแม่เหล็ก โลหะเจือประเภทนี้ในสภาพแผ่นซ้อนๆ กัน ใช้เป็นแกนในหม้อแปลง

โลหะนิกเกิลเจือเหล็กชนิดแม่เหล็กถาวรใช้ในลำโพง โทรศัพท์ ไมโครโฟน และอุปกรณ์วัดไฟฟ้า มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในมอเตอร์ไซค์ รถยนต์ และมอเตอร์กระแสตรงขนาดใหญ่

นิกเกิลผงที่อัดเป็นแท่งอิเล็กโทรดพูน ใช้ในแบตเตอรี่ที่มีสารละลายเป็นต่าง แบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้ในการติดเครื่องยนต์ในเครื่องบิน ใช้ในเครื่องมืออุปกรณ์กะทัดรัด และใช้เป็นแหล่งกำลังไฟฟ้าเคลื่อนที่

เครื่องใช้ในบ้าน

เครื่องใช้ภายในบ้านตั้งแต่เตาไฟฟ้า หม้อหุงข้าวไฟฟ้า เตาปิ้งขนมปัง แท่งให้ความร้อนแบบจุ่ม เครื่องเป่าผม ช้อนล่อม จาน ถาดและอุปกรณ์ผลิตอาหาร ผลิตจากนิกเกิลในรูปเหล็กกล้าไร้สนิม ผิวเคลือบโลหะนิกเกิลเจือชนิดต้านทานไฟฟ้า ทองบรอนซ์เจือนิกเกิล และโลหะโมเนล (มีนิกเกิลประมาณ 67 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 28 เปอร์เซ็นต์)

การก่อสร้างและสถาปัตยกรรม

นิกเกิลส่วนใหญ่ที่ใช้ในการก่อสร้างอยู่ในรูปเหล็กกล้าไร้สนิมหรือเหล็กกล้าเจือในสภาพแปรรูปหรือหล่อ เหล็กกล้าไร้สนิมใช้เป็นส่วนประดับและให้ความทนการกัดกร่อน เหล็กกล้าเจือนิกเกิลใช้สำหรับโครงสร้างของอาคารที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ความสวยงาม แข็งแรงและอัตรารับแรงต่อน้ำหนักสูง

การต่อเรือและซ่อมเรือ

การต่อเรือและซ่อมเรือจะใช้โลหะนิกเกิลเจือโลหะโมเนล โลหะทองแดงเจือนิกเกิล และทองบรอนซ์เจือนิกเกิล ในส่วนของเรือที่ถูกกับน้ำทะเล เช่น หม้อน้ำ ไบจอร์และเพลลา

อื่นๆ

โลหะคิวพรอนิกเกิลมีความทนการกัดกร่อน และมีความแข็งแรงมากพอ จึงใช้ทำ เหยี่ยวอากาศยานสีเงิน

ผิวเคลือบนิเกิลเพื่อป้องกันการกัดกร่อนให้ความสวยงาม ใช้ในการผลิต สิ่งของเล็กๆ มากมายจนกล่าวได้ว่า สิ่งของที่เป็นโลหะแทบทั้งหมดซึ่งไม่ต้องการคุณสมบัติทางกล และฟิสิกส์ ทำด้วยเหล็กกล้าอะลูมิเนียมเคลือบผิวด้วยนิเกิลซึ่งถูกกว่าโลหะอื่นๆ เช่น เข็มมุด คลิปกระดาษ กรรไกร หัวเข็มขัด เข็มกลัด กุญแจ

ใช้นิกเกิลในการทำอิเล็กโตรฟอร์มมิง (electroforming) ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตชิ้น งานที่รูปร่างซับซ้อนบอบบาง โดยการเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าบนแบบจำลองทำให้ได้ชิ้นงานมีมิติ เพียงตรง เช่น แผ่นเสียง

โลหะเหล็กผสมนิเกิล 36 เปอร์เซนต์ (invar) เป็นโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การขยาย เติงเส้นต่ำที่อุณหภูมิเท่ากับหรืออุณหภูมิต่ำกว่า จึงใช้ประโยชน์ในการทำมาตรฐานเครื่องชั่ง ตวง วัด ได้แก่ ทรายชั่งสายวัด และโครโนมิเตอร์ (คำนวณเส้นรุ้ง เส้นแวงใช้ในการเดินเรือ)

โลหะผสมนิเกิล-เหล็ก-โครเมียม ที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเท่ากับแก้วหรือ เซรามิก ใช้ในการผนึกแก้วกับโลหะ และเซรามิกกับโลหะ เช่น ขั้วหลอดไฟ ขั้วฟลูออเรสเซนต์ และ หลอดโทรทัศน์

ทางการแพทย์ใช้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตเป็นแผ่น แขนงกลม ลวด และอื่นๆ ในการ เชื่อมต่อ ตาม และตัดกระดูก

นิเกิลและเกลือของนิเกิลใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญคือ การไฮโดรเจน (hydrogenation) ไขมันและน้ำมัน

1.3 นิเกิลกับประเทศไทย

โดยที่ประเทศไทยไม่มีการผลิตโลหะนิเกิลจึงมีการนำเข้าโลหะนิเกิลเป็นปริมาณมาก อยู่ในอันดับที่หกของโลหะนำเข้าทั้งหมด ในแต่ละปีนำเข้าคิดเป็นมูลค่ามากกว่า 300 ล้านบาท การซื้อขายในประเทศราคาเฉลี่ยประมาณ 220 บาทต่อกิโลกรัม การนำเข้าโลหะนิเกิลจะนำเข้า ในรูปแท่ง แผ่น และแถบ เป็นส่วนมาก ปริมาณการนำเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี (กรม ทรัพยากรธรณี ฝ่ายพัฒนาโลหะกรรม, 2537) ซึ่งนิเกิลจะใช้ในกิจการต่างๆ ดังต่อไปนี้

นิกเกิลแท่งที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จะนำมาใช้ในโรงชุบโลหะ โดยใช้ชุบชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า ซึ่งจะผ่านการเคลือบผิวด้วยทองแดงก่อน ถัดมาจึงเคลือบด้วยนิกเกิล และสุดท้ายเคลือบผิวด้วยโครเมียมเพื่อเพิ่มความวาว

โรงงานเหล็กเหนียวหล่อใช้เฟอร์โรนิกเกิลในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อ เหล็กกล้าเจือหล่อ ส่วนโรงงานผลิตเครื่องใช้ทองบรอนซ์ตีบุกหรือทองลงหินใช้นิกเกิลถูกปรายผสมกับทองแดง อุตสาหกรรมวงจรไฟฟ้ารวมหรือไอซี นำเข้าแผ่นโลหะเจาะรูสำเร็จซึ่งเป็นแผ่นเหล็กผสมนิกเกิล 42 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นตัวและขาไอซี

โรงงานประกอบหรือผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าในประเทศ เช่น หม้อหุงข้าวไฟฟ้า กะทะไฟฟ้า เต้าไฟฟ้า เต้าปิ้งขนมปัง เครื่องเป่าผม นำเข้าลดต้นทุนทางไฟฟ้าประเภทนิกเกิล 60 - เหล็ก 20 - โครเมียม 20 หรือนิกเกิล 60 - เหล็ก 24 - โครเมียม 16 มาใช้ในกระบวนการผลิต

นอกจากนี้เหรียญบาทและผิวประกบเหรียญห้าบาทเป็นโลหะคิวพรอนิกเกิล ซึ่งมีทองแดงและนิกเกิล ร้อยละ 75 และ 25 ตามลำดับ ทางกองกษาปณ์ กรมธนารักษ์ นำเข้าตัวเหรียญเปล่าจากต่างประเทศมาป้อนเป็นเหรียญให้ใช้กันทุกวันนี้

2. ไบโอดีลิตซิ่ง

2.1 ความหมายของไบโอดีลิตซิ่ง

ไบโอดีลิตซิ่ง หรือไมโครเบียลลิตซิ่ง (microbial leaching) เป็นกระบวนการทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันของปฏิกิริยาชีวเคมี (biochemical oxidation process) โดยในรายละเอียดของกระบวนการนี้คือ การใช้แบคทีเรียในลักษณะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ทำให้โลหะซึ่งอยู่ในรูปซึ่งไม่ละลาย เปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่ละลาย คุณสมบัติของแบคทีเรียที่จะทำให้เกิดกระบวนการไบโอดีลิตซิ่ง จะต้องสามารถทนได้กับสภาพที่เป็นกรดอย่างมาก และต้องทนได้กับสภาพที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักอีกด้วย (ไพทพิย์ ดันติเวชวุตมิกุล, 2531)

2.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไบโอดีลิตซิ่ง

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไบโอดีลิตซิ่ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.2.1 Autotrophic Microorganism

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะได้พลังงานจากการออกซิเดชันสารประกอบอนินทรีย์ โดยเฉพาะเฟอร์รัสไอออน (ferrous ion) ซัลเฟอร์ (sulfur) และหรือโลหะซัลไฟด์ (metal sulfide) ที่ละลาย

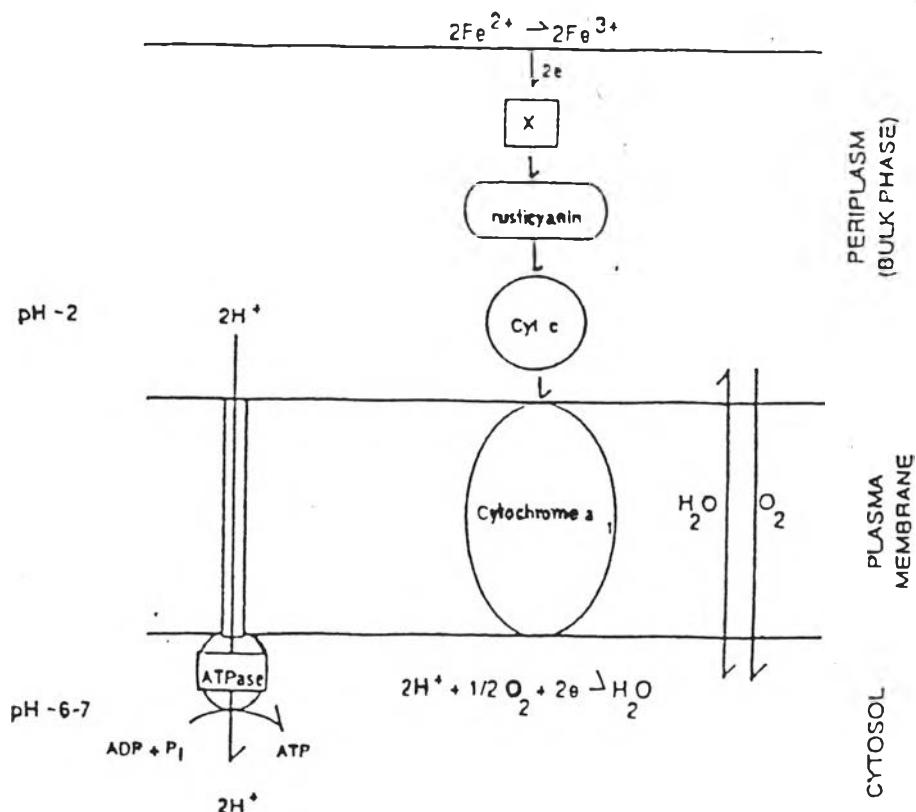
และไม่ละลายน้ำ โดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นแหล่งคาร์บอน จุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการลิซซิ่งนี้จะอยู่ในกลุ่ม Thiobacillus, Leptospirillum, Sulfolobus เป็นต้น

2.2.1.1 *Thiobacillus ferrooxidans*

จุลินทรีย์ชนิดนี้เป็นแบคทีเรียแกรมลบ ที่มีลักษณะเป็นแท่งสั้น ขนาด 0.5x1.0 ไมครอน (Hutchins และคณะ, 1986) อยู่เป็นคู่หรือเดี่ยว ไม่ค่อยพบอยู่เป็นสายสั้นๆ มีปริมาณกวานีนิน (guanine) ร่วมกับไซโตซีน (cytosine) (G+C) เท่ากับ 53.6 - 60.1 โมลเปอร์เซ็นต์ เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต เจริญในสภาพที่เป็นกรด ไม่สร้างสปอร์ มีแฟลกเจลลา 1 เส้น เจริญที่ระดับอุณหภูมิปานกลาง และสร้างสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์จากสารอนินทรีย์ โดยใช้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี (aerobic, acidophilic, non-spore forming, single flagellated, mesophilic chemoautotroph) เจริญเติบโตได้ดีที่พีเอชในช่วง 1.4-6.0 พีเอชที่เหมาะสมคือ 2.5-5.8 อุณหภูมิ 15-20 องศาเซลเซียส แต่บางรายงานพบว่าเจริญได้ที่พีเอช 1.5-3.5 ที่เหมาะสม คือ 2.3 อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยผ่านทางวัฏจักรเคลวิน (Calvin-Benson cycle) และคาร์บอกซิเลชัน (carboxylation) ของฟอสโฟอินอลไพรูเวต (phosphoenol pyruvate) สามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนไปเป็นเฟอร์ริกไอออน (ferric ion) โลหะซัลไฟด์และสารประกอบซัลเฟอร์ (H_2S , S^0 , $S_2O_3^{2-}$) ไปเป็นกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอต่อความต้องการในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำหน้าที่อื่นๆ ในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Hutchins และคณะ, 1986)

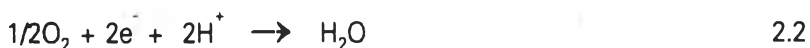
เฟอร์รัสไอออนที่เป็นแหล่งพลังงานของ *T. ferrooxidans* ซึ่งคงตัวอยู่ในสภาพที่เป็นกรด จะถูกออกซิไดซ์โดยการปล่อยอิเล็กตรอน ดังสมการ 2.1 ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจเกิดบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของ *T. ferrooxidans* ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นโมเดลในระบบการออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออน ของ *T. ferrooxidans* ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป (Enriich, 1990)





รูปที่ 2.1 การออกซิเดชันเหล็กโดย *T. ferrooxidans*
ที่มา : Enriich (1990)

จะมีการส่งอิเล็กตรอนที่ถูกดึงจากเฟอร์รัสไอออนไปยังเฟอร์ริลาสไมก - ไสโตรโครมซี (periplasmic cytochrome c) โดยการส่งผ่านนี้จะเกี่ยวข้องกับโปรตีนซึ่งมีทองแดงเป็นองค์ประกอบ (copper protien) ที่เรียกว่า rusticyanin ซึ่งไซโตรโครมซีที่ถูกรีดิวซ์ (reduced cytochrome c) จะจับกับผิววนอกของพลาสมาเมมเบรน (plasma membrane) แล้วส่งอิเล็กตรอนผ่านเมมเบรนไปยังไซโตรโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) ซึ่งอยู่ด้านในผิวของพลาสมาเมมเบรน และไซโตรโครมออกซิเดสที่ถูกรีดิวซ์ (reduced cytochrome oxidase) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้เกิดน้ำ

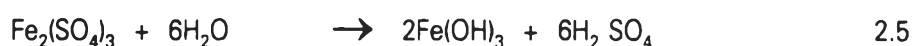
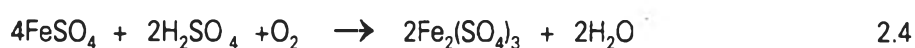


จากโมเดลในรูปที่ 2.1 ได้แสดงถึงองค์ประกอบหนึ่งคือ X ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันเฟอร์รัสไอออนในระหว่าง rusticyanin ซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้ สำหรับพลังงานที่เกิดในระหว่างการออกซิเดชันของ *T. ferrooxidans* เกิดจากกลไกของการเคลื่อนที่ไปมา

ของโปรตรอนผ่านพลาสมาเมมเบรน การเคลื่อนที่ของโปรตรอนเป็นผลมาจากความแตกต่างของพีเอชที่มีความเข้มข้นของโปรตรอนในแอซิดเพอริพลาสซึม (acid periplasm) สูงกว่าในไซโตรพลาสซึม (cytoplasm) ของ *T. ferrooxidans* ซึ่งมีค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกลาง และการเคลื่อนที่ของโปรตรอนอีกประการหนึ่งเกิดจาก transmembrane electrical potential การส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจนผ่านระบบการขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport system) เกิดจากการปั๊มโปรตรอนจากไซโตรพลาสซึมเข้าสู่เพอริพลาสซึม ซึ่งเกิดพร้อมกับการเกิดโปรตรอนจากการไฮโดรไลซ์เฟอร์ริกอิออนในขณะที่เกิดการออกซิเดชัน โดยสิ่งเหล่านี้จึงทำให้เกิดความแตกต่างของโปรตรอนพลังงานควบคู่ เช่น การสังเคราะห์ ATP เกิดจากพลาสมาเมมเบรนยอมให้โปรตรอนผ่านเข้าไปในเพอริพลาสซึม จับกับบริเวณที่ ATPase ซึ่งยึดเหนี่ยวกับเมมเบรนบริเวณที่ ATPase ประกอบด้วยช่องซึ่งยอมให้โปรตรอนผ่าน (proton channel) ไปยังไซโตรพลาสซึมได้โดยตรง และผลจากการเคลื่อนที่ของโปรตรอน ทำให้เกิดการสังเคราะห์ ATP โดย ATPase ดังสมการที่ 2.3



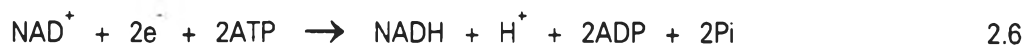
การออกซิไดซ์เฟอร์ริสอิออน 2 โมเลกุลจะได้อิเล็กตรอน 1 คู่ โดยการส่งผ่านทางออกซิเจน จะได้ 1 ATP ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดของเมตาบอลิซึมของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กมีดังนี้



เฟอร์ริกซัลเฟตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชันจะทำปฏิกริยากับน้ำเกิดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (ferric hydroxide) และกรดซัลฟิวริกซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองและทำให้เกิดกรดเพิ่มขึ้นในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาสมดุลของอิเล็กตรอน โปรตรอนในระหว่างการเกิดออกซิเดชันของเหล็ก ผลของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์และซัลเฟต ปฏิกริยาเหล่านี้ทำให้เกิด jarosite ซึ่งจะเห็นเป็นสีเหลืองและสีน้ำตาลแดงตกตะกอนขึ้นกับการออกซิเดชันของเหล็ก

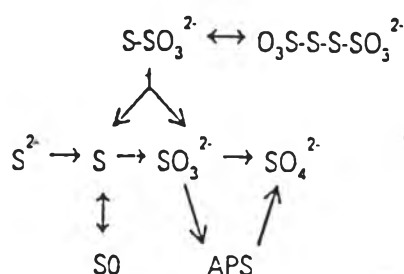
ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพวกเขา autotroph อีก 2 ปฏิกริยา คือ การเกิดพลังงานรีดิวซ์ (reducing power) และการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่ง

ขึ้นอยู่กับกระบวนการการผลิตพลังงานของเมตาบอลิซึม การเปลี่ยนรูปของไพรีดีนนิวคลีโอไทด์ (pyridine nucleotides) (NADH, NADPH) ทำให้เกิดพลังงานรีดิวซ์ เกิดการออกซิเดชันของเฟอร์รัสไอออน



ปฏิกิริยาการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน *T. ferrooxidans* จะควบคู่ไปกับการผลิตพลังงานจากการออกซิเดชันเฟอร์รัสไอออน ปฏิกิริยาหลัก 2 ปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยทางสรีระและความต้องการแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์

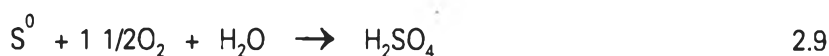
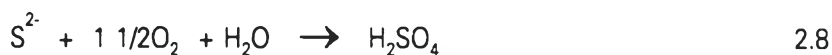
สารประกอบซัลเฟอร์ประกอบด้วยสารประกอบที่ละลายน้ำ เช่น S^{2-} , H_2S , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$, $n(\text{S-S})^{2-}$ และสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ธาตุซัลเฟอร์และโลหะซัลไฟด์ ซัลไฟด์หรือซัลเฟอร์เป็นสารตั้งต้นที่ประกอบอยู่ในกระบวนการลิซซิ่งโลหะซัลไฟด์โดยทั่วไปและเป็นสารตั้งต้นของการออกซิเดชัน การออกซิเดชันซัลเฟอร์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรก ซัลเฟอร์จะเสีย 2 อิเล็กตรอนโดยเอนไซม์ซัลไฟด์ออกซิเดส (sulfide oxidase) และเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของการเกิดซัลเฟอร์อะตอมขึ้น จากนั้นจะเกิดการออกซิเดชันของโพลิสัลไฟด์ (polysulfide) สายสั้นเกิดเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ซัลเฟอร์ (polymeric sulfur) โดยเมมเบรนของ *T. ferrooxidans* ส่วนหนึ่งจะถูกเตรียมสำหรับออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ การที่ซัลเฟอร์ถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นซัลเฟตนั้น สามารถเกิดได้โดยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง ปฏิกิริยาการออกซิเดชันของสารประกอบซัลเฟอร์ของแบคทีเรียในกลุ่ม *Thiobacillus* ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการออกซิเดชันสารประกอบซัลเฟอร์ของแบคทีเรียในกลุ่ม *Thiobacillus*
ที่มา : Lundgren และ Silver (1980)

2.2.1.2 *Thiobacillus thiooxidans*

แบคทีเรียชนิดนี้มักพบอยู่ร่วมกับ *T. ferrooxidans* ในสภาพที่เป็นกรด มีลักษณะคล้ายกับ *T. ferrooxidans* คือ เป็นแท่งสั้นขนาด 0.5x1.0 ไมครอน อาจพบอยู่แบบเดี่ยวหรือเป็นคู่หรืออยู่เป็นสายสั้นๆ มีปริมาณกวานีนรวมกับไซโตซีนเท่ากับ 52- 57.9 โมลเปอร์เซ็นต์ เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต เจริญในสภาพที่เป็นกรด และที่ระดับอุณหภูมิปานกลาง ได้พลังงานจากการออกซิเดชันสารประกอบอนินทรีย์ (strictly aerobic, acidophilic, mesophilic autotroph) เจริญได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 10-37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 28-30 องศาเซลเซียส พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับพีเอช 4.0 ถ้าพีเอช สูงกว่า 6.0 และต่ำกว่า 0.5 จะยับยั้งการเจริญเติบโต พบได้ทั่วไปในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ดินที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ แบคทีเรียชนิดนี้ไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กเพื่อใช้เป็นพลังงาน แต่สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอนินทรีย์ซัลเฟอร์ได้ เช่น ซัลไฟด์ (S^{2-}) และธาตุซัลเฟอร์ (element sulfur, S^0) ไปเป็นกรดซัลฟิวริก แสดงดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการลิซซิงทางอ้อม ถ้าแบคทีเรียชนิดนี้อยู่ร่วมกับ *T. ferrooxidans* จะเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการลิซซิงซึ่งมากกว่ามี *T. ferrooxidans* อยู่เพียงชนิดเดียว



2.2.1.3 *Leptospillum ferrooxidans*

แบคทีเรียชนิดนี้พบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1972 ในเหมืองแร่ทองแดง ประเทศสหรัฐอเมริกา มีลักษณะคล้ายกับ *T. ferrooxidans* คือ เป็นแบคทีเรียแกรมลบ และเป็นแบคทีเรียที่เจริญในสภาพที่เป็นกรดและที่ระดับอุณหภูมิปานกลาง ได้พลังงานจากการออกซิเดชันสารประกอบอนินทรีย์หรือสารประกอบอินทรีย์ (mesophilic, acidophilic, obligately chemolithotrophic autotroph) สามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนได้ แต่ไม่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ได้ ถ้าอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ (sulfur-oxidizing microorganisms) จะสามารถออกซิไดซ์แร่ซัลไฟด์ได้ และสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาทางอ้อมในการลิซซิงแร่ซัลไฟด์อื่นๆ ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบน้อยๆ ได้

2.2.1.4 Moderate thermophilic bacteria

แบคทีเรียเหล่านี้สามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนและซัลเฟอร์ ช่วยเร่งปฏิกิริยาการละลายของโลหะ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนพบในเหมืองแร่ทองแดงและถ่านหิน มีลักษณะคล้ายกับแบคทีเรียในกลุ่ม *Thiobacillus* (Hutchins และคณะ, 1986)

2.2.1.5 Extreme thermophilic bacteria

แบคทีเรียชนิดนี้อยู่ในกลุ่ม *Sulfolobus* มักพบได้ในน้ำพุร้อน เจริญได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 68-80 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เซลล์จะมีรูปร่างกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.7-1.0 ไมครอน แบคทีเรียชนิดนี้ทุกสายพันธุ์สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ได้ แต่บางชนิดจะสามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนได้

2.2.1.6 แบคทีเรียชนิดอื่นๆ

Thiobacillus ชนิดอื่นๆ ที่เกิดในสภาวะที่มีการละลาย เช่น *T. acidophilus* สามารถเจริญเติบโตโดยใช้ได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (autotroph, heterotroph) สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดคาร์บอกซิลิกได้ที่พีเอช 3.0 - 3.5 *T. kabobis* และ *T. organoporus* สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์และเจริญได้ที่พีเอช 1.5 - 5.0 *T. thioporus* สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ ไทโอซัลเฟตและโลหะซัลไฟด์

2.2.2. Heterotrophic Microorganisms

เป็นจุลินทรีย์อีกกลุ่มที่มีความสามารถในการละลายโลหะต่างๆ ออกจากแร่ ซึ่งจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการละลายมีทั้งแบคทีเรียและเชื้อรา โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้พลังงานและคาร์บอนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นสารละลาย (leaching agent) หรือเรียกว่า สารเมตาบอไลต์ (metabolites) ได้แก่ กรดอินทรีย์ เช่น กรดกลูโคนิก (gluconic acid) กรดแลคติก (lactic acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) กรดอะซิติก (acetic acid) และ กรดไกลโคลิก (glycolic acid) เป็นต้น โดยอาจจะเกิดผล 2 ประการ คือ ทำให้พีเอชลดลง (เพิ่มปริมาณไฮโดรเจนไอออนในการละลาย) และจับกับโลหะ (complexing metals) ดังเช่นการศึกษาของ McKenzie, Denys และ Buchanan (1987) พบว่ากลไกการสกัดโลหะเป็นผลจากกรดอินทรีย์ที่เชื้อผลิตขึ้น โดยไฮโดรเจนไอออนของกรดจะเข้าไปแทนที่โลหะไอออนในก้อนโลหะ ทำให้โลหะนั้นละลายออกมาอยู่ในสารละลาย หรืออาจเกิดจากการรวมตัวของโลหะกับกรดอินทรีย์ ซึ่งอยู่ในรูป chelation ที่ละลายในสารละลาย และมีอีกหลายรายงานที่พบว่า การสกัดโลหะเป็นผลเนื่องจาก

กรดอินทรีย์ที่เชื่อผลดีขึ้น เช่น การศึกษาของ Tzeferis, Agtzini และ Nerantzis (1994) ได้ศึกษาการสกัดแร่ निकเกิลซึ่งไม่มีซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ (non-sulphide nickel ores) ซึ่งแร่ที่ใช้ในการศึกษาเป็นแร่คุณภาพต่ำ มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ 0.37 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในรูปสารประกอบคลอไรด์เป็นส่วนใหญ่ และแร่อีกชนิดมีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ 4.23 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองจะใช้แร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 510 เมช เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ *Penicillium sp.* ซึ่งแยกได้จากเหมืองแร่ในประเทศกรีซ และเชื้อรา *Aspergillus* และ *Penicillium* ซึ่งเป็นเชื้อบริสุทธิ์ (pure culture) อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ในการทดลองมี 3 ชนิด ได้แก่ กลูโคสมีเดีย (glucose medium) ซูโครสมีเดีย (sucrose medium) และกากน้ำตาล ผลจากการศึกษาพบว่า เชื้อทั้ง 3 ชนิดที่ได้รับการปรับสภาพ สามารถทนต่อสภาพที่ไม่เหมาะสมได้มากขึ้น โดยเฉพาะ *Penicillium sp.* ได้รับความทนทานจากนิกเกิลน้อยกว่า *Aspergillus* แต่เชื้อราเกือบทุกชนิดโตได้ยากถ้ามีแร่ 10 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าความสามารถในการสกัดแร่เกรดต่ำของเชื้อราที่แยกได้จากเหมืองแร่สายพันธุ์ P2 และ A3 สกัดนิกเกิลออกมาได้มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ โดยอธิบายว่ากลไกการสกัดนิกเกิลเกิดจากเชื้อสร้างกรดซิตริก (citric acid) และสารเมตาบอลิต์อื่นๆ ไปจับ (attacked) กับแร่แล้วทำให้นิกเกิลละลายออกมาจากร่

2.3 กระบวนการไบโอลิชซึ่งที่เกิดโดยจุลินทรีย์

กระบวนการไบโอลิชซึ่งที่เกิดโดยจุลินทรีย์พวก autotroph โลหะสามารถถูกละลายออกจากโลหะที่ไม่ละลายน้ำได้โดยตรงจากเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ หรือทางอ้อมจากผลิตภัณฑ์ของเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ปฏิกริยาทางชีววิทยาที่เกี่ยวข้องในการสกัดโลหะเป็นการออกซิเดชันของซัลเฟอร์หรือโลหะซัลไฟด์ เป็นดังนี้

2.3.1. วิธีทางตรง (direct leaching)

วิธีการลิชซึ่งทางตรง จุลินทรีย์จะสัมผัสกับโลหะซัลไฟด์ และเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยนโลหะซัลไฟด์เป็นโลหะซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ (Hutchins และคณะ, 1986)

สมการทั่วไปของการลิชซึ่งโดยทางตรงสามารถเขียนได้ดังนี้

จุลินทรีย์

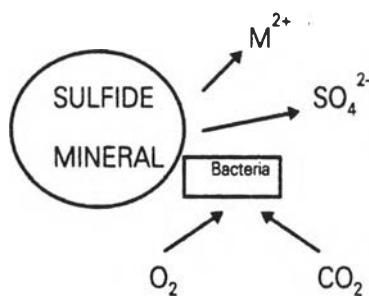


โดยที่ M คือ โลหะที่มีประจุ +2 (bivalent metal) ซึ่งอยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเกิดการออกซิไดซ์โลหะซัลไฟด์เกิดเป็นโลหะซัลเฟตที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถนำสารละลายนี้ไปแยกเอาโลหะที่ต้องการออกต่อไป

ตัวอย่างปฏิกิริยาของการเกิดกระบวนการลิซซิ่งโดยตรงของแร่ชนิดต่างๆ มีดังนี้



การสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับพื้นผิวตัวอย่างแร่ จะเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้เกิดการลิซซิ่งโดยตรง



รูปที่ 2.3 การลิซซิ่งโดยตรง

ที่มา : Hutchins และคณะ (1986)

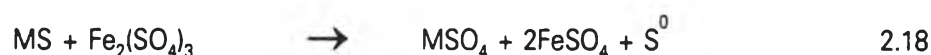
2.3.2. วิธีทางอ้อม (indirect leaching)

การลิซซิ่งโลหะที่เกิดจากจุลินทรีย์โดยทางอ้อมเกิดเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.2.1 แบคทีเรียออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนเป็นเฟอร์ริกไอออน



2.3.2.2 เกิดการละลายของโลหะเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะเกิดเป็นโลหะซัลเฟตดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



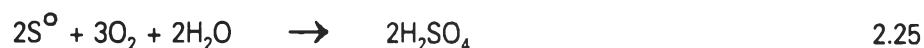
M คือ โลหะที่มีประจุ +2 (bivalent metal) ตัวอย่างของปฏิกิริยา ได้แก่



2.3.2.3 เฟอร์ริสอออนที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์โดย *T. ferrooxidans* ได้ เฟอร์ริกอออนกลับไปใช้ในปฏิกิริยาข้อ 2.3.2.2



ธาตุซัลเฟอร์ (S^0) ที่เกิดในปฏิกิริยาข้อ 2.3.2.2 จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริกโดย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ดังปฏิกิริยา (Hutchins และคณะ, 1986)



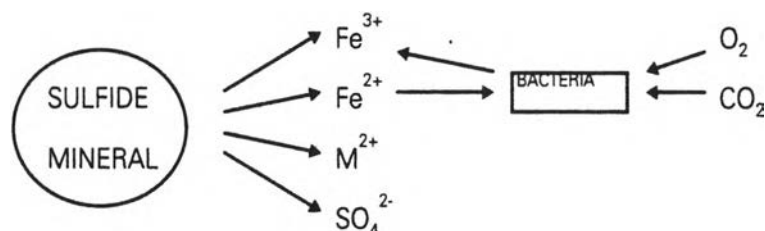
T. thiooxidans จะสามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ได้สมบูรณ์ที่สุด และในปฏิกิริยานับว่ามีความสำคัญต่อกระบวนการลิซซิ่งโดยวิธีทางอ้อม เนื่องจากธาตุซัลเฟอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาข้อ 2.3.2.2 จะจับอยู่ที่ผิวของตัวอย่างแร่ ทำให้ลดการสัมผัสของเฟอร์ริกอออนกับโลหะที่ต้องการให้เกิดการละลาย การออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์ จึงเป็นการช่วยลดการเกาะของธาตุซัลเฟอร์บนผิวของแร่

ถึงแม้ว่าการเกิดเฟอร์ริกฮิออนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการลิซซิงโดยทางอ้อม แต่เฟอร์ริกฮิออนที่เกิดขึ้นอาจเกิดการตกตะกอนได้ ถ้าพีเอชมีค่าสูงขึ้น พบว่าเฟอร์ริกซัลเฟตจะค่อยๆ เปลี่ยนเป็น jarosite แล้วเกิดการตกตะกอนดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

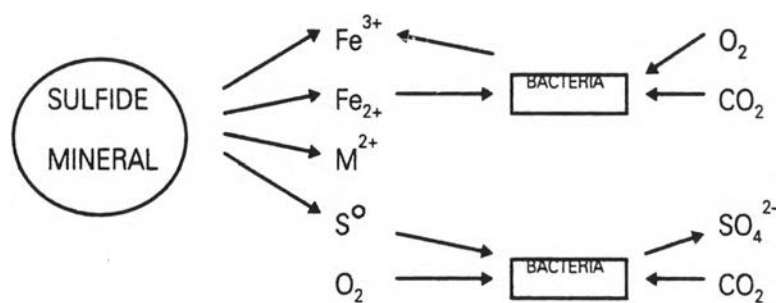


การตกตะกอนของเหล็กเป็นสาเหตุหนึ่งที่ยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไบโอลิซซิง

ก. การลิซซิงเหล็กโดยทางอ้อม



ข. การลิซซิงซัลเฟอร์โดยทางอ้อม



รูปที่ 2.4 การลิซซิงโดยทางอ้อม

ที่มา : Hutchins และคณะ (1986)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลิซซิง

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการลิซซิง มีดังต่อไปนี้

3.1 ชนิดและปริมาณจุลินทรีย์

เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิซซิง มีหลายชนิด ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิด มีความสามารถในการลิซซิงได้แตกต่างกัน จากการศึกษาส่วนใหญ่จะพบว่า *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* อยู่ร่วมกันในเหมืองแร่ซัลไฟด์ ซึ่งการที่มีจุลินทรีย์หลาย ๆ ชนิด อาจช่วยให้การสกัดโลหะออกมาได้มากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังเช่น เชื้อผสม (mixed cultures) ระหว่าง *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* สามารถสกัดโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม (Cd) ออกจากกากตะกอนซึ่งได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ถูกย่อยสลายแล้ว (digested sewage sludge) ได้มากกว่าการใช้เชื้อชนิดเดียวถึง 10 เปอร์เซ็นต์ (Tyagi และ Couillard, 1987)

Tyagi, Couillard และ Tran (1988) ศึกษาเกี่ยวกับการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการย่อยสลายในระบบไร้ออกซิเจน (anaerobically digested sludge) โดยใช้เชื้อผสมระหว่าง *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์ ปริมาตร 5 ลิตร ให้อากาศโดยใช้เครื่องให้อากาศ ทดลองที่ระดับอุณหภูมิห้อง และระดับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 พบว่า การใช้เชื้อผสมดังกล่าว สามารถสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนได้มากกว่าการใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เพียงชนิดเดียว 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเชื้อผสมสามารถสร้างกรดได้มากกว่า ทำให้พีเอชของระบบต่ำกว่า จึงสกัดโลหะหนักออกมาได้มากกว่า

เช่นเดียวกับการศึกษาของ Blais, Tyagi, Auctair และ Huang (1992) ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบการสกัดโลหะออกจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (municipal sewage sludge) โดยวิธีการใช้กรดซัลฟิวริก และการใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ แบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ (sulfur - oxidizing microflora) และแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์เหล็ก (iron - oxidizing microflora) ซึ่งปรากฏผลว่า แบคทีเรียทั้งสองชนิดดังกล่าวที่มีอยู่ในกากตะกอน เมื่อทำการปรับสภาพจะสามารถนำมาใช้ในการสกัดโลหะ อลูมิเนียม (Al) แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ออกจากกากตะกอนได้ โดยแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ จะมีประสิทธิภาพในการสกัดโลหะได้ดีกว่าแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์เหล็ก เนื่องจากแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีพีเอชสูงกว่า จึงใช้กรดเพียงเล็กน้อยในการปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญ และสามารถสร้างกรดซัลฟิวริกได้มากกว่า และพบว่าจุลินทรีย์สองชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการสกัดโลหะดีกว่าการใช้กรดซัลฟิวริก

3.2 อุณหภูมิ

กระบวนการไบโโอลิกซิง ก็เช่นเดียวกับกระบวนการทางชีววิทยาอื่น ๆ ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 25 - 35 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส อัตราการลิซิงจะลดลง และหยุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราการลิซิงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำ (Karaivko, Kuznetsov และ Golonizik, 1977 อ้างถึงใน Wong และ Henry, 1984) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Couillard และ Chartier (1993) ซึ่งศึกษาการกำจัดคาร์บอนเป็นอนินทรีย์ออกจากตะกอน (sediment) ในลำน้ำ โดยใช้ *T. ferrooxidans* พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 21 องศาเซลเซียส เป็น 10 องศาเซลเซียส จะทำให้การละลายของทองแดงลดลง

Blais, Tyagi และ Auclair (1993) ศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนชุมชน (sewage sludge) โดยเติมเฟอร์ริสอิออน และธาตุซัลเฟอร์ ลงไปเป็นสารอาหาร (substrate) ทดลองในระดับขวดเขย่า (shake flask) ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 6 ค่า ซึ่งอยู่ได้ช่วง 7 - 42 องศาเซลเซียส ได้แก่ อุณหภูมิ 7, 14, 21, 28, 35, 42 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมิผลต่อการละลายของโลหะแคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การละลายของโลหะจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และการเจริญของจุลินทรีย์เป็นขั้นตอนที่จำกัด (rate - limiting step) การละลายของโลหะออกจากกากตะกอน

3.3 พีเอช (pH)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไบโโอลิกซิงส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพที่เป็นกรด ดังนั้น การศึกษาระดับพีเอชของสารละลายที่ใช้ลิซิงต่ำได้เท่าที่ต้องการ ก็จะช่วยให้การลิซิงมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน (sewage sludge) โดย Sreerishnan และคณะ (1993) โดยศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ทดลองโดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมกากตะกอน 200 มิลลิลิตร เติมผงซัลเฟอร์ (sulfur powder) 0.5 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อตั้งต้น (inoculum) 5 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่อปริมาตร ทดลองที่ระดับอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที (rpm) พบว่าการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน โดยเชื้อแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ โดยที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 อัตราการเกิดซัลเฟต (sulfate) จะมากที่สุด และยังพบอีกว่า การละลายของโลหะขึ้นกับพีเอชของระบบ เนื่องจากที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 เป็นระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย จึงเจริญเติบโตได้ดี และผลิตกรดซัลฟิวริกมาก จึงเกิดการละลายของโลหะออกมา

3.4 สารอาหาร (Nutrients)

mesophilic chemoautotrophic เช่น *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิซซิ่งต้องการสารอนินทรีย์เป็นแหล่งของสารอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เช่น เฟอร์รัสไอออน และสารประกอบซัลเฟอร์ ความต้องการสารอาหารหลักและรอง เช่น โปตัสเซียม (K) ฟอสฟอรัส(P) แมกนีเซียม(Mg) และแร่ธาตุอื่น ๆ สารอาหารที่ประกอบด้วยแอมโมเนีย จะใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญที่สุด ส่วนฟอสฟอรัสใช้เป็นสารอาหารที่ใช้ในขั้นตอนแรกของการผลิตพลังงาน ส่วนแมกนีเซียมจะใช้สำหรับปฏิกิริยาการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Tyagi, Couillard และ Grenier (1991) ได้ศึกษาอิทธิพลของ เหล็กที่ละลายตัวได้ (soluble iron) โปตัสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (K_2HPO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แคลเซียมไนเตรต ($Ca(NO_3)_2$) โปตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) และแอมโมเนียมซัลเฟต ($(NH_4)_2SO_4$) ที่มีผลต่อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการย่อยสลาย (digested sludge) โดย *T. ferrooxidans* โดยกากตะกอนที่ใช้ศึกษาไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ จากการศึกษาพบว่า การเติมเหล็กที่ละลายตัวได้ลงในกากตะกอน จะช่วยเพิ่มอัตราการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน การเติมไนโตรเจน ($(NH_4)_2SO_4$) จะช่วยเพิ่มการละลายของทองแดงและสังกะสี ส่วนการเติมฟอสเฟตและสารอาหารอื่นๆ (KCl, $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$) จะไม่มีผลต่ออัตราการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน สาเหตุที่เหล็กที่ละลายตัวได้ช่วยเพิ่มอัตราการสกัดโลหะหนัก เนื่องจากแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ใช้เหล็กที่ละลายตัวได้ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้เกิดการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนโดยผ่านกลไกทางตรงและกลไกทางอ้อมของกระบวนการไบโอลิซซิ่ง

Couillard และ Chartier (1993) ศึกษาการประยุกต์ใช้ *T. ferrooxidans* กำจัดการปนเปื้อนของโลหะหนักออกจากตะกอนในลำน้ำ โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารอาหาร ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) ที่ระดับ 5, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 30 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้การละลายของตะกั่วลดลง

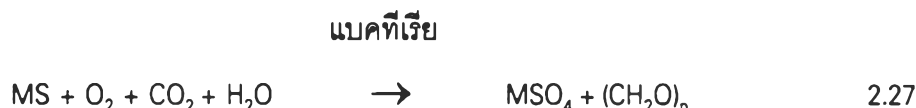
3.5 ออกซิเดชัน - รีดักชัน โปเทนเชียล (Oxidation - Reduction Potential)

ค่าออกซิเดชัน - รีดักชันโปเทนเชียล หรือ รีดอกซ์โปเทนเชียล (redox potential, Eh) เป็นการวัดแนวโน้มว่าแร่ธาตุชนิดใดรับหรือให้อิเลคตรอน และใช้ความสามารถในการออกซิไดซ์ ธาตุที่มีค่ารีดอกซ์โปเทนเชียลต่ำกว่าจะเป็นแอนอด ขณะที่ธาตุที่มีค่ารีดอกซ์โปเทนเชียลสูงกว่า จะเป็นแคโทด ธาตุที่มีค่ารีดอกซ์โปเทนเชียลต่ำกว่าจะละลายได้ดีกว่าธาตุที่มีค่ารีดอกซ์โปเทนเชียลสูงกว่า ระบบรีดอกซ์ (redox system) มีความสำคัญกับจุลินทรีย์พวกที่ใช้อากาศ ดังเช่น การ

ศึกษาของ Couillard, Chartier และ Mercier (1991) ซึ่งศึกษาการใช้กระบวนการไบโโอลิซซึ่งสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน (sludge) โดยเชื้อแบคทีเรีย *Thiobacillus* ศึกษาในกากตะกอนที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ กากตะกอนที่ถูกย่อยสลายในระบบมีออกซิเจน (aerobically digested sludge) และกากตะกอนที่ถูกย่อยสลายในระบบไร้ออกซิเจน พบว่าการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ถูกย่อยสลายในระบบมีออกซิเจน ซึ่งมีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลสูง โลหะหนักเกิดการละลายอย่างรวดเร็วภายใน 1 วัน แต่ในกากตะกอนที่ถูกย่อยสลายในระบบไร้ออกซิเจน ซึ่งมีค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลต่ำ การละลายของโลหะหนักจะใช้เวลาถึง 10 วัน จึงจะเกิดการละลายเท่ากัน

3.6 ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการไบโโอลิซซึ่งต้องการออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Hutchins และคณะ, 1986) การใช้ก๊าซออกซิเจนในการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ หรือเหล็กนั้น จะได้พลังงานเพื่อไปใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ของแบคทีเรีย โดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการที่ 2.27



พบว่าที่ความเข้มข้นของออกซิเจนต่ำกว่า 0.05 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แบคทีเรียจะหยุดการเจริญเติบโต และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 60 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จะทำให้แบคทีเรียตาย

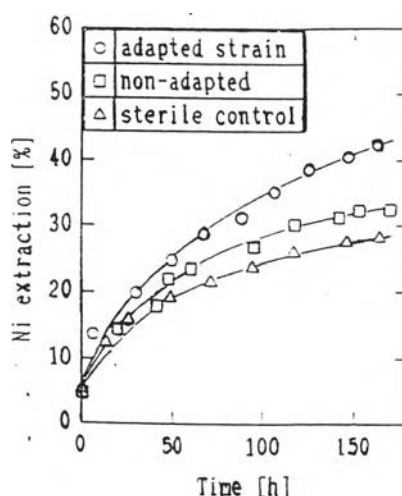
Wong และ Henry (1984) ได้ทดลองใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* สกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ย่อยสลายในระบบไร้ออกซิเจน พบว่ากระบวนการลิซซิ่งได้รับอิทธิพลจากการให้อากาศ ซึ่งการให้อากาศที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรของอากาศต่อลิตรของกากตะกอนต่อนาที จะทำให้เกิดการสกัดแคดเมียมได้ 80 - 85 เปอร์เซ็นต์ ทองแดง 60 - 80 เปอร์เซ็นต์ นิกเกิล 70 - 78 เปอร์เซ็นต์ และสังกะสี 84 - 90 เปอร์เซ็นต์

มีบางรายงานพบว่า อัตราการเกิดออกซิเดชันของแบคทีเรียลดลงถึงร้อยละ 76 เมื่อมีการดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออก *T. ferrooxidans* ที่เจริญบนเฟอร์ริซัลเฟตสามารถเพิ่มปริมาณขึ้นได้ เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.7 ความเป็นพิษของโลหะ

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไบโอลิชซิ่ง มีแนวโน้มที่จะทนต่อปริมาณโลหะเข้มข้นสูง ๆ ได้ เพราะมี potential uptake site บริเวณผนังเซลล์ *T. ferrooxidans* ทนต่อเงินและปรอทได้น้อยมาก (เช่น ประมาณ 10 ไมโครกรัมต่อลิตรของเงิน) รวมทั้งโมลิบดีนัม จากการศึกษาของ Lawson, Nicholas และ Pellat (1995) พบว่า คลอไรด์ (chloride) เป็นพิษต่อ *T. ferrooxidans* คลอไรด์ความเข้มข้นสูงกว่า 5 กรัมต่อลิตร จะมีผลต่อ *T. ferrooxidans* และไม่สามารถปรับสภาพเชื้อ *T. ferrooxidans* ใช้ทนต่อคลอไรด์ได้ เนื่องจากคลอไรด์จะทำลายเมมเบรน

การปรับปรุงสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการไบโอลิชซิ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะที่ละน้อย ดังเช่นการศึกษาของ Kai, Nishi และ Takahashi (1995) โดยทำการปรับสภาพเชื้อ *T. ferrooxidans* ให้ทนต่อนิกเกิลไอออน ซึ่งทดลองโดยเลี้ยง *T. ferrooxidans* ในอาหาร 9K medium ที่เติมเฟอร์ริสไอออน 8 กรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเป็น 2.0 เลี้ยงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และทดลองทำการปรับสภาพเชื้อ โดยเปลี่ยนถ่ายเชื้อลงในอาหารที่มีนิกเกิลไอออนความเข้มข้นสูงขึ้น โดยเริ่มต้นจากการเติมนิกเกิลซัลไฟด์ (NiS) 0.1 กรัม ลงไปในอาหาร แล้วค่อยๆ เพิ่มปริมาณขึ้น จากการทดลอง พบว่า เชื้อจะปรับสภาพให้สามารถทนต่อความเข้มข้นของนิกเกิลได้สูงขึ้นถึง 1 กรัมต่อลิตร และสามารถสกัดนิกเกิลได้สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งคาดว่าเชื้อที่ปรับสภาพแล้วจะสกัดนิกเกิลซัลไฟด์ โดยผ่านกลไกทางตรง (direct leaching) แสดงดังสมการที่ 2.28



รูปที่ 2.5 ปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกโดยแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพและแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ปกติ

ที่มา : Kai, Nishi และ Takahashi (1995)

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย

ต้นฉบับ หน้าขาดหาย