บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณนิกเกิลในกากตะกอน

การวิเคราะห์ค่าพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ พิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือจางกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำกลั่นกับค่าพีเอช (ภาคผนวก ก รูปที่ ผ-1) จะได้ค่าพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนเมื่อปริมาณการเจือจางกากตะกอนด้วยน้ำกลั่นมีค่าเป็น 0 กรัมน้ำ/กรัมกากตะกอน

วิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลในกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ โดยการย่อยสลายกากตะกอนด้วยกรด จากนั้นวัดปริมาณนิกเกิลในสารละลายด้วยการวัดค่าความดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วคำนวนหาปริมาณนิกเกิลในกากตะกอน ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณนิกเกิลในกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์

ชนิดกากตะกอน	ขนาด	พีเอช	ปริมาณนิกเกิล (%)
ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น	< 80 mesh	8.62	43.2
ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น และ 0.1N H_2SO_4	20-40 mesh และ < 80 mesh	7.42	42.3

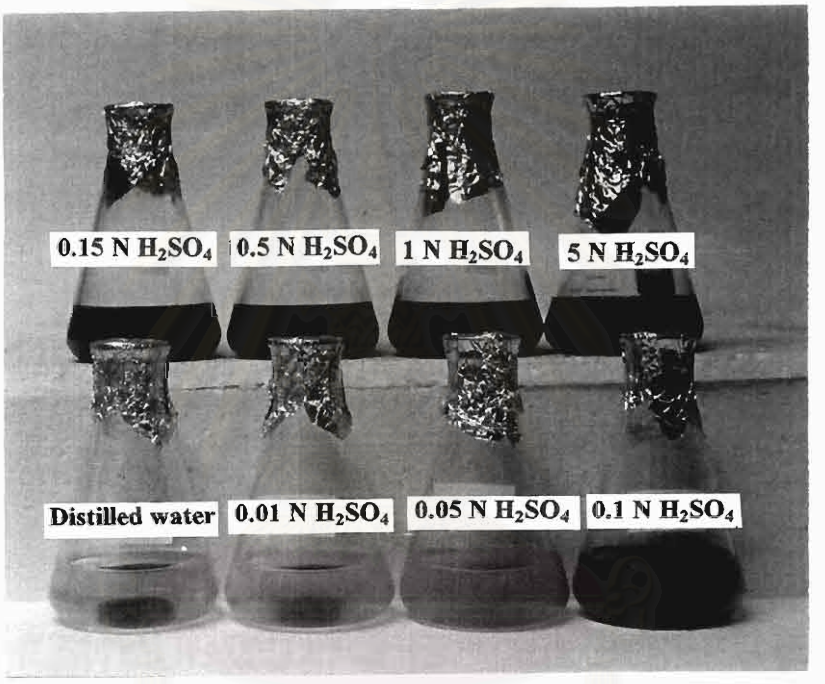
จากการศึกษาของ ขวัญเรือน (2540) ซึ่งวิเคราะห์ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณนิกเกิลในกากตะกอนด้วยวิธีเดียวกันกับงานวิจัยนี้ พบว่ากากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์มีค่าพีเอชเริ่มต้น 7.89 และมีปริมาณนิกเกิลในกากตะกอน 48.81%

กาญจนา (2541) วิเคราะห์ธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยการแจกแจงระดับพลังงานด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) พบว่ากากตะกอนประกอบด้วยธาตุ นิกเกิล คาร์บอน ออกซิเจน และอื่นๆ ดังนี้ 22.89 17.04 47.52 และ 12.55% ตามลำดับ

4.2 ผลการสิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริก

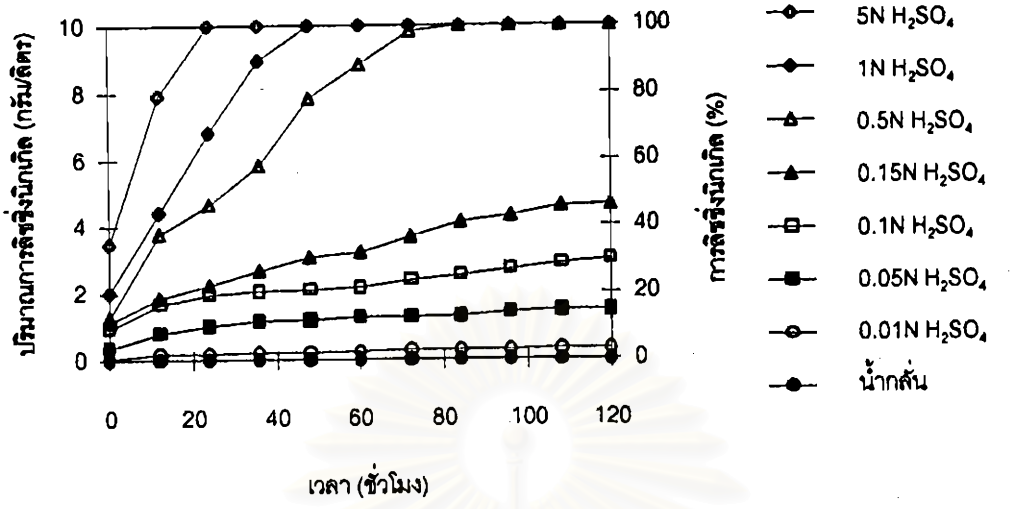
4.2.1 ผลการสิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในระบบขวดเขย่า

การสิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นนิกเกิลอิออน 10 กรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.15 0.5 1 และ 5 N ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกับการใช้น้ำกลั่นในระบบขวดเขย่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สารละลายจากกระบวนการสิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่างๆกัน ในระบบขวดเขย่า

ผลการทดลองพบว่า การใช้น้ำกลั่นไม่สามารถสิชชิ่งนิกเกิลได้ ส่วนการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.5 1 และ 5 N จะสามารถสิชชิ่งนิกเกิลได้ 100% ภายในเวลา 84 48 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยที่ปริมาณการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.50 N คิดเป็น 1.06 กรัมกรดซัลฟิวริกต่อกรัมของกากตะกอน ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนสตอยจิโอเมตริกซ์ แสดงว่าในกากตะกอนนี้น่าจะประกอบไปด้วยนิกเกิล และโลหะหนักชนิดอื่นที่มีความเสถียรมากกว่านิกเกิล จึงทำให้เกิดการชะละลายนิกเกิลได้ง่ายกว่า



รูปที่ 4.2 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆในระบบขวดเขย่า

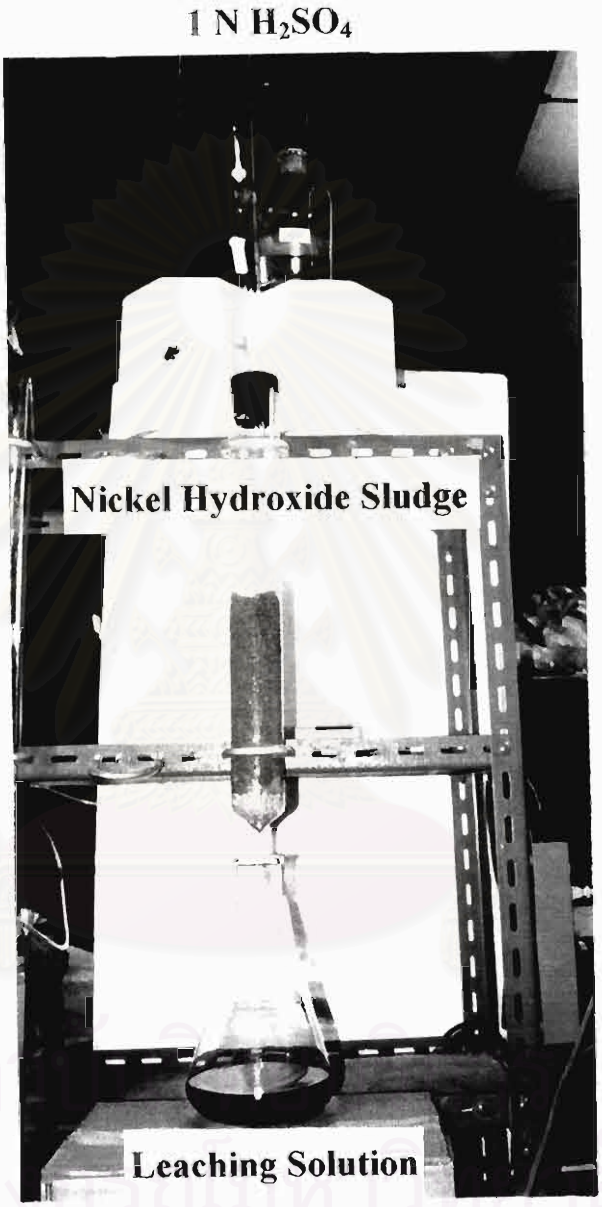
ปฏิกิริยาของการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยกรดซัลฟิวริกแสดงในสมการที่ 4.1

$$3Ni(OH)_2 + 3H_2SO_4 \longrightarrow 3NiSO_4 + 6H_2O \qquad 4.1$$

จะเห็นได้ว่า สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นสูง สามารถลิชชิ่งนิกเกิลออกมาได้ดีกว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่ำในการทดลองจะทำให้เกิดสภาวะที่มีกากตะกอนมากเกินพอสำหรับกรดซัลฟิวริก ได้ผลการทดลองดังนี้ การใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.01 0.05 0.1 และ 0.15 N สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 3 15 30 และ 46% ตามลำดับ

4.2.2 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในคอลัมน์

การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ปริมาณ 500 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิลอิออน 211.5 กรัม) ในคอลัมน์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 N ปริมาตร 1 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นสภาวะที่มีกากตะกอนมากเกินพอ พบว่าสามารถลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนได้ 28.68 กรัม/ลิตร (13.56%)



รูปที่ 4.3 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 นอร์มัล

4.3 ผลการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

4.3.1 ผลการเพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* ในสารอาหาร 9K medium

สำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในสารอาหาร 9K medium สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียพบว่า สีของสารละลายในขวดรูปชมพู่จะเป็นสีขาวขุ่นของสารอาหาร 9K medium จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2-3 วัน พบว่าสีของสารละลายในขวดรูปชมพู่เริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอำพันของตะกอนเหล็กเฟอร์ริก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

จากการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่าค่าพีเอชของสารละลายลดลงจาก 2.75 เหลือ 2.01 ภายใน 3 วัน ในขณะที่สารอาหาร 9K medium มีค่าพีเอชคงที่ประมาณ 2.8 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากเฟอร์รัสซัลเฟตซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของ *T. ferrooxidans* ถูกออกซิไดส์ไปเป็นเฟอร์ริกซัลเฟต ดังสมการที่ 4.2 จากนั้นเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และกรดซัลฟิวริก ดังสมการที่ 4.3

$$2FeSO_4 + H_2SO_4 + 1/2O_2 \xrightarrow{T.\ ferrooxidans} Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \qquad 4.2$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + 6H_2O \longrightarrow 2Fe(OH)_3 + 3H_2SO_4 \qquad 4.3$$

นอกจากนี้ผลของปฏิกิริยาข้างต้น อาจจะทำให้เกิดสารประกอบคอมเพล็กซ์ระหว่างเฟอร์ริกซัลเฟตกับเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เรียกว่า จาโรไซต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาลแดง

จากรูปที่ 4.7 ค่าโออาร์พีของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 284 mV. เป็น 460 mV. ภายใน 3 วัน ต่อจากนั้นมีค่าคงที่ประมาณ 500 mV. ในขณะที่สารละลาย 9K medium เพียงอย่างเดียวมีค่าโออาร์พีคงที่ประมาณ 150 mV.

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าผลการทดลองมีความสอดคล้องกัน ดังนี้ เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ภายใน 3 วัน ปริมาณโปรตีนซึ่งแสดงถึงปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่มีอยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 12 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 88 มิลลิกรัม/ลิตร จากนั้นปริมาณโปรตีนคงที่ประมาณ 75 มิลลิกรัม/ลิตร และเหล็กเฟอร์รัสซึ่งเป็นแหล่งอาหารของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการเพาะเลี้ยงเชื้อ ในขณะที่การออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในสารละลาย 9K medium เพียงอย่างเดียว ทำให้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายค่อยๆลดลงอย่างช้าๆสม่ำเสมอ

4.3.2 ผลการเพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในสารอาหาร thiomedium

สำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในสารอาหาร thiomedium สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้ เมื่อเริ่มต้นการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียพบว่า ผงซัลเฟอร์จะลอยอยู่ที่ผิวหน้าของสารละลายในขวดรูปชมพู่ จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 6-8 วัน สารละลายจะมีลักษณะขุ่น เนื่องจากผงซัลเฟอร์จะตกตะกอนและถูกออกซิไดส์ไปเป็นกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5

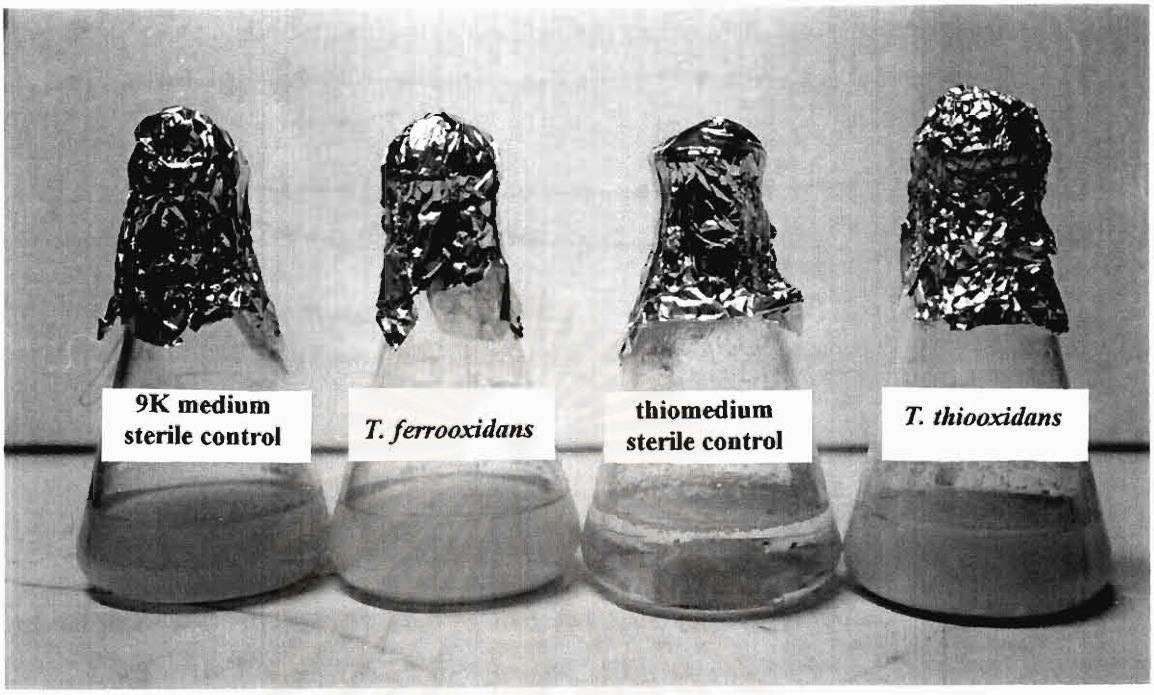
จากการทดลองพบว่า สารอาหาร thiomedium มีค่าพีเอชคงที่ประมาณ 4.2 ในขณะที่สารละลายที่มีการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* มีค่าพีเอชลดลงจาก 4.18 เหลือ 2.11 ภายใน 6 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจาก *T. thiooxidans* สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์ไปเป็นกรดซัลฟิวริกได้ดังสมการที่ 4.4

$$2S^0 + 3O_2 + 2H_2O \xrightarrow{T.\ thiooxidans} 2H_2SO_4 \qquad 4.4$$

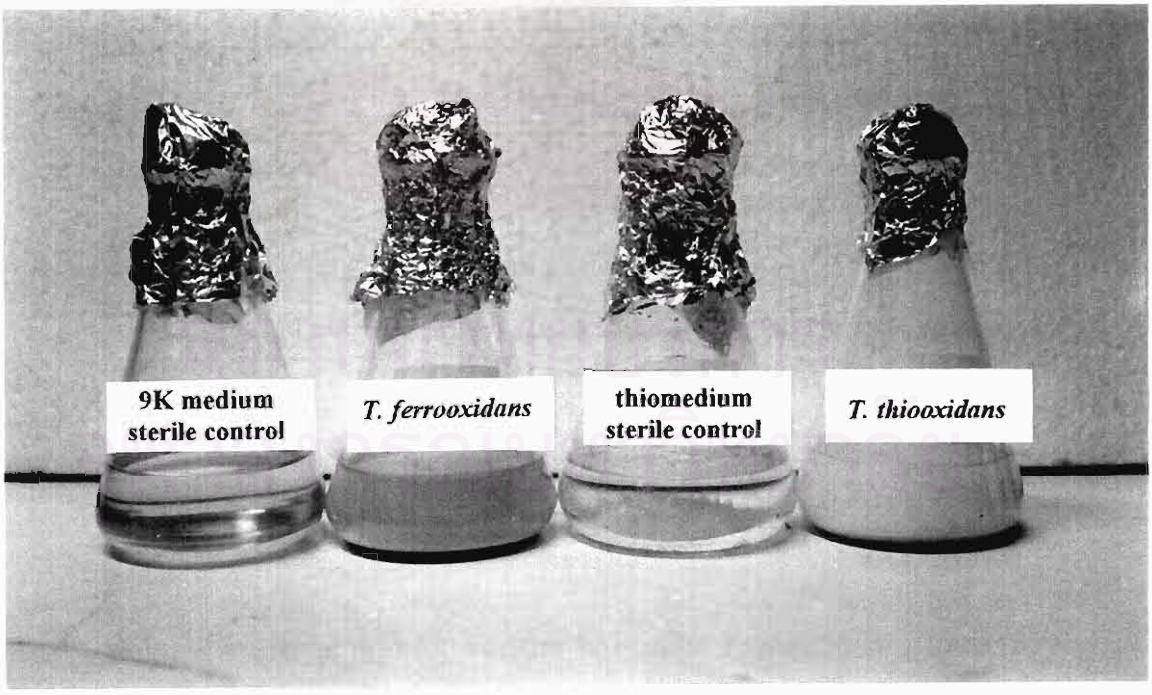
จากรูปที่ 4.7 ค่าโออาร์พีของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นจาก 265 mV. เป็น 496 mV. ภายใน 7 วัน จากนั้นมีค่าคงที่ประมาณ 500 mV. เนื่องจากกรดที่ถูกผลิตขึ้นจากการออกซิไดส์ซัลเฟอร์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* จนกระทั่งอยู่ในสภาวะกรดซึ่งเหมาะสมในการเจริญเติบโต ในขณะที่สารละลาย thiomedium เพียงอย่างเดียวมีค่าโออาร์พีคงที่ประมาณ 150 mV แสดงว่าค่าโออาร์พีมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช ดังนี้ เมื่อค่าพีเอชของระบบลดลงจะทำให้ค่าโออาร์พีเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 พบว่าเชื้อแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้เต็มที่ภายใน 8 วัน ปริมาณโปรตีนซึ่งแสดงถึงปริมาณเซลล์แบคทีเรียที่มีอยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 8 มิลลิกรัม/ลิตร เป็น 38 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วต่อจากนั้นมีค่าคงที่ประมาณ 40 มิลลิกรัม/ลิตร

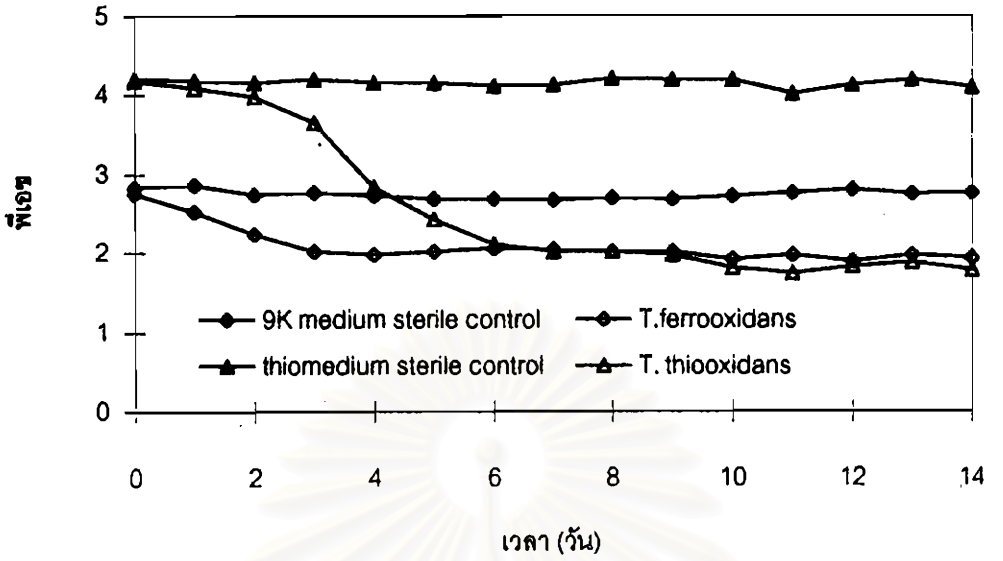
เมื่อเปรียบเทียบการเพาะเลี้ยงเชื้อทั้งสองชนิด พบว่าเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* สามารถออกซิไดส์แหล่งพลังงานเพื่อสร้างกรดได้ช้ากว่า ทำให้ค่าพีเอชของสารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียลดลงได้ช้ากว่า อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนของเชื้อ *T. thiooxidans* ภายใน 14 วัน เกิดขึ้นช้ากว่าและน้อยกว่าเชื้อ *T. ferrooxidans* ในขณะที่แบคทีเรียทั้งสองชนิดมีขนาดเซลล์ใกล้เคียงกัน คือ มีรูปร่างเป็นแท่งสั้นๆขนาดกว้าง 0.5-0.6 ไมครอน และยาว 1.0-2.0 ไมครอน แสดงว่า *T. thiooxidans* มีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้ากว่า *T. ferrooxidans*



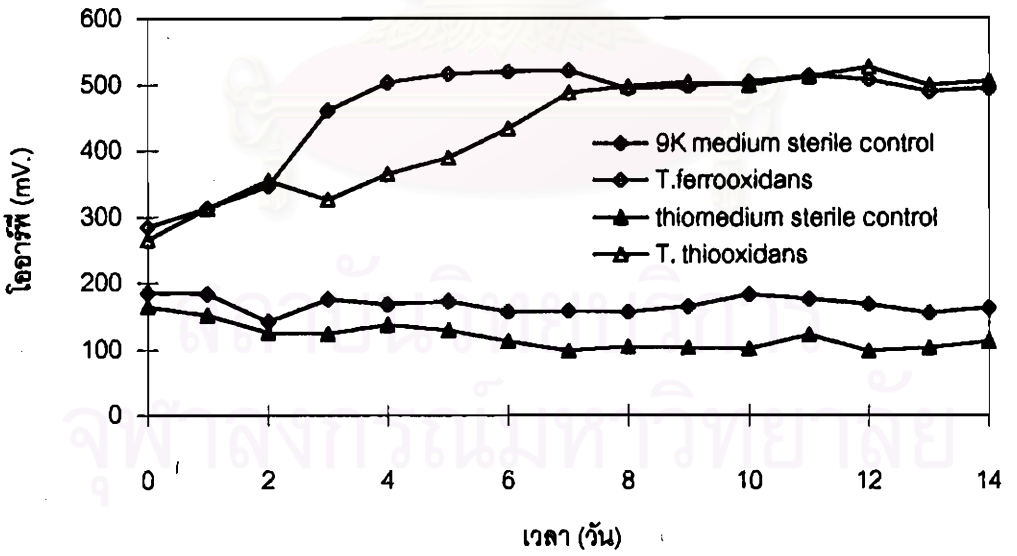
รูปที่ 4.4 วันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า



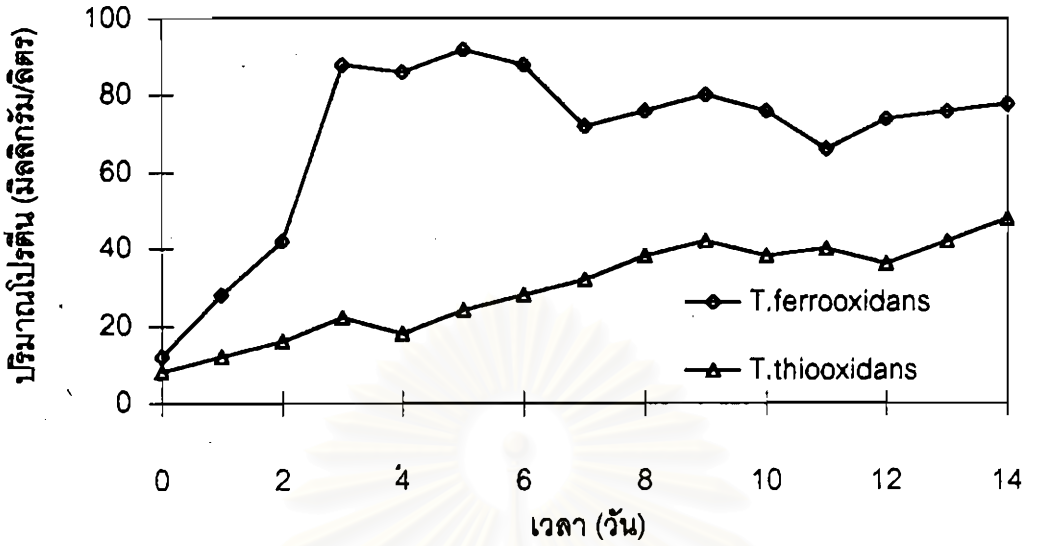
รูปที่ 4.5 วันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า



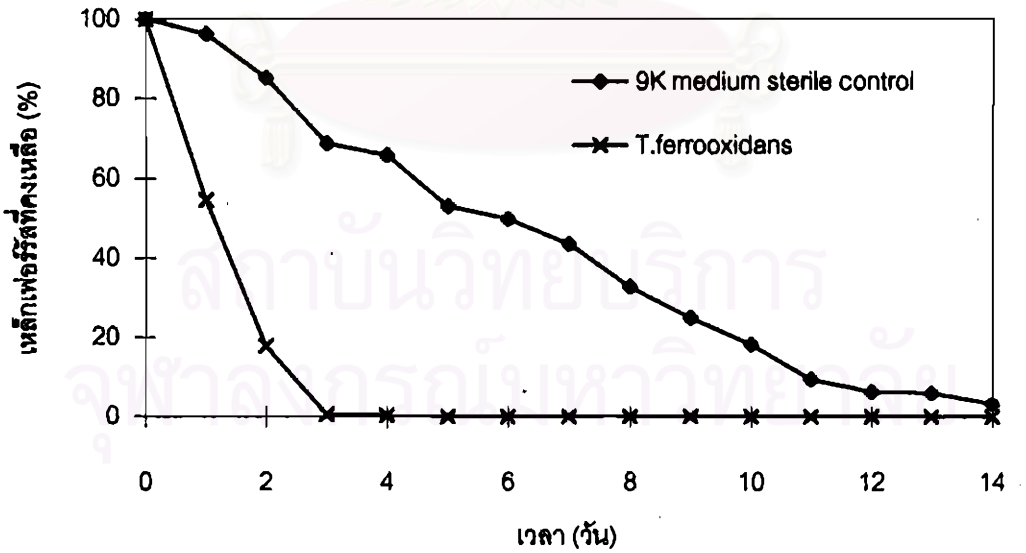
รูปที่ 4.6 ค่าพีเอชของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า



รูปที่ 4.7 ค่าโออาร์พีของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า



รูปที่ 4.8 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารละลาย thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า



รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* เปรียบเทียบกับสารละลาย 9K medium ในระบบขวดเขย่า

4.4 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า

4.4.1 ผลการปรับสภาพ *T. ferrooxidans* ให้เคยชินกับกากตะกอน

เนื่องจากกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ จึงไม่มีเหล็กเฟอร์รัสและซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จึงได้พลังงานจากการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย 9K medium ไปเป็นเหล็กเฟอริก ตามสมการที่ 4.2 ซึ่งทำให้เกิดกลไกการลิชชิ่งโดยอ้อม (Indirect method) ในสภาวะที่เป็นกรด การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนเกิดขึ้นตามสมการที่ 4.1 และ 4.3 ซึ่งดุลแล้วได้ผลรวมของสมการทั้งสองดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$3Ni(OH)_2 + Fe_2(SO_4)_3 \longrightarrow 3NiSO_4 + 2Fe(OH)_3 \qquad 4.5$$

เฟอริกอิออนจากเฟอริกซัลเฟต มีค่าคงที่เสถียร (stability constant) สูงกว่านิกเกิลอิออน จึงเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริกกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ไปเป็นตะกอนเฟอริกไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรมากขึ้น และทำให้นิกเกิลอิออนที่หลุดออกจากกากตะกอนมาจับกับซัลเฟตอิออนไปเป็นนิกเกิลซัลเฟตละลายตัวอยู่ในสารละลาย (ขวัญเรือน, 2540)

จากสมการที่ 4.5 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณนิกเกิล 43% โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในระบบขวดเขย่า พบว่ากากตะกอน 1 กรัม จะเกิดปฏิกิริยาพอดีกับ $Fe_2(SO_4)_3$ 0.97 กรัม ซึ่งเกิดจาก $FeSO_4.7H_2O$ 1.35 กรัม ที่เติมลงไปในสารอาหาร 9K medium

การปรับสภาพเชื้อโดยการเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ จะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งเชื้อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพให้เคยชินกับความเข้มข้นของกากตะกอนที่เติม จึงผลิตกรดซัลฟิวริกออกมาทำให้ค่าพีเอชของสารละลายลดต่ำลง มีค่าประมาณ 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* โดยมีการเติมกากตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเพื่อปรับสภาพเชื้อ แต่อย่างไรก็ตาม การเติมกากตะกอนปริมาณมากขึ้น แบคทีเรียจะใช้เวลานานขึ้นเพื่อปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอน ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของค่าพีเอชของสารละลายเกิดขึ้นช้าลง

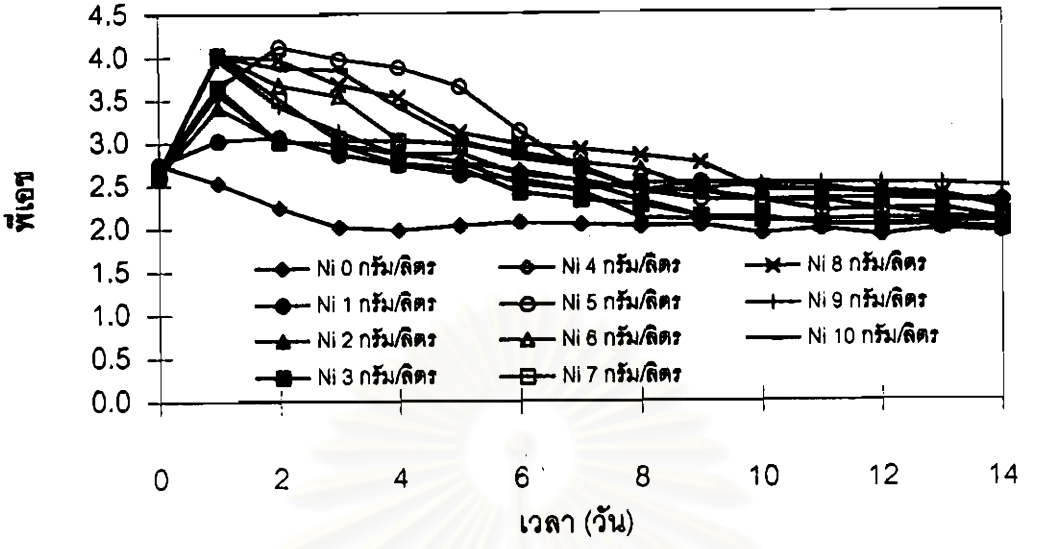
ค่าโออาร์พีของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ไม่มีการเติมกากตะกอน เพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่า 460 mV. ภายใน 3 วัน ในขณะที่สารละลายที่มีการเติมกากตะกอนนั้นต้องใช้เวลาประมาณ 5-6 วัน เพื่อให้แบคทีเรียสามารถปรับสภาพและเจริญเติบโต ค่าโออาร์พีจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 400-500 mV. ดังแสดงในรูปที่ 4.11

ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของ *T. ferrooxidans* จะมีค่าลดลงเนื่องจากถูกออกซิไดส์ไปเป็นเหล็กเฟอร์ริก ตามสมการที่ 4.2 สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ไม่มีการเติมกากตะกอน สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้หมดภายใน 3 วัน ในขณะที่สารละลายที่มีการเติมกากตะกอนนั้นต้องใช้เวลา 5 วัน แสดงว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสโดย *T. ferrooxidans* นั้นช้าลง ดังแสดงในรูปที่ 4.12

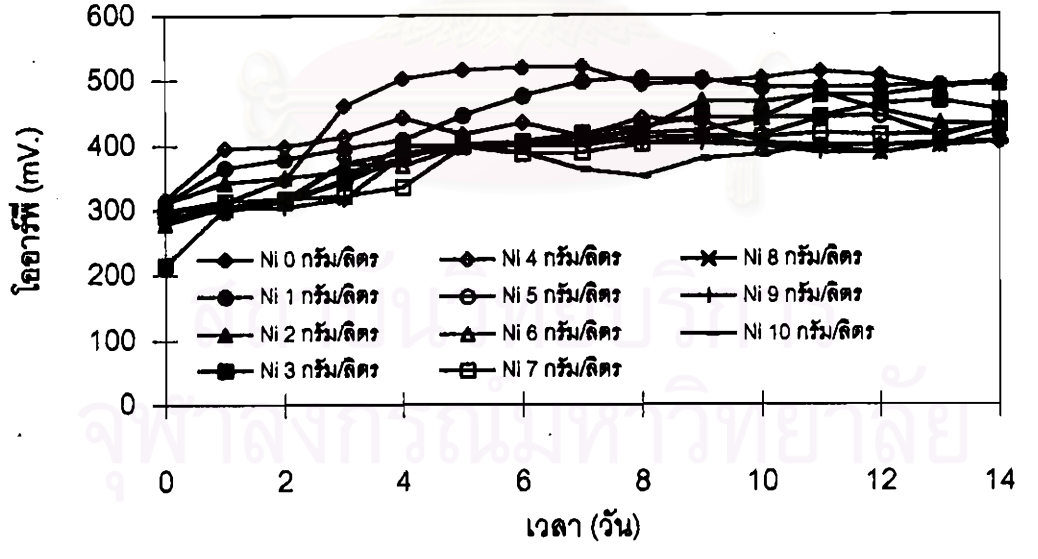
จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ต่างๆ อันได้แก่ พีเอช โออาร์พี และ ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย ล้วนบ่งชี้ว่าเชื้อ *T. ferrooxidans* ในสารละลาย 9K medium สามารถเจริญได้อย่างเต็มที่ภายใน 3 วัน แต่เมื่อมีการเติมกากตะกอนลงในสารละลายที่มีการเพาะเลี้ยงเชื้อ *T. ferrooxidans* นาน 18 ชั่วโมง พบว่าเชื้อแบคทีเรียต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 5 วัน เพื่อปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์

การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* เกิดขึ้นจาก 2 กลไกสำคัญ ดังนี้ กลไกแรกคือการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกที่ถูกสร้างขึ้นจากการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสและปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของเหล็กเฟอร์ริก ส่วนกลไกที่สองคือการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริกและกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในสภาวะกรด ซึ่งกากตะกอนนี้มีค่าพีเอชประมาณ 7 ดังนั้นการเติมกากตะกอนปริมาณน้อยจะทำให้แบคทีเรียสามารถผลิตกรดซัลฟิวริกได้เพียงพอจึงเกิดกลไกการลิชชิ่งทั้งสองแบบได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพการลิชชิ่งสูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้สารละลายมีค่าพีเอชสูงขึ้นไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและลดอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์รัสกับกากตะกอน ทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งต่ำลง

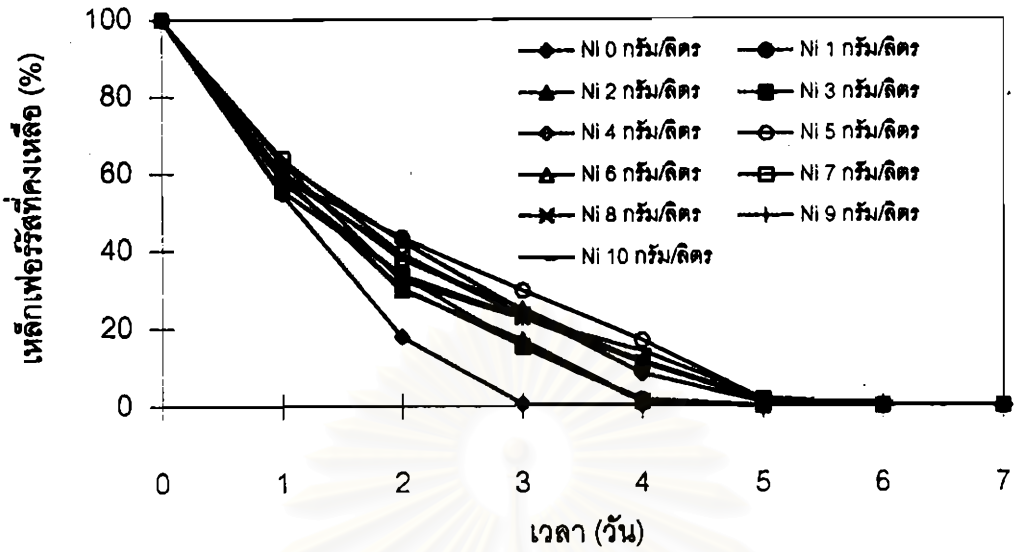
จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเติมกากตะกอนให้มีความเข้มข้นของนิกเกิลอิออน 2 กรัม/ลิตร จะได้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งประมาณ 80% แต่เมื่อเติมกากตะกอนให้มีความเข้มข้นของนิกเกิลอิออน 10 กรัม/ลิตร จะได้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งประมาณ 47% ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของการลิชชิ่งโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 N



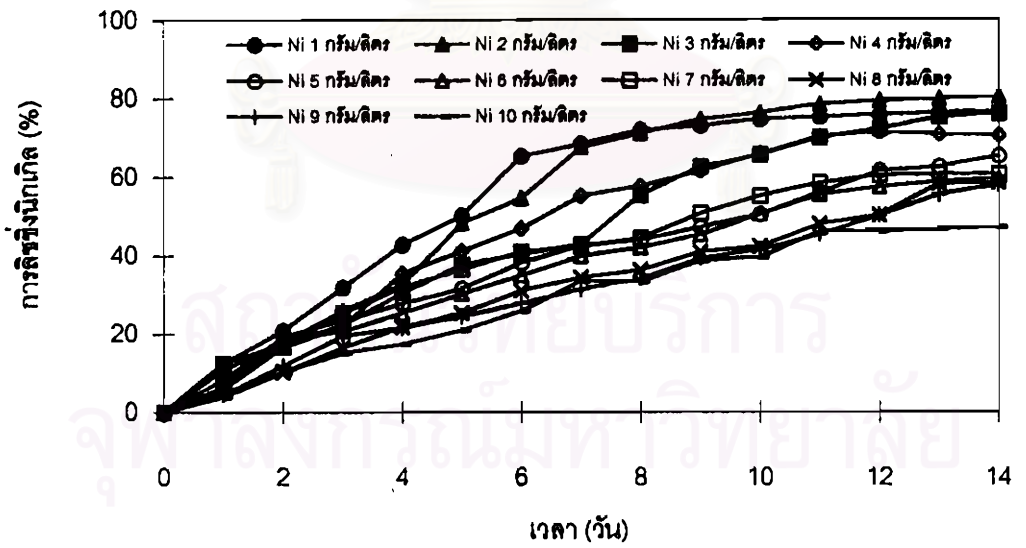
รูปที่ 4.10 พีเอชของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.11 ค่าโออาร์พีของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์เหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ผสม *T.ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.13 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ

4.4.2 ผลการปรับสภาพ *T. thiooxidans* ให้เคยชินกับกากตะกอน

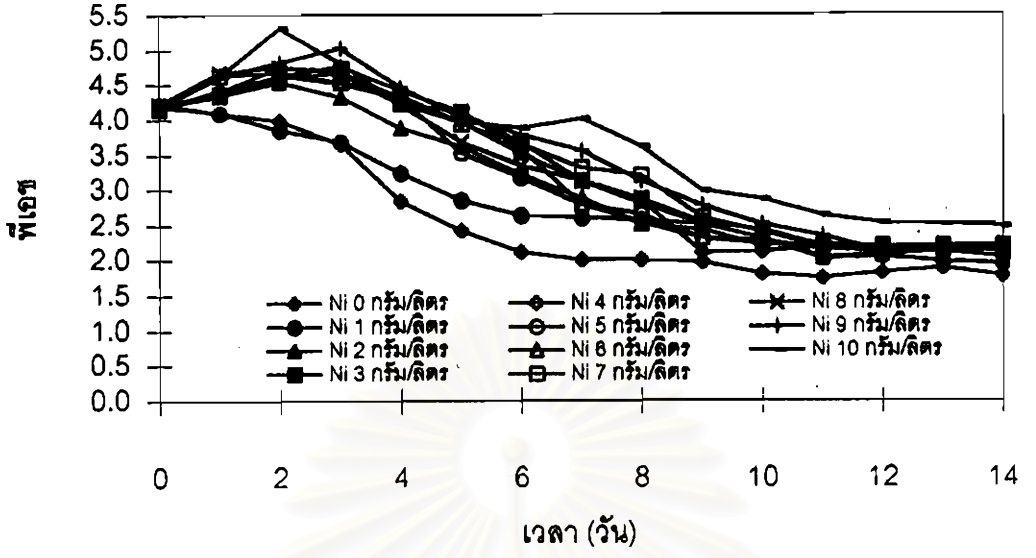
เนื่องจากกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองเป็นกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ จึงไม่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ซึ่งเกาะติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคซัลเฟอร์ในสารอาหาร thiomedium จึงออกซิไดส์ธาตุซัลเฟอร์ในสารอาหารไปเป็นกรดซัลฟิวริก ตามสมการที่ 4.4 เพื่อให้ได้พลังงาน จากนั้นกรดซัลฟิวริกที่ถูกผลิตขึ้นจะลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ซึ่งทำให้เกิดกลไกการลิชชิ่งในสภาวะที่เป็นกรด

จากรูปที่ 4.14 การเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ จะทำให้ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งเชื้อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพให้เคยชินกับความเข้มข้นของกากตะกอนที่เติม จึงสามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์ไปเป็นกรดซัลฟิวริก ทำให้ค่าพีเอชของสารละลายลดต่ำลง มีค่าประมาณ 2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของเชื้อ *T. thiooxidans* โดยมีการเติมกากตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเพื่อปรับสภาพเชื้อ แต่อย่างไรก็ตาม การเติมกากตะกอนปริมาณมากขึ้น แบคทีเรียจะใช้เวลานานขึ้นเพื่อปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอน ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของค่าพีเอชของสารละลายเกิดขึ้นช้าลง

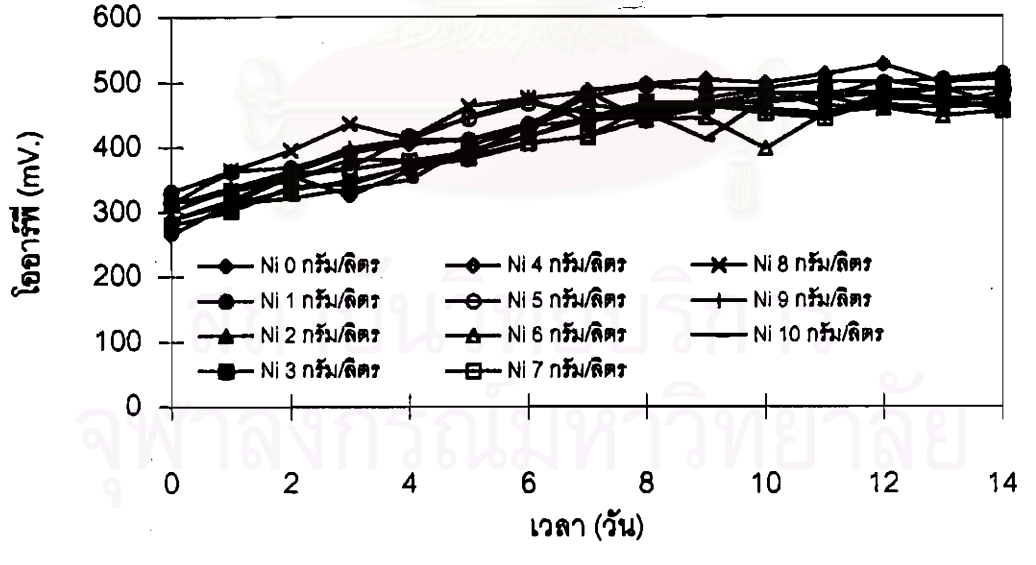
ค่าโออาร์พีของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ทั้งที่มีและไม่มีการเติมกากตะกอน จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าประมาณ 400-500 mV. ภายใน 6 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากแบคทีเรียใช้เวลานานในการปรับสภาพและเจริญเติบโต

การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* เกิดจากการออกซิไดส์ธาตุซัลเฟอร์ไปเป็นกรดซัลฟิวริก จากนั้นกรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นจะไปลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของสารละลายดังนี้ เมื่อค่าพีเอชลดลงแสดงว่าในสารละลายมีกรดเพิ่มขึ้น นิกเกิลจึงถูกลิชชิ่งออกมามากขึ้น จากรูปที่ 4.16 พบว่าการเติมกากตะกอนปริมาณน้อยจะทำให้แบคทีเรียสามารถผลิตกรดซัลฟิวริกได้เพียงพอ จึงมีประสิทธิภาพการลิชชิ่งสูง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนจะทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งต่ำลง ดังนี้ เมื่อเติมกากตะกอนที่มีนิกเกิล 1 กรัม/ลิตร จะได้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งประมาณ 73% แต่เมื่อเติมกากตะกอนที่มีนิกเกิล 10 กรัม/ลิตร จะได้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งประมาณ 47% ซึ่งใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการลิชชิ่งโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 N

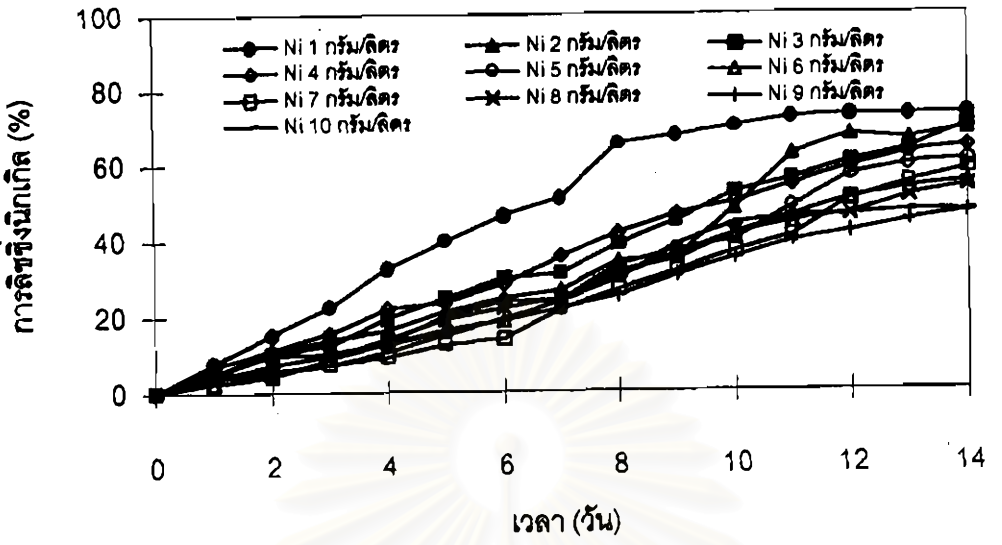
นอกจากนี้ยังพบว่า แนวโน้มของการลิชชิ่งนิกเกิลยังคงเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อ *T. thiooxidans* สามารถสร้างกรดซัลฟิวริกได้ตลอดเวลาถ้ามีซัลเฟอร์เป็นแหล่งพลังงาน



รูปที่ 4.14 พีเอชของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.15 ค่าโออาร์พีของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T.thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ

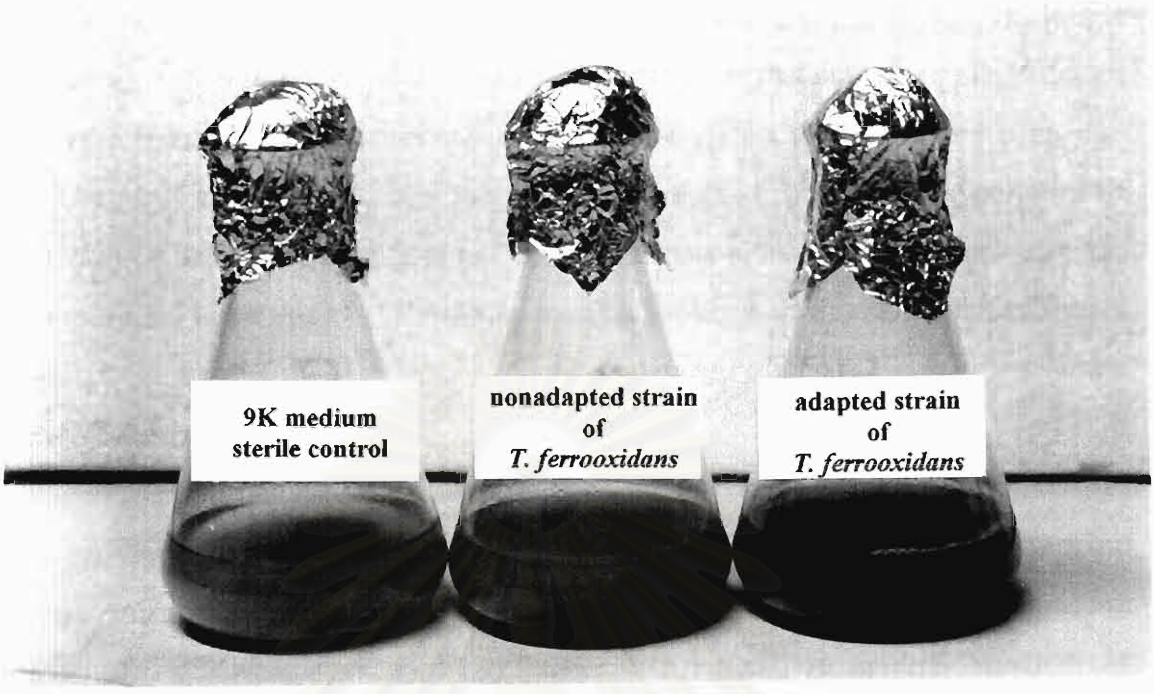


รูปที่ 4.16 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ

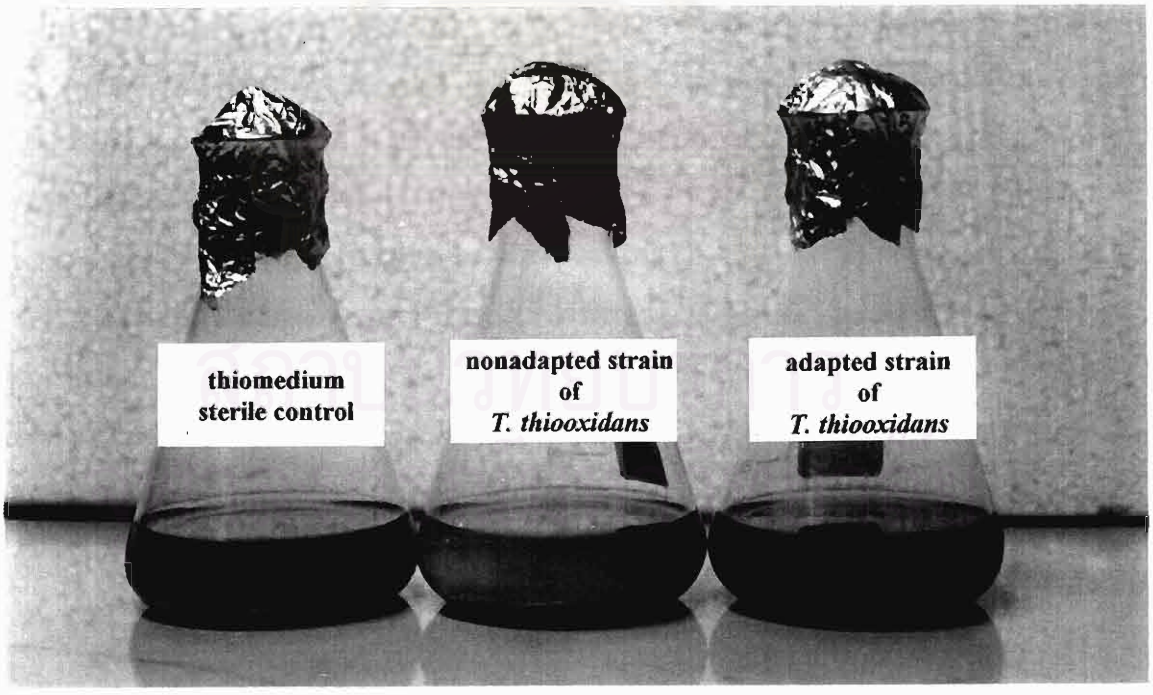
4.4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ

การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลอิออน 10 กรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายที่แตกต่างกันดังนี้ สารละลาย 9K medium สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ สารละลาย thiomedium และสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

เมื่อเติมกากตะกอนลงในสารละลายที่ต่างกันทั้ง 6 ชนิด พบว่า สารละลาย 9K medium และสารละลาย thiomedium มีค่าพีเอชที่สูงขึ้นจนกระทั่งคงที่ประมาณ 7 ในขณะที่สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าพีเอชที่สูงขึ้นในช่วง 2-3 วันแรก ต่อมาเชื้อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพได้จึงเจริญเติบโตและผลิตกรดซัลฟิวริก ทำให้สารละลายมีค่าพีเอชต่ำลงจนกระทั่งคงที่ประมาณ 2.5 ภายใน 8 วัน สำหรับสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าพีเอชที่สูงขึ้นในช่วง 2-3 วันแรกเช่นกัน ต่อมาเชื้อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพได้จึงเจริญเติบโตและผลิตกรด



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ในระบบขวดเขย่า



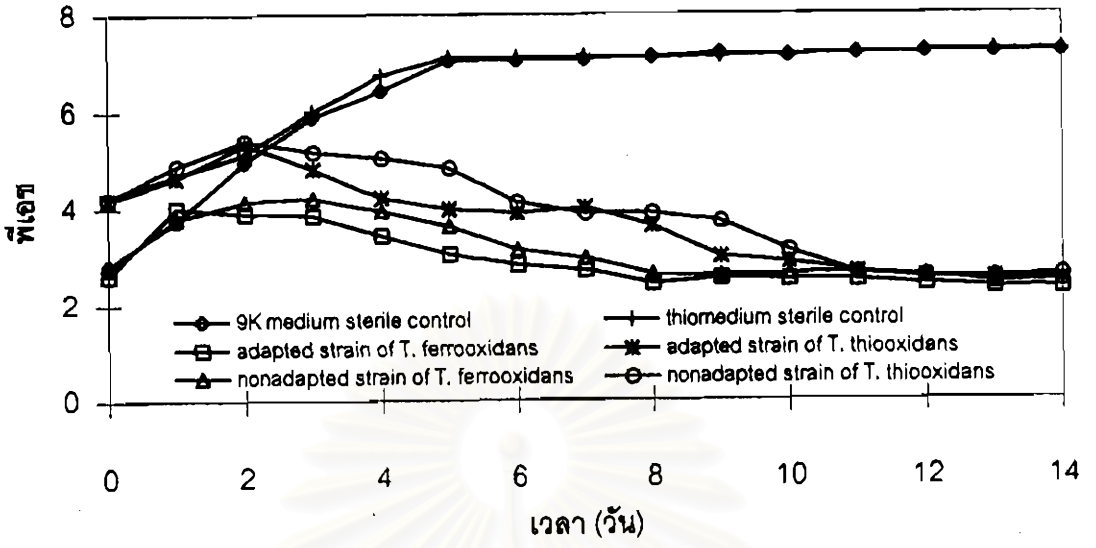
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ในระบบขวดเขย่า

ซัลฟิวริกทำให้สารละลายมีค่าพีเอชต่ำลง พีเอชมีค่าคงที่ประมาณ 2.5 ภายใน 11 วัน โดยเชื้อแบคทีเรียทั้ง *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว จะมีแนวโน้มการลดลงของค่าพีเอชดีกว่าเชื้อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.19

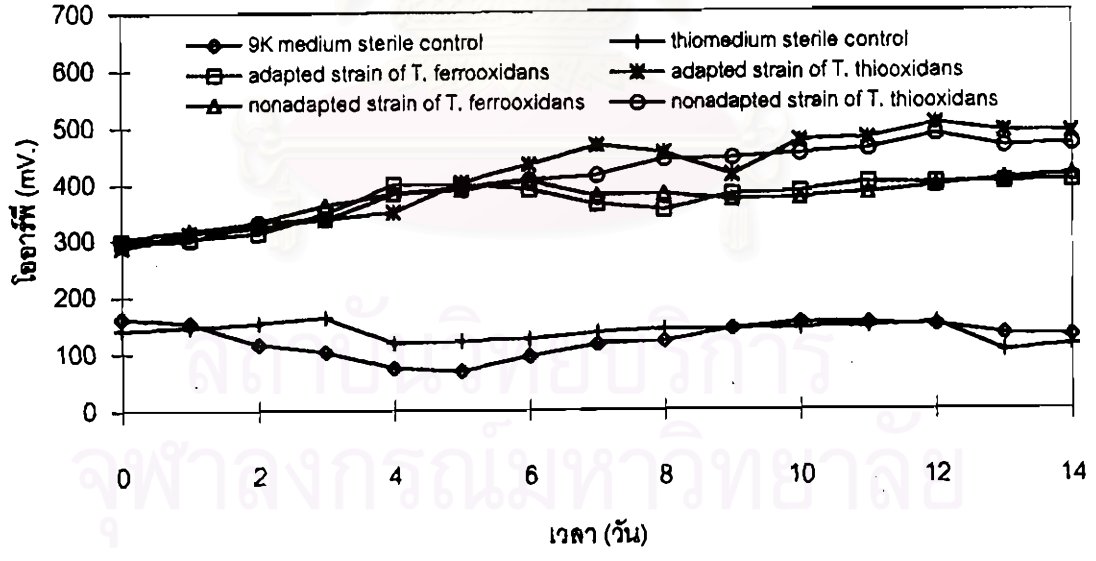
จากรูปที่ 4.20 ค่าโออาร์พีของสารละลาย 9K medium และสารละลาย thiomedium มีค่าประมาณ 100-200 mV. ตลอดการทดลอง ในขณะที่สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ มีค่าโออาร์พีสูงขึ้นเรื่อยๆ จากค่าเริ่มต้นประมาณ 300 mV. เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งคงที่ประมาณ 400-500 mV.

การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพในระยะ 3 วันแรก มีค่าใกล้เคียงกันเพราะต่างต้องการเวลาสำหรับการเจริญเติบโตในสารอาหารใหม่ แต่หลังจากนั้นพบว่าเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งวัดปริมาณโปรตีนในสารละลายได้ 60 มิลลิกรัม/ลิตร ภายใน 8 วัน ในขณะที่การเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จนกระทั่งวัดปริมาณโปรตีนในสารละลายได้ 60 มิลลิกรัม/ลิตร ภายใน 12 วัน สำหรับแนวโน้มการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพในระยะ 7 วันแรก มีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเริ่มมีความแตกต่าง โดยเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพมีการเจริญเติบโตสูงกว่าเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเล็กน้อย ทั้งคู่สามารถวัดปริมาณโปรตีนในสารละลายได้ประมาณ 20-30 มิลลิกรัม/ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.21 แสดงว่าการปรับสภาพเชื้อทำให้เชื้อมีความเคยชินและทนต่อพิษของนิกเกิลได้ดี จึงเจริญเติบโตได้เร็วกว่าและมากกว่า

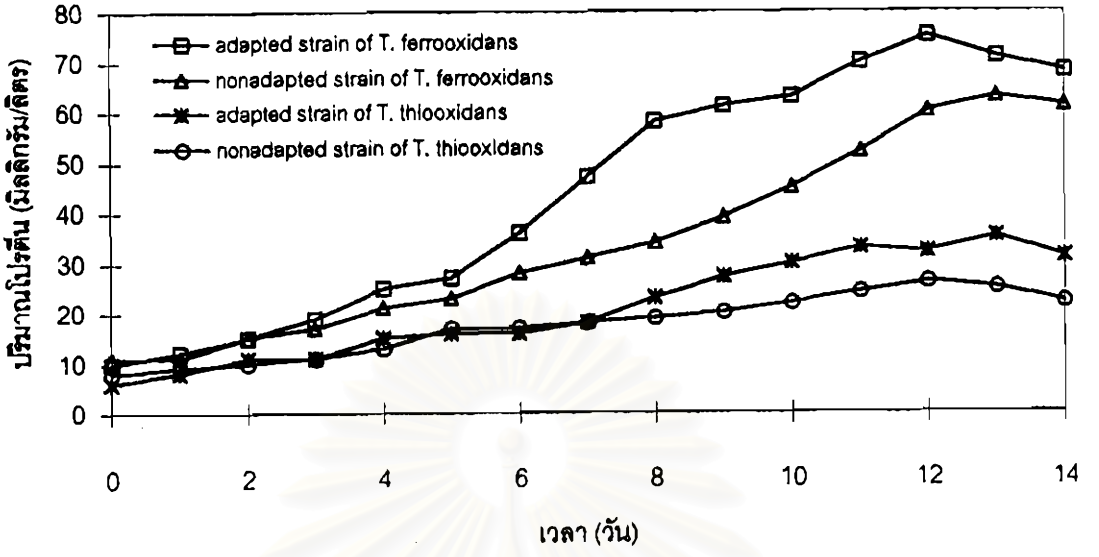
จากรูปที่ 4.22 ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย 9K medium มีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอ เพราะเกิดการออกซิไดส์ตามธรรมชาติ ในขณะที่สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* เกิดการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสจาก 2 อย่างคือ การออกซิไดส์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และการออกซิไดส์โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ซึ่งการออกซิไดส์โดยเชื้อแบคทีเรียเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งหมดภายใน 6 วันสำหรับสารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว และหมดภายใน 9 วันสำหรับสารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



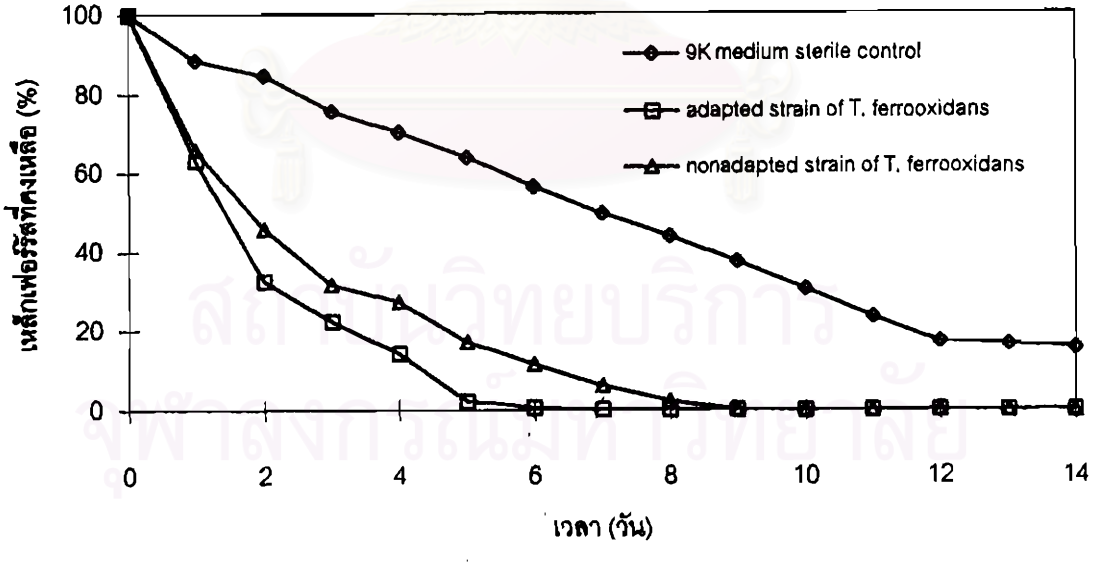
รูปที่ 4.19 ค่าพีเอชของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า



รูปที่ 4.20 ค่าโออาร์พีของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า



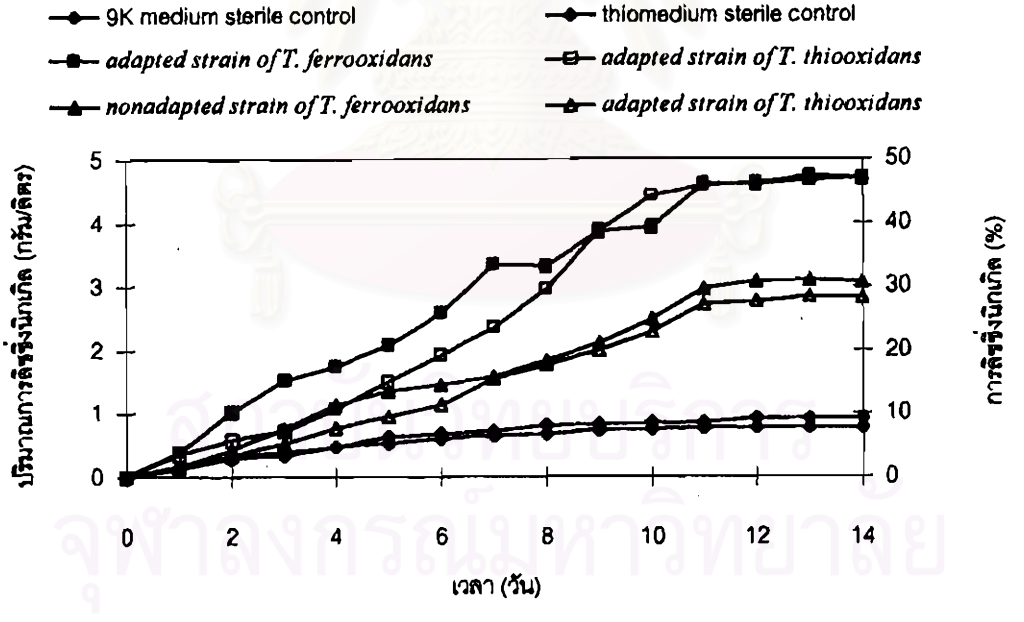
รูปที่ 4.21 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารละลาย thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า



รูปที่ 4.22 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยงเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium ในระบบขวดเขย่า

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลอิออน 10 กรัม/ลิตร โดยเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพ สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และสารละลาย 9K medium มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งนิกเกิล 47% 31% และ 9% ตามลำดับ สำหรับสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพ สารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และสารละลาย thiomedium มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งนิกเกิล 47% 28% และ 8% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการลิชชิ่งของเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพทั้งสองชนิด พบว่าช่วงแรก *T. ferrooxidans* มีประสิทธิภาพดีกว่า จนกระทั่งวันที่ 11 เชื้อทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพเท่ากัน ส่วนการลิชชิ่งของเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่าช่วงแรก *T. ferrooxidans* มีประสิทธิภาพดีกว่าเช่นกัน จนกระทั่งวันที่ 7 เชื้อทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ต้องการระยะเวลาในการปรับสภาพและเจริญเติบโตนานกว่า



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ

4.5 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ

กระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์มีความแตกต่างจากกระบวนการลิชชิ่งในระบบขวดเขย่าหลายประการ เช่น ข้อจำกัดในการแพร่กระจายของกากตะกอนในคอลัมน์ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการลิชชิ่งต่ำกว่าการลิชชิ่งในระบบขวดเขย่า การทดลองในระบบขวดเขย่าใช้กากตะกอนที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 80 mesh ในขณะที่การทดลองในคอลัมน์ใช้กากตะกอนที่มีขนาดอนุภาค 20-40 mesh เพื่อป้องกันการอัดตัวทับถมกันของกากตะกอนอาจทำให้เกิดการอุดตันในคอลัมน์ การตกตะกอนของเหล็กในคอลัมน์ไปปกคลุมผิวของกากตะกอนทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการลิชชิ่งลดลง และอัตราการไหลของสารละลายซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับตัวอย่างกากตะกอนในคอลัมน์ ล้วนเป็นปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการลิชชิ่งในคอลัมน์

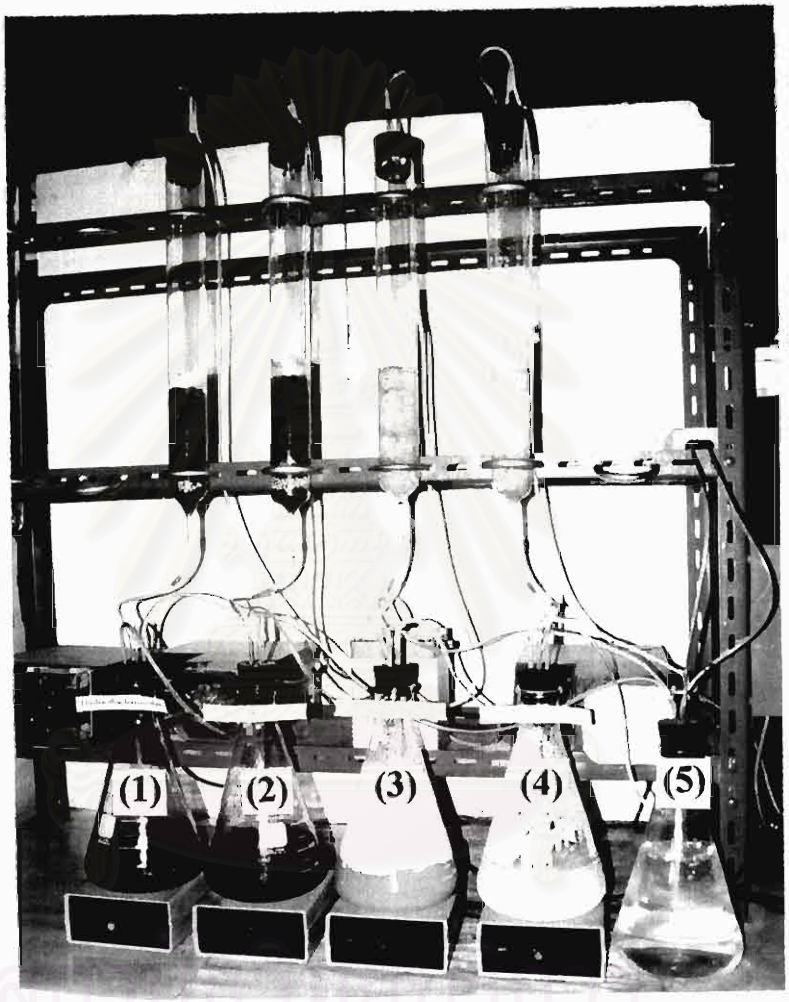
สำหรับการศึกษากระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้เชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว แสดงในรูปที่ 4.24

4.5.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการลิชชิ่งโดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 1-14 แปรค่า อัตราการไหล ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย และปริมาณกากตะกอนในคอลัมน์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans*

ทำการทดลองโดยควบคุมพีเอชของสารละลายก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ให้มีค่าประมาณ 2.5-3.0 ทุกวันด้วย 5N H_2SO_4 เมื่อสารละลายไหลผ่านกากตะกอนซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 7 ทำให้ค่าพีเอชที่ทางไหลออกจากคอลัมน์มีค่าประมาณ 6.0 - 7.5

สำหรับค่าโออาร์พีของสารละลายที่ทางไหลเข้าสู่คอลัมน์มีแนวโน้มลดลงจาก 500 mV. เหลือประมาณ 200 mV. เนื่องจากปริมาณเชื้อแบคทีเรียในสารละลายลดลงจนกระทั่งสารละลายไม่มีการผลิตกรดซัลฟิวริกสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิล สำหรับค่าโออาร์พีของสารละลายที่ทางไหลออกจากคอลัมน์มีค่าประมาณ 100-200 mV. เนื่องจากปฏิกิริยาการลิชชิ่งเกิดขึ้นในคอลัมน์ทำให้สารละลายที่ออกมามีค่าโออาร์พีต่ำ แต่อย่างไรก็ตามค่าโออาร์พีทางเข้าจะสูงกว่าค่าโออาร์พีทางออก ทั้งนี้เนื่องจากมีการเติม 5N H_2SO_4 ในสารละลายเพื่อควบคุมค่าพีเอชให้มีสภาวะเป็นกรด และมีการเติมอากาศให้แก่สารละลายในภาชนะบรรจุอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 4.24 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้เชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ ดังนี้ (1) *T. ferrooxidans* ใน 9K medium (2) 9K medium (3) *T. thiooxidans* ใน thiomedium (4) thiomedium (5) น้ำกลั่น

ปริมาณโปรตีนและปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 10 วันแรกของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียเกาะติดอยู่กับอนุภาคเหล็กซึ่งเป็นแหล่งอาหารไปตกตะกอนอยู่ในคอลัมน์ สามารถสังเกตเห็นสีน้ำตาลแดงของตะกอนเหล็กได้ตลอดความสูงของคอลัมน์ จากสถานการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดกลไกการลิชชิ่งโดยอ้อม ดังนี้ เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ในคอลัมน์ออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกตามสมการที่ 4.2 และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นตามสมการที่ 4.3 จากนั้นเหล็กเฟอร์ริกเกิดปฏิกิริยากับธาตุอาหารต่างๆ ดังสมการที่ 4.6 และในสภาวะกรดจะเกิดกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน ดังสมการที่ 4.7

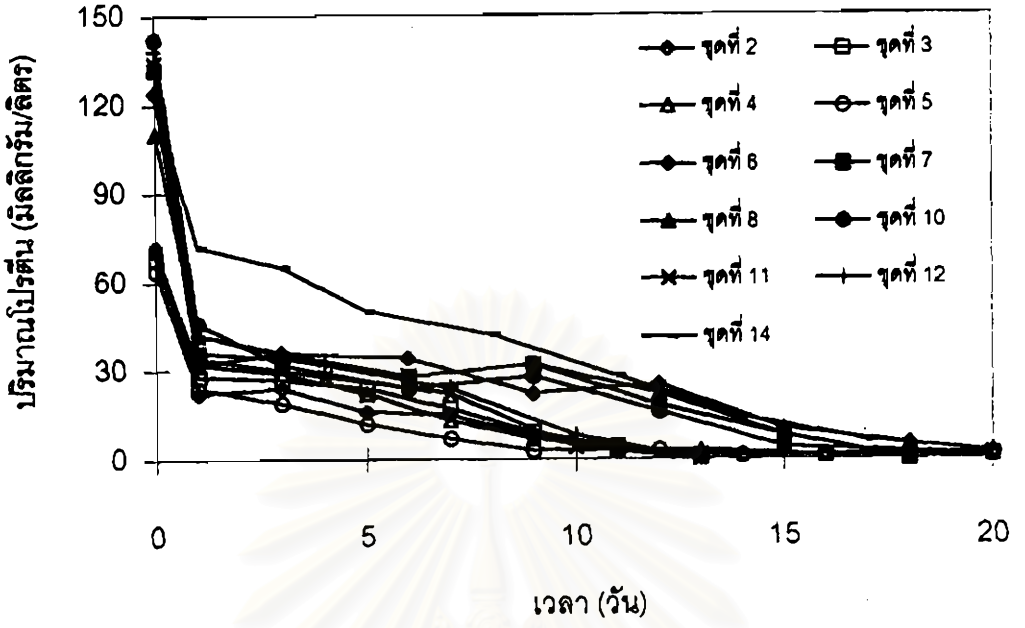
$$2Fe(OH)_3 + 10H_2O + 5SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + xA \rightarrow A_xFe_2CO_3(OH)_{16} + 5H_2SO_4 \qquad 4.6$$

$$5Ni(OH)_2 + 2Fe(OH)_3 + 5SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + xA \rightarrow A_xFe_2CO_3(OH)_{16} + 5NiSO_4 \qquad 4.7$$

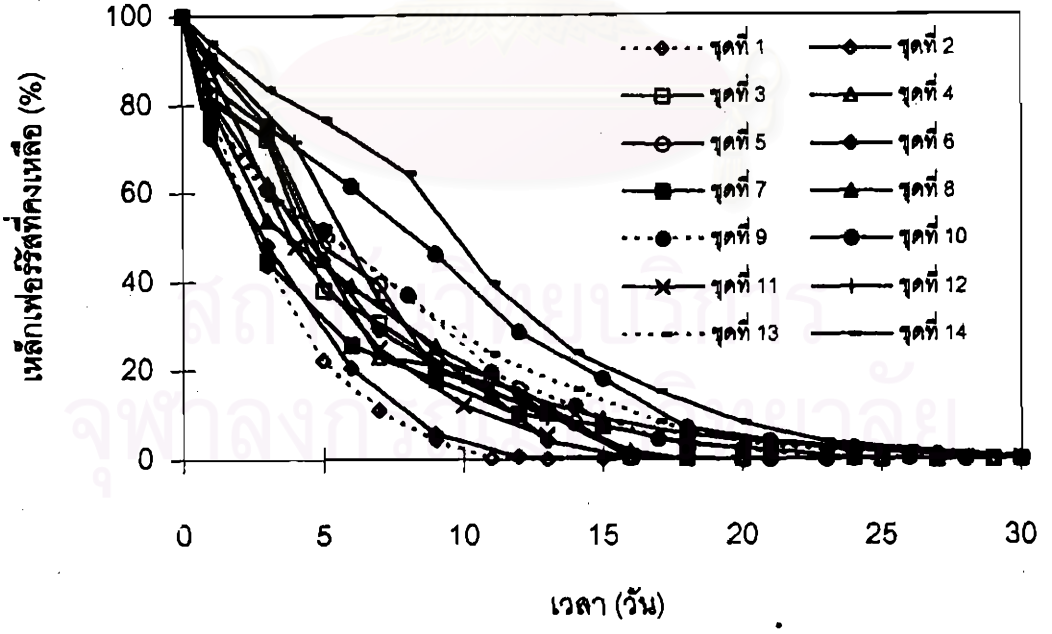
เมื่อ A แทนอิออนของธาตุในสารอาหาร 9K medium ดังนี้ K^+ NH_4^+ จะได้ค่า x เท่ากับ 12 และ Mg^{2+} จะได้ค่า x เท่ากับ 6

นำตัวอย่างกากตะกอนในคอลัมน์ที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งแล้วมาบดและคัดขนาดให้เล็กกว่า 80 mesh จากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยวิธี X-Ray Diffraction เพื่อหาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เรย์ พบว่ามีสารประกอบ $Mg_6Fe_2CO_3(OH)_{16}.4H_2O$ (จากผนวก ก รูปที่ ผ-2) ซึ่งตะกอนสีน้ำตาลแดงของสารประกอบดังกล่าวจะไปจับที่ผิวของกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับปฏิกิริยาการลิชชิ่งลดลง และตะกอนเหล็กที่ปกคลุมบนผิวกากตะกอนจะทำให้ช่องว่างในคอลัมน์ลดลง อาจทำให้เกิดการอุดตันในคอลัมน์อีกด้วย

เนื่องจากพีเอชของกากตะกอนในคอลัมน์มีค่าประมาณ 7 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการดำรงชีวิตของ *T. ferrooxidans* จึงทำการตรวจสอบเพื่อยืนยันว่า เชื้อ *T. ferrooxidans* ที่กระจายตัวอยู่ที่ผิวกากตะกอนในคอลัมน์นั้นยังคงเป็นเชื้อที่มีชีวิตอยู่ โดยการสุ่มตัวอย่างกากตะกอนในคอลัมน์ที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งแล้วปริมาณ 1 กรัม (น้ำหนักกากตะกอนแห้ง) นำมาเขย่าในน้ำกลั่นที่ทราบปริมาตรและปรับค่าพีเอชเป็น 2.8 จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ของ *T. ferrooxidans* ที่เจริญบนอาหารแข็ง FeTSB ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์



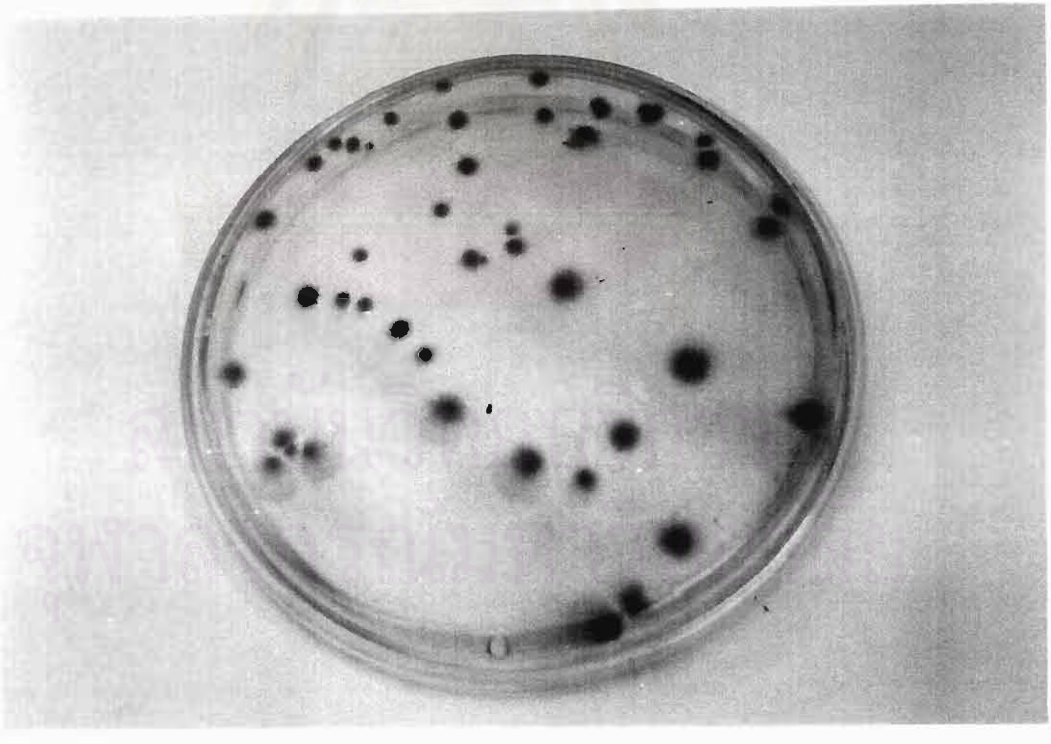
รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อ *T. ferrooxidans*

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่กระจายตัวอยู่ในกากตะกอนที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์

ชุดที่	ปริมาณแบคทีเรียในสารละลายก่อนการลิชชิ่ง			เหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย (กรัม/ลิตร)	เชื้อ *T. ferrooxidans* ที่กระจายตัวในกากตะกอนหลังการลิชชิ่ง (เซลล์ต่อกรัมกากตะกอน)
	ปริมาณเชื้อ %(v/v)	ปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัม/ลิตร)	จำนวนแบคทีเรีย (เซลล์/มิลลิลิตร)		
4	10	71	5.3×10^{6}	4	2.0×10^{4}
6	20	124	9.3×10^{5}	4	2.3×10^{4}
7	20	132	9.8×10^{5}	10	2.8×10^{4}
8	20	110	9.2×10^{5}	20	4.3×10^{4}
10	20	142	1.1×10^{6}	30	8.7×10^{4}

หมายเหตุ 1. ใช้สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ไหลผ่านกากตะกอนปริมาณ 500 กรัมในคอลัมน์ ที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม.

2. จำนวนแบคทีเรีย(เซลล์/มิลลิลิตร) พิจารณาจากรูปที่ ผ-3 ภาคผนวก ก

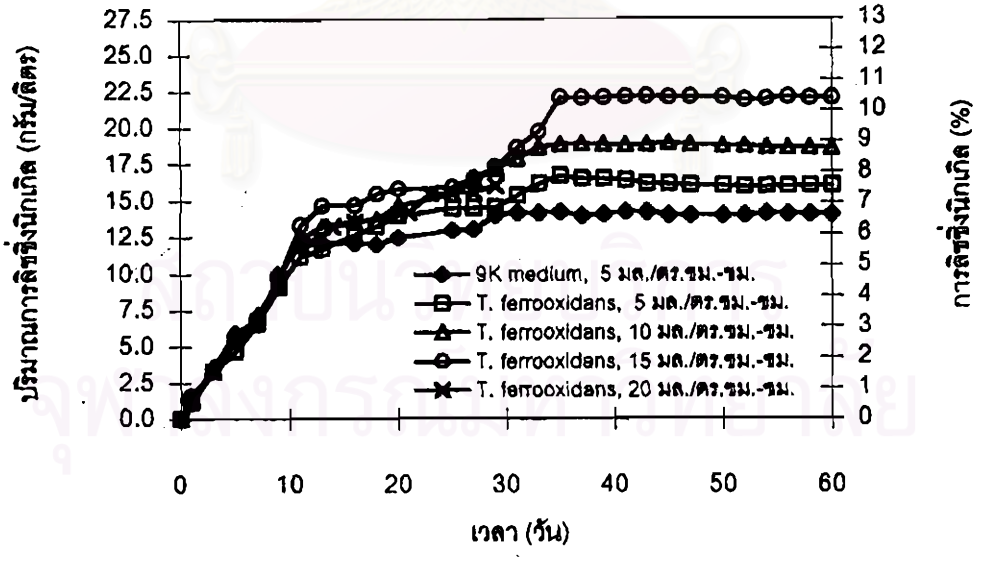


รูปที่ 4.27 เชื้อ *T. ferrooxidans* ที่เจริญบนอาหารแข็ง FeTSB

4.5.1.1 อัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 การทดลองในชุดที่ 2 3 4 และ 5 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 500 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 211.5 กรัม) และมีการให้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* 10%(v/v) ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 72 68 71 และ 64 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ไหลผ่านกากตะกอนที่บรรจุในคอลัมน์ โดยแปรค่าอัตราการไหลจำนวน 4 ค่าได้แก่ 5 10 15 และ 20 มล./ตร.ซม.-ชม. ตามลำดับ โดยมีการทดลองในชุดที่ 1 เป็นชุดคอลัมน์ควบคุม ใช้สารอาหารละลาย 9K medium เพียงอย่างเดียวที่อัตราการไหล 5 มล./ตร.ซม.-ชม.

การแปรค่าอัตราการไหลในช่วง 0.2-0.9 มล./ตร.ซม.-ชม. พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายมวลของปฏิกิริยาการลิชชิ่งมากขึ้น นั่นคือปริมาณการลิชชิ่งเพิ่มขึ้น (จุไรรัตน์, 2538) ในขณะที่การแปรค่าอัตราการไหลในช่วง 0.3-6.9 มล./ตร.ซม.-ชม. พบว่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาเก็บกักสารละลายไว้ในคอลัมน์สั้นลง ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียสามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้น้อยลง ดังนั้นปริมาณการลิชชิ่งลดลง (Neuberg และคณะ,1991) จากผลการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่า การเพิ่มอัตราการไหลในช่วงต่ำทำให้ปริมาณการลิชชิ่งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลในช่วงสูงทำให้ปริมาณการลิชชิ่งลดลง ดังนั้นจึงทำการศึกษาหาอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่อัตราการไหลต่างๆ และสารอาหาร 9K medium ที่อัตราการไหล 5 มล./ตร.ซม.-ชม.

จากรูปที่ 4.28 พบว่าปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 วันแรก โดยคอลัมน์ที่มีและไม่มีเชื้อแบคทีเรีย ที่อัตราการไหลต่างๆนั้นสามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ไม่แตกต่างกัน เพราะเชื้อแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่กับอนุภาคเหล็กที่ตกตะกอนในคอลัมน์นั้น ต้องการระยะเวลาสำหรับการปรับสภาพให้เคยชินกับสภาวะแวดล้อมใหม่ที่มีความเป็นพิษของโลหะนิกเกิลสูง ดังนั้นในช่วงแรกผลการลิชชิ่งนิกเกิลส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกรดซัลฟิวริกที่เติมลงในสารละลายเพื่อควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

หลังจากวันที่ 10 ของการลิชชิ่ง สามารถสังเกตุเห็นความแตกต่างของผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยคอลัมน์ที่มีและไม่มีเชื้อแบคทีเรีย ที่อัตราการไหลต่างๆ ได้อย่างชัดเจน โดยที่คอลัมน์ที่มีเชื้อแบคทีเรียสามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ดีกว่าคอลัมน์ที่ไม่มีเชื้อ ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียที่เกาะติดอยู่กับอนุภาคเหล็กที่ตกตะกอนในคอลัมน์สามารถเจริญเติบโตโดยการออกซิไดส์เหล็กและผลิตกรดซัลฟิวริกได้ จึงเพิ่มปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริกกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์

หลังจากวันที่ 20 ของการลิชชิ่ง พบว่าปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งวันที่ 30 ของการทดลอง มีการเติมธาตุที่เป็นสารอาหารในปริมาณเทียบเท่ากับสารอาหาร 9K medium ยกเว้นไม่มีการเติมเหล็กเฟอร์รัสเพิ่มในระบบ ซึ่งทำให้การลิชชิ่งนิกเกิลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 7 วันหลังจากเติมสารอาหาร จากนั้นการลิชชิ่งนิกเกิลค่อนข้างคงที่อีกครั้ง

จนกระทั่งวันที่ 60 ของการทดลอง พิจารณาผลการลิชชิ่งในคอลัมน์ที่มีและไม่มีเชื้อแบคทีเรีย ที่อัตราการไหล 5 มล./ตร.ซม.-ชม. พบว่า คอลัมน์ที่มีเชื้อแบคทีเรียสามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 16,035 มิลลิกรัม/ลิตร (7.58%) ในขณะที่คอลัมน์ควบคุมที่ไม่มีเชื้อแบคทีเรียลิชชิ่งนิกเกิลได้ 14,050 มิลลิกรัม/ลิตร (6.64%) แสดงว่าแบคทีเรียมีผลทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลเพิ่มขึ้น

พิจารณาผลการลิชชิ่งในคอลัมน์ที่มีเชื้อแบคทีเรียที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลเพิ่มขึ้น ดังนี้ อัตราการไหล 10 และ 15 มล./ตร.ซม.-ชม. สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 18,574 มิลลิกรัม/ลิตร (8.78%) และ 22,043 มิลลิกรัม/ลิตร (10.42%) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ที่อัตราการไหล 20 มล./ตร.ซม.-ชม. มีแนวโน้มในการลิชชิ่งนิกเกิลได้น้อยลง เนื่องจากอัตราการไหลที่เร็วเกินไปจะทำให้การเกาะติดผิวของแบคทีเรียไม่แน่นพอจึงเกิดการออกซิไดส์เหล็กเพื่อผลิตกรดซัลฟิวริกน้อยลง อีกทั้งระยะเวลาที่สารละลายสัมผัสกับกากตะกอนนั้นสั้นเกินไปทำให้การถ่ายเทมวลของปฏิกิริยาการลิชชิ่งนิกเกิลน้อยลง

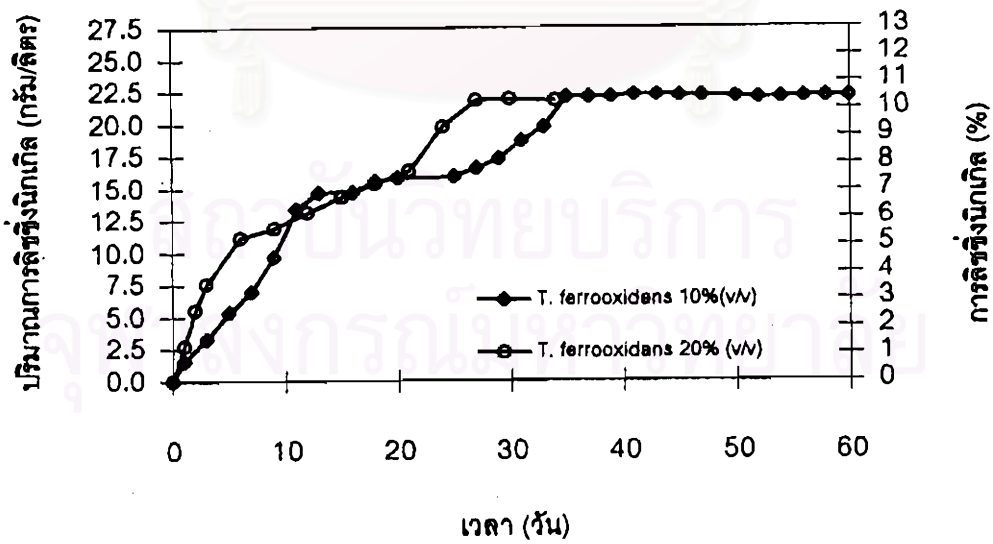
ดังนั้นอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* คือ 15 มล./ตร.ซม.-ชม.

4.5.1.2 ปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งโดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 4 และ 6 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 500 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 211.5 กรัม) และมีการให้สารอาหาร 9K medium ผสมแบคทีเรีย ไหลผ่านไปบนกากตะกอน โดยแปรค่าปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นเป็น 10%(v/v) และ 20%(v/v) ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 71 และ 124 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลของสารละลายที่ 15 มล./ตร.ซม.-ชม.

จากรูปที่ 4.29 พบว่าการเพิ่มปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการลิชชิ่งในช่วงแรกเร็วขึ้น เพราะปริมาณเชื้อเริ่มต้นมากกว่าจะทำให้มีการเจริญเติบโตได้เร็วกว่า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปมากกว่า 30 วัน อนุภาคเหล็กซึ่งเป็นแหล่งอาหารมีปริมาณจำกัด ทำให้ผลสุดท้ายมีปริมาณแบคทีเรียกระจายตัวอยู่ในคอลัมน์ใกล้เคียงกันคือ 2.0×10^4 และ 2.3×10^4 เซลล์ต่อกรัมกากตะกอน สำหรับปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10%(v/v) และ 20%(v/v) ตามลำดับ ทำให้ทั้งสองคอลัมน์มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งนิกเกิลที่ใกล้เคียงกัน ดังนี้ ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10%(v/v) ลิชชิ่งนิกเกิลได้ 22,043 มิลลิกรัม/ลิตร (10.42%) ในการทดลองวันที่ 37 และปริมาตรเชื้อเริ่มต้น 20%(v/v) ลิชชิ่งนิกเกิลได้ 22,098 มิลลิกรัม/ลิตร (10.45%) ในการทดลองวันที่ 34

ดังนั้นปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* คือ 20%(v/v)

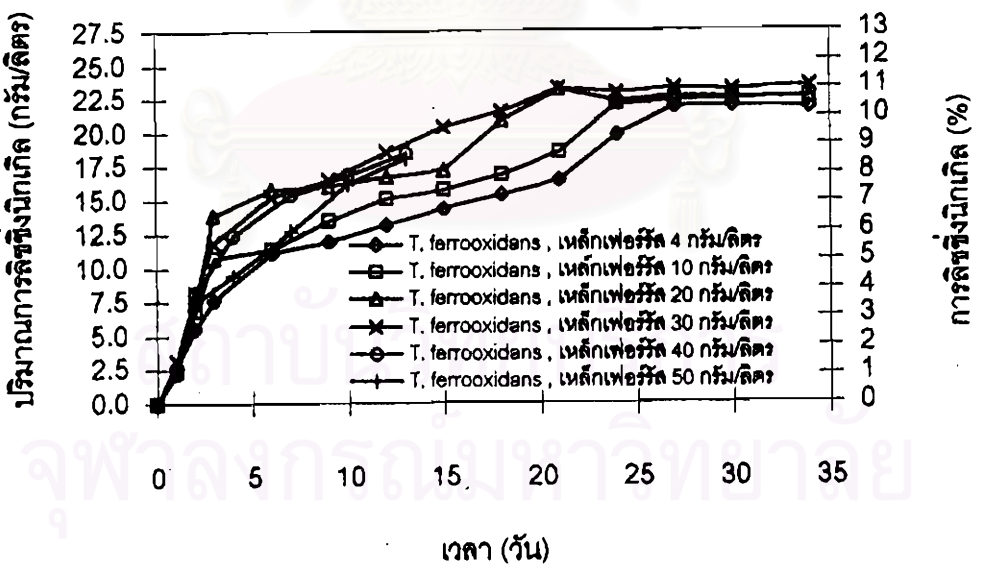


รูปที่ 4.29 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน

4.5.1.3 ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งโดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 6 7 8 10 11 และ 12 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 500 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 211.5 กรัม) และมีการให้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* 20 %(v/v) ปริมาตร 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 124 132 110 142 134 และ 138 มิลลิกรัม/ลิตร ไหลผ่านไปบนกากตะกอนที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. โดยแปรค่าปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย จำนวน 6 ค่าดังนี้ 4 10 20 30 40 และ 50 กรัม/ลิตร ตามลำดับ

ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่ต่างกันทำให้ช่วงแรกของการทดลองมีปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ในช่วงแรกของการทดลอง การเพิ่มปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายทำให้เชื้อแบคทีเรียมีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งเพิ่มขึ้น แต่การทดลองโดยใช้ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 40 และ 50 กรัม/ลิตร ทำให้เกิดการอุดตันในคอลัมน์ เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งการทดลองในวันที่ 34 พบว่า การแปรค่าปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย 4 10 20 และ 30 กรัม/ลิตร จะได้ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิล 21,748 มิลลิกรัม/ลิตร (10.28%) 22,499 มิลลิกรัม/ลิตร (10.64%) 22,528 มิลลิกรัม/ลิตร (10.65%) และ 23,322 มิลลิกรัม/ลิตร (11.05%) ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เมื่อปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารอาหารต่างกัน

เมื่อนำกากตะกอนที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งในชุดการทดลองที่มีการแปรค่าปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย 4 10 20 และ 30 กรัม/ลิตร มาตรวจลอบปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่กระจายตัวอยู่ในกากตะกอน โดยการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อชิ่งเจริญบนอาหารแข็ง FeTSB พบว่ามีเชื้อแบคทีเรียอยู่ $2.3x10^4$ $2.8x10^4$ $4.3x10^4$ และ $8.7x10^4$ เซลล์ต่อกรัมกากตะกอน ตามลำดับ ถึงแม้ว่ามีปริมาณเชื้อแบคทีเรียกระจายตัวอยู่ในกากตะกอนต่างกัน ซึ่งคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการลิชชิ่งทำให้ประสิทธิภาพแตกต่างกัน แต่ผลการทดลองพบว่าปริมาณการลิชชิ่งในแต่ละคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่เพิ่มขึ้นทำให้มีอนุภาคเหล็กปกคลุมผิวกากตะกอนมากขึ้นและพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการลิชชิ่งลดลงแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้บนอนุภาคเหล็ก แต่กรดซัลฟิวริกที่แบคทีเรียผลิตไม่สามารถลิชชิ่งนิกเกิลออกมาได้ อีกทั้งลดการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริกกับกากตะกอน

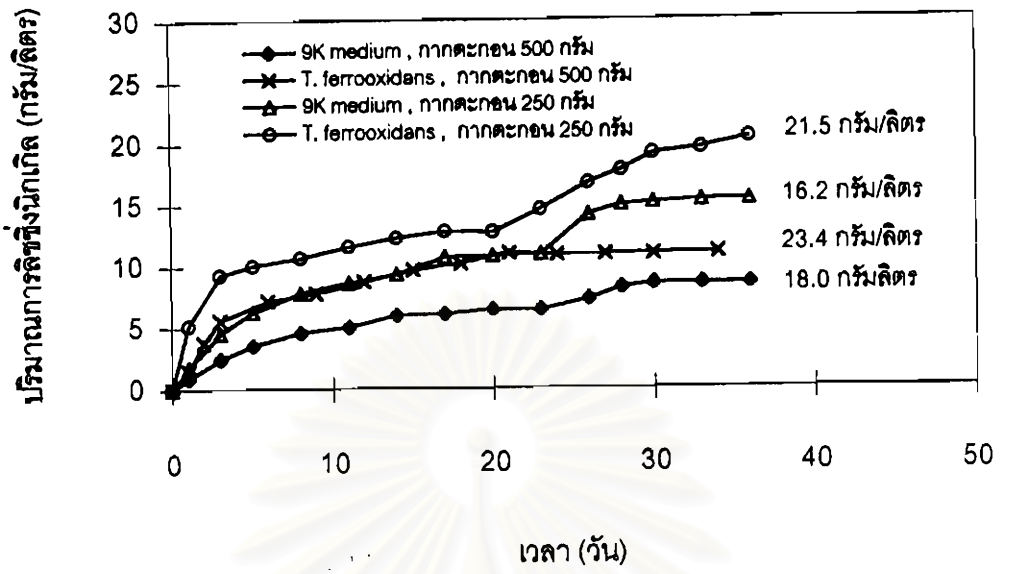
ดังนั้นปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* คือ 30 กรัม/ลิตร

4.5.1.4 อิทธิพลจากปริมาณกากตะกอนที่ใช้ในกระบวนการลิชชิ่งโดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 9 10 13 และ 14 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 500 และ 250 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 211.5 และ 105.75 กรัม ตามลำดับ) อย่างละ 2 คอลัมน์ ใช้สารละลายปริมาตร 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลาย 30 กรัม/ลิตร ไหลผ่านไปบนกากตะกอนที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม โดยชุดที่ 10 และ 13 ใช้สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* 20%(v/v) ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 142 และ 122 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.31 พบว่าสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* สามารถลิชชิ่งกากตะกอนปริมาณ 500 และ 250 กรัม ได้ความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายเป็น 23,372 มิลลิกรัม/ลิตร (11.05%) ภายใน 34 วัน และ 21,488 มิลลิกรัม/ลิตร (20.32%) ภายใน 36 วัน ตามลำดับ ในขณะที่ สารละลาย 9K medium สามารถลิชชิ่งกากตะกอนปริมาณ 500 และ 250 กรัม ได้ความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายเป็น 18,000 มิลลิกรัม/ลิตร (8.51%) ภายใน 36 วัน และ 16,200 มิลลิกรัม/ลิตร (15.32%) ภายใน 36 วัน ตามลำดับ

เนื่องจากกากตะกอน 500 และ 250 กรัม เป็นปริมาณที่มากเกินพอ เมื่อทำการทดลองโดยใช้ตัวแปรต่างๆเหมือนกัน ทำให้ความเข้มข้นของนิกเกิลที่ถูกลิชชิ่งออกมาไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซนต์การลิชชิ่งนิกเกิลจะพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันมาก ดังนั้นสภาวะที่จะทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งในคอลัมน์สูง คือ การใช้กากตะกอน 250 กรัม

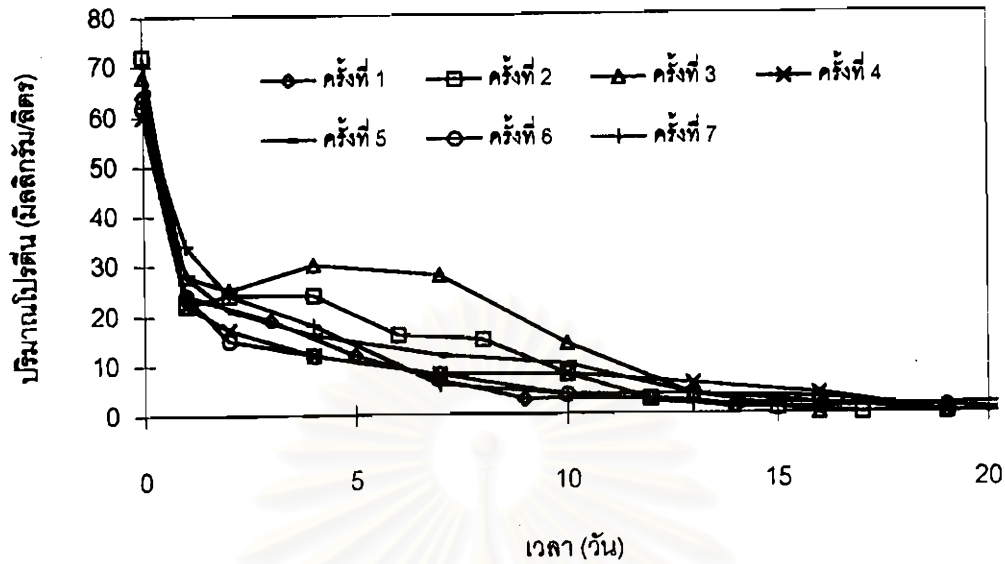


รูปที่ 4.31 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และสารอาหาร 9K medium เมื่อปริมาณกากตะกอนในคอลัมน์ต่างกัน

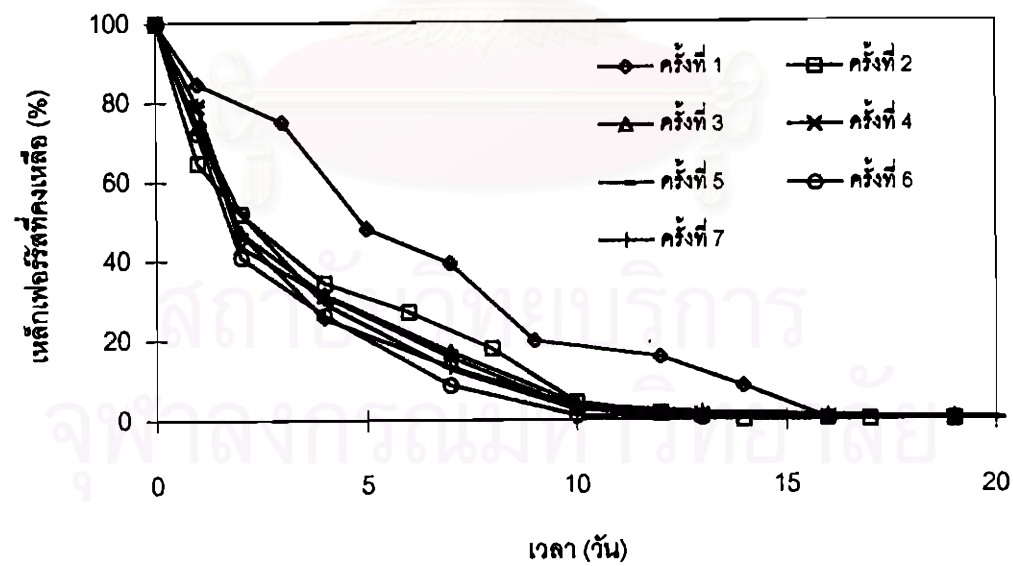
4.5.1.5 ประสิทธิภาพรวมของการลิชชิ่งโดย *T. ferrooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 5 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 500 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 211.5 กรัม) และใช้สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านไปบนกากตะกอน โดยใช้ปริมาณเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น 10%(v/v) ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 4 กรัม/ลิตร และควบคุมอัตราการไหลที่ 20 มล./ตร.ซม.-ชม. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนสารละลายใหม่มาไหลผ่านกากตะกอนชุดเดิมทุก 30 วัน จำนวน 7 ครั้ง ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 64 72 68 60 65 62 และ 62 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

ปริมาณโปรตีนและปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งหมดภายในระยะเวลา 15 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียเกาะติดอยู่กับอนุภาคเหล็กซึ่งไปตกตะกอนในคอลัมน์ จากนั้นเชื้อแบคทีเรียที่เจริญอยู่ในคอลัมน์จะออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกทำให้เกิดกระบวนการลิชชิ่งโดยอ้อม ซึ่งการเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุก 30 วัน ทำให้มีอนุภาคเหล็กซึ่งเป็นแหล่งอาหารของเชื้อแบคทีเรียมาทดแทนส่วนที่ถูกเชื้อแบคทีเรียออกซิไดส์ไป แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีอนุภาคเหล็กมาตกตะกอนในคอลัมน์มากขึ้นจนกระทั่งเกิดการเคลือบปกคลุมที่ผิวของกากตะกอน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการเกิดกระบวนการลิชชิ่งลดลง



รูปที่ 4.32 ปริมาณโปรตีนในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยทำการเปลี่ยนสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ทุก 30 วัน มาลิชชิ่งกากตะกอนในคอลัมน์เดิม



รูปที่ 4.33 เปอร์เซนต์เหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 30 วัน มาลิชชิ่งกากตะกอนในคอลัมน์เดิม

นั่นคือปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่าการทดลองใช้สารละลายชุดใหม่มาลิชชิ่งกากตะกอนชุดเดิมซ้ำทุก 30 วัน จำนวน 7 ครั้ง จะได้ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิล ดังนี้

ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 1 คือ 16,049 มิลลิกรัม/ลิตร (7.59%)

ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 2 คือ 13,315 มิลลิกรัม/ลิตร (6.30%)

ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 3 คือ 16,278 มิลลิกรัม/ลิตร (7.70%)

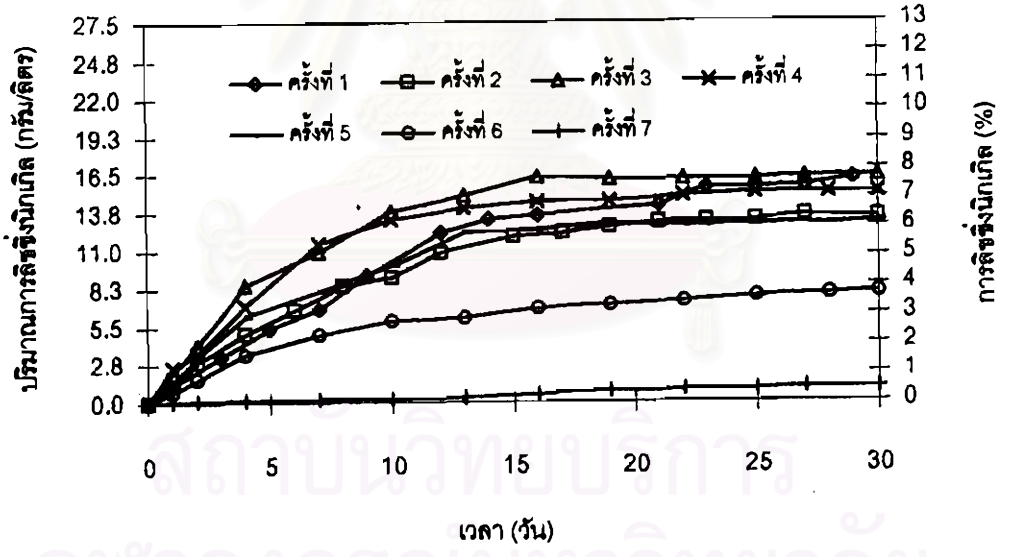
ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 4 คือ 15,085 มิลลิกรัม/ลิตร (7.13%)

ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 5 คือ 12,970 มิลลิกรัม/ลิตร (6.13%)

ปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 6 คือ 7,882 มิลลิกรัม/ลิตร (3.73%)

และปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลครั้งที่ 7 คือ 959 มิลลิกรัม/ลิตร (0.45%)

ดังนั้นประสิทธิภาพรวมของการลิชชิ่งทั้งหมด 7 ครั้ง โดยใช้สารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* เริ่มต้น 10%(v/v) ที่มีเหล็กเฟอร์รัส 4 กรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านกากตะกอน 500 กรัม ที่อัตราการไหล 20 มล./ตร.ซม.-ซม. คือ 82,538 มิลลิกรัม/ลิตร (39.03%)



รูปที่ 4.34 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยเปลี่ยนสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* มาลิชชิ่งกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ 500 กรัม ในคอลัมน์เดิมทุก 30 วัน ที่อัตราการไหล 20 มล./ตร.ซม.-ซม. ใช้ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10%(v/v) และปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 4 กรัม/ลิตร

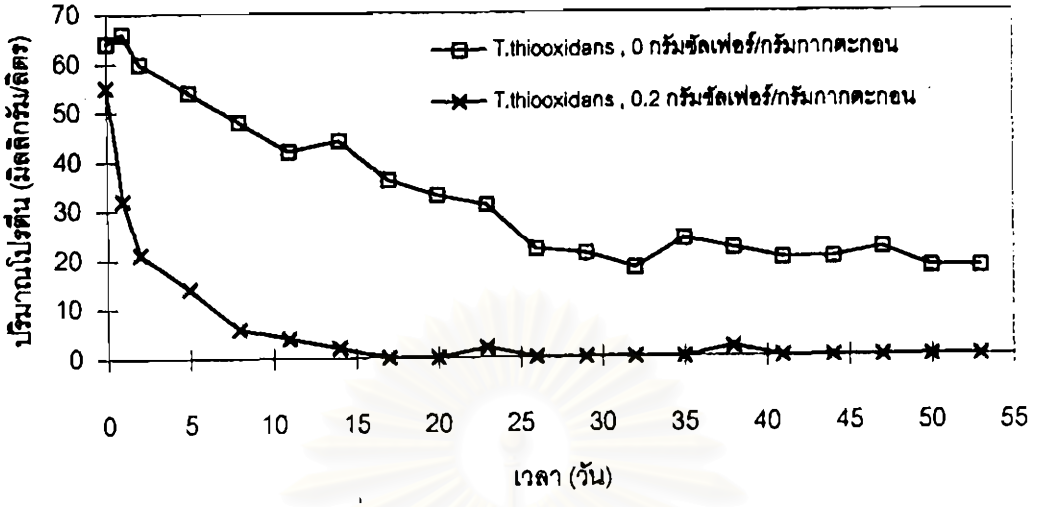
4.5.2 ผลจากการเติมผงซัลเฟอร์ลงในกากตะกอนที่มีต่อกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. thiooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 15 16 17 และ 18 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 250 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 105.75 กรัม) ซึ่งผสมและไม่ผสมผงซัลเฟอร์ อย่างละ 2 คอลัมน์ และมีสารละลายปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านกากตะกอนในคอลัมน์ ใช้ปริมาณซัลเฟอร์ในสารละลาย 10 กรัม/ลิตร ชุดที่ 16 และ 18 ใช้ปริมาตรเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น 20%(v/v) ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 64 และ 55 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม.

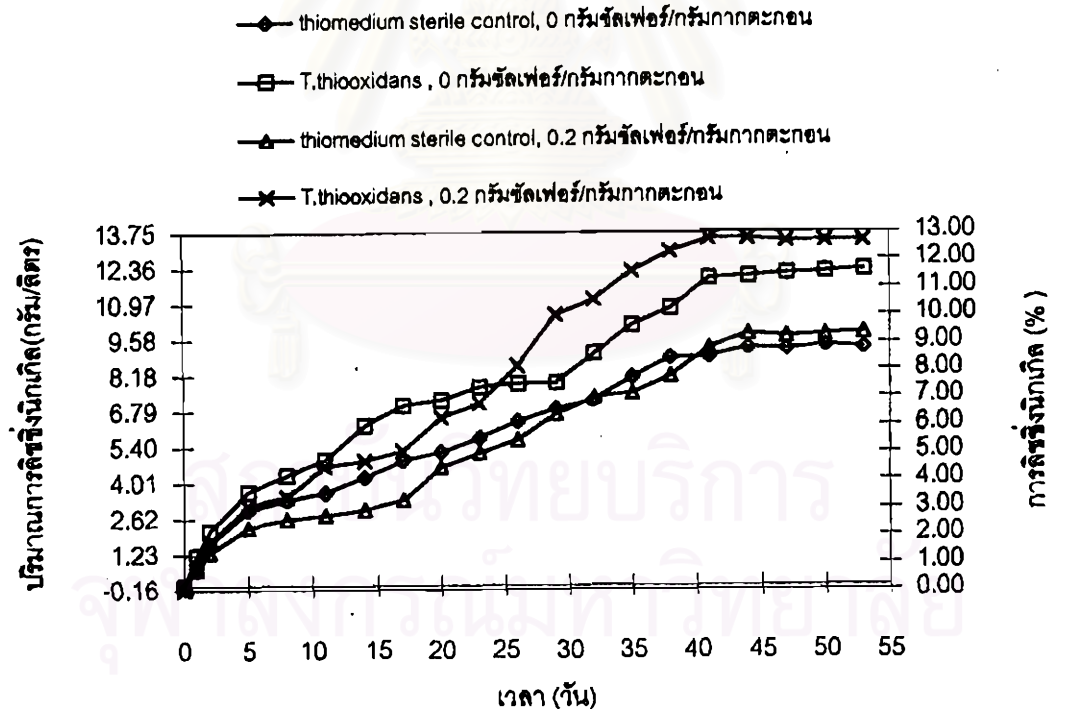
ทำการทดลองโดยควบคุมค่าพีเอชของสารละลายก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปกติ ให้มีค่าประมาณ 4.0-4.5 ทุกวันด้วย 5 N H_2SO_4 ส่วนค่าพีเอชที่ทางไหลออกจากคอลัมน์มีค่าประมาณ 7 สำหรับคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนผสมซัลเฟอร์ ควบคุมค่าพีเอชของสารละลายก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ให้มีค่าประมาณ 1.5-2.0 ทุกวันด้วย 5 N H_2SO_4 เพื่อควบคุมให้ค่าพีเอชของสารละลายขณะที่ไหลผ่านคอลัมน์มีค่าประมาณ 4.2 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ส่วนพีเอชที่ทางไหลออกจากคอลัมน์มีค่าประมาณ 4.5

จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่าชุดการทดลองที่ใช้สารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียลิชชิ่งกากตะกอนที่ผสมซัลเฟอร์ มีการลดลงของปริมาณโปรตีนในสารละลายอย่างรวดเร็ว จนหมดภายในระยะเวลา 18 วัน ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียไปเกาะติดอยู่กับอนุภาคซัลเฟอร์ที่ผสมอยู่กับกากตะกอนในคอลัมน์ ทำให้เชื้อแบคทีเรียสามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์แล้วผลิตกรดซัลฟิวริกออกมาลิชชิ่งกากตะกอน (Konishi และคณะ, 1995) จนกระทั่งการทดลองวันที่ 53 สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 13,417 มิลลิกรัม/ลิตร (12.69%) ในขณะที่การใช้สารละลาย thiomedium สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 9,840 มิลลิกรัม/ลิตร (9.3%) สำหรับชุดการทดลองที่ใช้สารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียลิชชิ่งกากตะกอนซึ่งไม่ได้ผสมซัลเฟอร์ จะมีการกรองเชื้อแบคทีเรียก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ ด้วยกระดาษกรองขนาด 0.2 ไมครอนที่ผ่านการอบฆ่าเชื้อแล้ว เพื่อให้เชื้อแบคทีเรียเจริญเติบโตอยู่ในสารละลาย แต่พบว่าปริมาณโปรตีนในสารละลายลดลงจาก 65 มิลลิกรัม/ลิตร มาคงที่ประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ภายใน 26 วัน ทั้งนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียต้องเจริญเติบโตในสภาวะที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลสูงมาก จนกระทั่งการทดลองวันที่ 53 สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 12,258 มิลลิกรัม/ลิตร (11.59%) ในขณะที่การใช้สารละลาย thiomedium สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 9,220 มิลลิกรัม/ลิตร (8.72%)

จากการทดลองพบว่าการลิชชิ่งโดยเชื้อแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในคอลัมน์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการลิชชิ่งโดยเชื้อแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในสารละลาย



รูปที่ 4.35 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ผสมและไม่ผสมซัลเฟอร์ ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์



รูปที่ 4.36 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ผสมและไม่ผสมซัลเฟอร์ในคอลัมน์ โดยสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารละลาย thiomedium

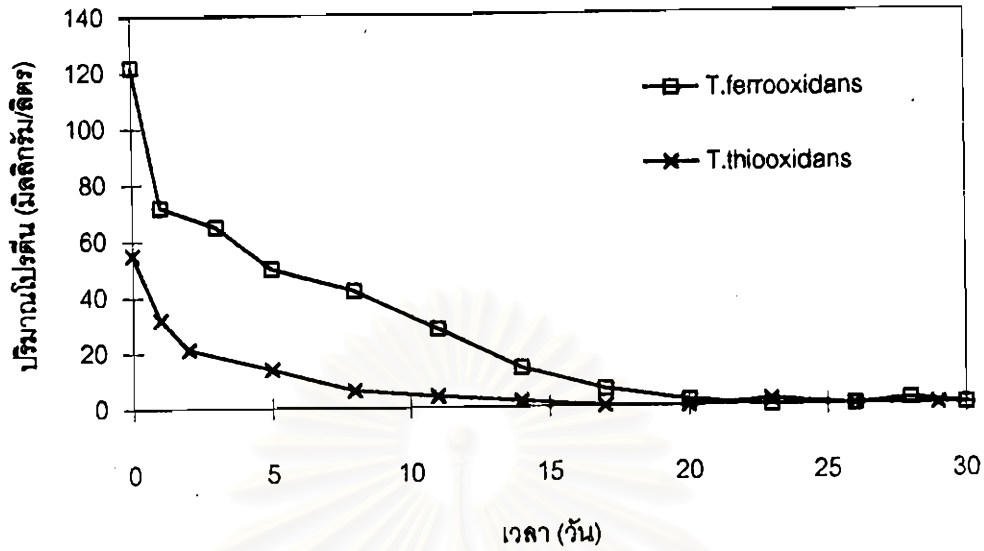
4.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans*

จากตารางที่ 3.1 ชุดการทดลองที่ 13 14 17 และ 18 มีคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 250 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 105.75 กรัม) ใช้สารละลายปริมาตร 1 ลิตร ที่มีเหล็กเฟอร์รัส 30 กรัม/ลิตร ไหลผ่านกากตะกอนที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. และควบคุมค่าพีเอชก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ประมาณ 2.5-3.0 โดยที่ชุด 14 และ 18 ใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เริ่มต้น 20 %(v/v) ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 122 และ 55 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

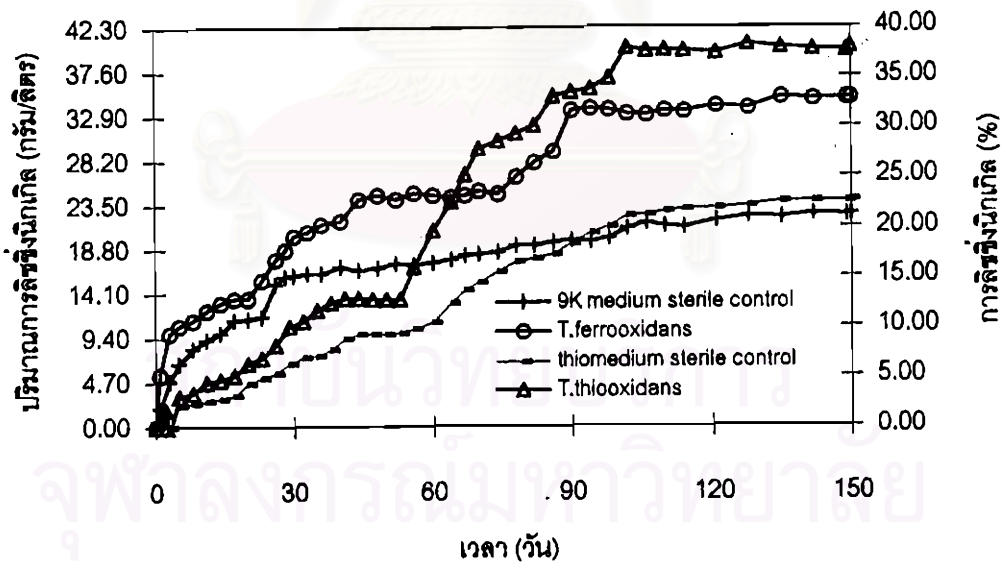
เปรียบเทียบกับคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอนปริมาณ 250 กรัม (ประกอบด้วยนิกเกิล 105.75 กรัม) ผสมกับซัลเฟอร์ 0.2 กรัมต่อกรัมกากตะกอน มีสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* เริ่มต้น 20 %(v/v) ของสารละลาย ปริมาตร 1 ลิตร ที่มีซัลเฟอร์ 10 กรัม/ลิตร ไหลผ่านกากตะกอนที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. และควบคุมค่าพีเอช ก่อนไหลเข้าสู่คอลัมน์ประมาณ 1.5-2.0 มีชุดควบคุมโดยใช้สารละลาย thiomedium ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยใช้แบคทีเรีย

ปริมาณโปรตีนในสารละลายผสมเชื้อแบคทีเรียลดลงจนหมดภายใน 20 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.37 เนื่องจาก *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ไปเกาะติดกับผิวของอนุภาคเหล็กและซัลเฟอร์ที่อยู่ในคอลัมน์ ตามลำดับ ทำให้เชื้อแบคทีเรียสามารถผลิตกรดซัลฟิวริกจากการออกซิไดส์เหล็กและซัลเฟอร์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงาน จากนั้นกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับกากตะกอนเพื่อลิชชิ่งนิกเกิลออกมา นอกจากนั้นกระบวนการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ยังเกิดกลไกการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์ริกกับกากตะกอนในสภาวะกรด ทำให้ปริมาณการลิชชิ่งเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.38 แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ช่วงละ 50 วัน พบว่า ช่วงแรกของการลิชชิ่งนิกเกิล เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งสูงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* เนื่องจากเชื้อ *T. ferrooxidans* สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้อย่างรวดเร็วโดยอาศัยกลไกการลิชชิ่งโดยอ้อม และการถ่ายเทมวลระหว่างเหล็กเฟอร์รัสกับกากตะกอน ช่วงที่สอง เชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* มีประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งวันที่ 65 ของการทดลอง เชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* มีประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลสูงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เนื่องจากเชื้อ *T. thiooxidans* สามารถออกซิไดส์ซัลเฟอร์เพื่อสร้างกรดซัลฟิวริกได้เพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพการลิชชิ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกในคอลัมน์ทำให้เกิดการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T.ferrooxidans* น้อยลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อควบคุมค่าพีเอชของสารละลายให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดเพียงพอจะทำให้การลิชชิ่งสูงขึ้น และในช่วงสุดท้ายเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลค่อนข้างคงที่



รูปที่ 4.37 ปริมาณโปรตีนในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans*



รูปที่ 4.38 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium, ตามลำดับ

สำหรับการลิชชิ่งโดยสารอาหาร 9K medium ในช่วงแรกมีการลิชชิ่งอย่างรวดเร็ว จากนั้นการลิชชิ่งจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเพิ่มอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการเติมกรดซัลฟิวริกเพื่อควบคุมค่าพีเอช สำหรับการลิชชิ่งโดยสารอาหาร thiomedium จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการเติมกรดซัลฟิวริกเพื่อควบคุมค่าพีเอชเช่นกัน แต่ควบคุมค่าพีเอชที่ต่ำกว่าทำให้มีการเติมกรดมากกว่า ดังนั้นการลิชชิ่งที่เพิ่มขึ้นจึงมากกว่า

จากการทดลองในวันที่ 150 พบว่าสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 22,440 มิลลิกรัม/ลิตร (21.22%) และ 34,788 มิลลิกรัม/ลิตร (32.90%) ตามลำดับ สำหรับสารอาหาร thiomedium และสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 24,000 มิลลิกรัม/ลิตร (22.70%) และ 40,097 มิลลิกรัม/ลิตร (37.92%) ตามลำดับ

การลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium เป็นกระบวนการลิชชิ่งทางเคมี ส่วนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลายผสมเชื้อแบคทีเรีย จะมีทั้งกระบวนการลิชชิ่งทางเคมีและกระบวนการลิชชิ่งโดยแบคทีเรีย เมื่อพิจารณาผลต่างของปริมาณการลิชชิ่งโดยสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* จะได้ความสามารถในการลิชชิ่งโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ซึ่งมีค่า 12,348 มิลลิกรัม/ลิตร (11.68%) และเมื่อพิจารณาผลต่างของปริมาณการลิชชิ่งโดยสารละลาย thiomedium และสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* จะได้ความสามารถในการลิชชิ่งโดยเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ซึ่งมีค่า 16,097 มิลลิกรัม/ลิตร (15.22%)

การที่เชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* มีประสิทธิภาพในการลิชชิ่งนิกเกิลสูงกว่าเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* เกิดขึ้นเนื่องจากเชื้อ *T. thiooxidans* สามารถสร้างกรดซัลฟิวริกได้ตลอดเวลา จากการออกซิไดส์ซัลเฟอร์ที่มีอยู่อย่างเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของเชื้อ *T. thiooxidans* คือ ใช้ระยะเวลานานในการเจริญเติบโตทำให้อัตราการลิชชิ่งนิกเกิลในช่วงแรกช้ากว่าเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ซึ่งสามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ข้อเสียของเชื้อ *T. ferrooxidans* คือ การตกตะกอนของอนุภาคเหล็กถ้ามีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในระบบมากเกินไป ซึ่งมีผลยับยั้งการลิชชิ่งนิกเกิลทำให้ประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้สีน้ำตาลแดงของเฟอร์ริกอิออนมีผลต่อสารละลายนิกเกิลซัลเฟต

4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย

การคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยกรดซัลฟิวริกและเชื้อแบคทีเรียทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์ จะพิจารณาจากราคาของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลเท่านั้น ซึ่งการลิชชิ่งโดยกรดซัลฟิวริกทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์ จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานที่ใช้ในกระบวนการลิชชิ่งน้อยกว่าการลิชชิ่งโดยแบคทีเรีย เนื่องจากกรดซัลฟิวริกต้องการระยะเวลาสำหรับการลิชชิ่งน้อยกว่าการลิชชิ่งโดยแบคทีเรีย ซึ่งรายละเอียดการคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ผ-26 ผ-27 ผ-28 และ ผ-29

พิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 10 กรัม/ลิตร โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นระหว่าง 0.01-5 นอร์มัล ในระบบขวดเขย่า ตามตารางที่ 4.3 พบว่า การใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 นอร์มัล ทำให้เกิดประสิทธิภาพการลิชชิ่ง 100% และเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด คือ 19 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน ส่วนการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 และ 5 นอร์มัล เป็นการใช้กรดซัลฟิวริกเกินพอ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงเกินไป

สำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน 500 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 1 ลิตร พบว่า เสียค่าใช้จ่าย 97 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน

ตารางที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้กรดซัลฟิวริกทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์

วิธีการลิชชิ่ง	ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (นอร์มัล)	ประสิทธิภาพการลิชชิ่ง (%)	ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิล	
			(บาท/กิโลกรัมนิกเกิล)	(บาท/กิโลกรัมกากตะกอน)
ระบบขวดเขย่า	0.01	3.06	957	413
	0.05	14.90	202	87
	0.1	29.80	101	44
	0.15	46.20	63	27
	0.5	100.00	45	19
	1	100.00	90	39
	5	100.00	448	194
คอลัมน์	1	13.56	230	97

พิจารณาการลิชชิ่งโดยแบคทีเรียพบว่า สารละลายที่ใช้ในการลิชชิ่งโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า คือ สารอาหาร 9K medium และ thiomedium ที่มีสัดส่วนของปริมาณธาตุอาหารแน่นอน ในขณะที่การลิชชิ่งโดยแบคทีเรียในคอลัมน์มีการแปรค่า ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส และปริมาณซัลเฟอร์ที่ใช้ในระบบ อีกทั้งยังมีการเติม 5N H_2SO_4 เพื่อควบคุมค่าพีเอช ดังนั้นการคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งโดยแบคทีเรียในคอลัมน์จึงแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ค่าใช้จ่ายสำหรับ N-9K และ N-thio ซึ่งเป็นธาตุอาหารจำเป็นสำหรับเชื้อ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ตามลำดับ โดยเติมลงในสารละลายสำหรับการลิชชิ่งทุก 30 วัน
2. ค่าใช้จ่ายสำหรับปริมาณ $FeSO_4.7H_2O$ ที่เติมในสารละลาย และผงซัลเฟอร์ทั้งที่เติมในสารละลายและผสมในกากตะกอน
3. ค่าใช้จ่ายสำหรับปริมาณ 5N H_2SO_4

การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งโดยกรดซัลฟิวริก เชื้อแบคทีเรีย *T.ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T.thiooxidans* ทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้กรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย

วิธีการทดลอง	ประสิทธิภาพ	ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิล	
	การลิชชิ่ง (%)	(บาท/กก.นิกเกิล)	(บาท/กก.กากตะกอน)
0.5 N H_2SO_4 ในระบบขวดเขย่า	100.00	45	19
1 N H_2SO_4 ในคอลัมน์	13.56	230	97
T.ferrooxidans ในระบบขวดเขย่า	47.00	229	99
T.ferrooxidans ในคอลัมน์	32.90	411	174
T.thiooxidans ในระบบขวดเขย่า	47.00	370	160
T.thiooxidans ในคอลัมน์	37.92	386	163

หมายเหตุ 1. ใช้ราคาสารเคมี commercial grade ในการคำนวนค่าใช้จ่าย โดยแสดงรายละเอียดการคำนวนในภาคผนวก ค ตารางที่ ผ-26 ผ-27 ผ-28 และ ผ-29

2. กากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในระบบขวดเขย่ามีนิกเกิล 43.2% และกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในคอลัมน์มีนิกเกิล 42.3%

ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า เมื่อมีการเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่แปรความเข้มข้นนิกเกิลตั้งแต่ 1-10 กรัม/ลิตร ดังแสดงในตารางที่ ผ-28 พบว่าการลิชชิ่งกากตะกอนที่มีความเข้มข้นนิกเกิลอิออน 10 กรัม/ลิตร โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพ เสียค่าใช้จ่าย 99 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน และการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. thiooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพ เสียค่าใช้จ่าย 160 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบการลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรียทั้งสองชนิดในระบบขวดเขย่า พบว่าเชื้อ *T. ferrooxidans* และเชื้อ *T. thiooxidans* เสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าการ ลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริก 5 และ 8 เท่า ตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยใช้เชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ มีการแปรค่าปริมาณเหล็กเฟอร์รัส และ ปริมาณซัลเฟอร์ ในระบบ อีกทั้งการควบคุมค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกมีผลต่อประสิทธิภาพและค่าใช้จ่าย ดังแสดงในตารางที่ ผ-29 พบว่า การลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. ferrooxidans* เสียค่าใช้จ่าย 174 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน และการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. thiooxidans* เสียค่าใช้จ่าย 163 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบการลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรียทั้งสองชนิดในคอลัมน์ พบว่าเชื้อ *T. ferrooxidans* และเชื้อ *T. thiooxidans* มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริกประมาณ 2 เท่า

จากการศึกษาของขวัญเรือน (2540) พบว่า การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยกรดซัลฟิวริก เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า มีค่าใช้จ่าย 100 980 2,250 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน ตามลำดับ เมื่อคำนวนค่าใช้จ่ายจากราคาสารเคมีชนิด Lab grade

ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งนี้มีประมาณ 4 ตัน/เดือน ซึ่งถูกกำจัดโดยศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เสียค่าใช้จ่ายประมาณ 3 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน (แสดงในตารางที่ ผ-30 ภาคผนวก ค) ในขณะที่กระบวนการลิชชิ่งนิกเกิล เสียค่าใช้จ่ายมากกว่า 19 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน (แสดงในตารางที่ 4.4) แต่อย่างไรก็ตามการลิชชิ่งกากตะกอน 1 กิโลกรัม จะได้นิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ 0.43 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 95 บาท ทำให้การลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์ และการลิชชิ่งนิกเกิลโดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ในระบบขวดเขย่า มีคุ้มค่าสำหรับการลดต้นทุนการผลิต