บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

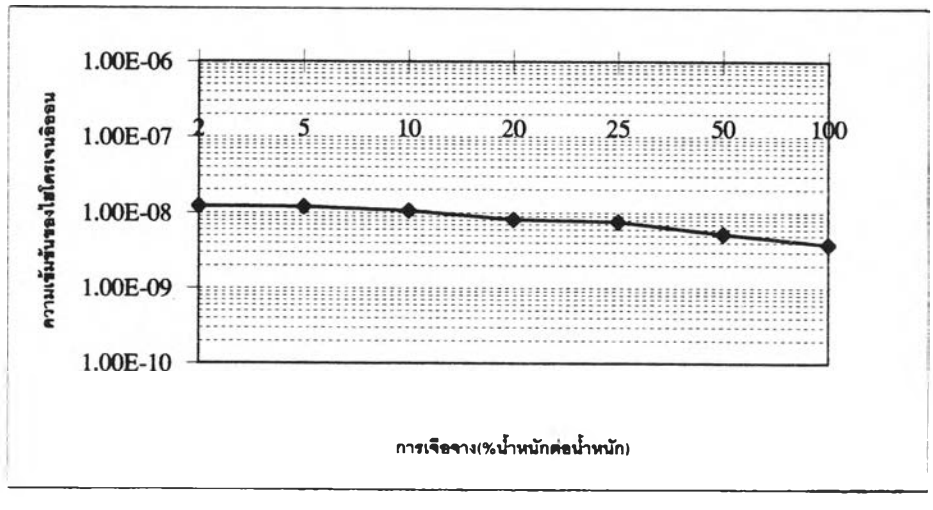
4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิล และพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนโลหะหนัก

จากการหาปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในกากตะกอนโลหะหนัก พบว่ามีปริมาณนิกเกิลทั้งหมดในกากตะกอนโลหะหนัก ประมาณ 48.81 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในรูปนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีลักษณะเป็นตะกอนสีเขียวอ่อน เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮดรอกไซด์ของอัลคาไล เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับสารละลายของ Ni^{2+} ไม่ละลายน้ำ และในสารละลายอัลคาไลที่มากเกินพอ แต่ละลายในสารละลายผสมระหว่างเกลือแอมโมเนียมและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) และละลายในกรด (ประเสริฐ ศรีไพโรจน์, 2535)

ส่วนการหาพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนโลหะหนัก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ที่ค่าการเจือจางเท่ากับ 0 จะได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออน ประมาณ 1.3×10^{-8}

ดังนั้นเมื่อคำนวนจากสูตร $pH = - \log [H^+]$

จะได้พีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนโลหะหนัก ประมาณ 7.89



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออนกับค่าการเจือจาง ในการหาพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอนโลหะหนัก

4.2 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยวิธีทางเคมี

จากการศึกษาที่ผ่านมาถึงการใช้กรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนชุมชน (Scott และ Horlings, 1975, Jenkins และคณะ, 1981) ดังนั้นจึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กรดซัลฟิวริกในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.00, 0.05, 0.10 และ 0.50 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม โดยเขย่าในเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

พบว่า กรดซัลฟิวริกสามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยในที่มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ มีพีเอชประมาณ 6.0 (รูปที่ 4.4) สามารถสกัดนิกเกิลได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ ในเวลา 7 วัน ส่วนในที่มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.10 และ 0.50 โมลาร์ มีพีเอชประมาณ 2.3 และ 0.3 ตามลำดับ สามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในที่ไม่มีกรดซัลฟิวริก พบว่าไม่มีการละลายของนิกเกิลออกมาในสารละลาย ซึ่งมีพีเอชประมาณ 7.6

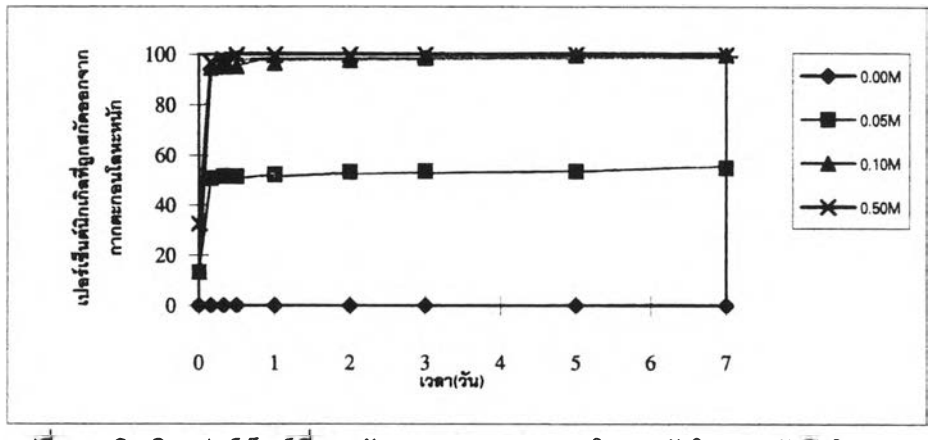
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window ด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่า กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.00, 0.05, 0.10 และ 0.50 โมลาร์ มีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

การที่กรดซัลฟิวริกสามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้นั้น เกิดจากปฏิกิริยา ดังสมการที่ 4.1

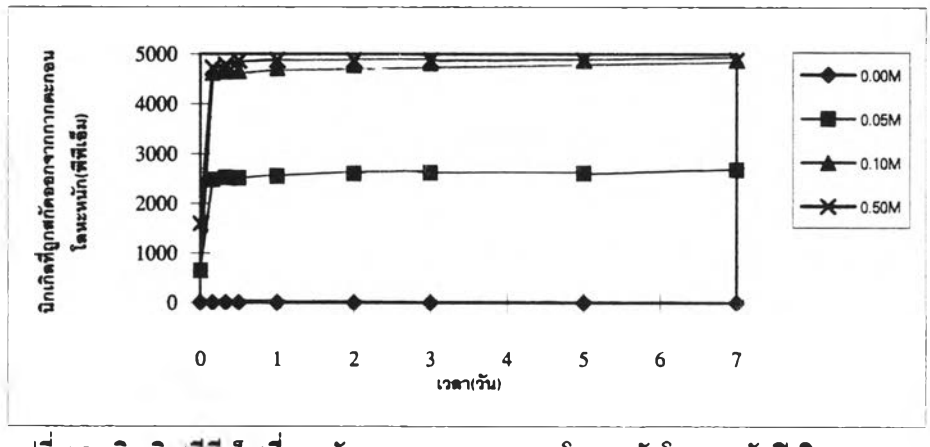
$$Ni(OH)_2 + H_2SO_4 \longrightarrow NiSO_4 + 2H_2O \qquad 4.1$$

จากสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่ายิ่งสารละลายมีความเป็นกรดมากขึ้น หรือพีเอชต่ำลง ยิ่งสามารถสกัดนิกเกิลออกมาได้มาก

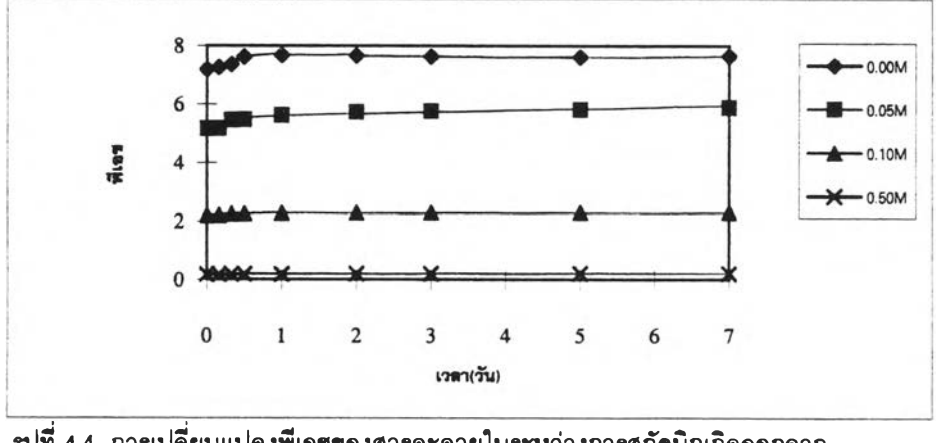
จะเห็นได้ว่า การใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ จะสามารถสกัดนิกเกิลออกมาได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 3 วัน คิดเป็นปริมาณการใช้กรดซัลฟิวริก 1.02 กรัมต่อกรัมของกากตะกอนโลหะหนัก เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้กรดซัลฟิวริกสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก พบว่าเสียค่าใช้จ่าย 0.10 บาทต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ซึ่งสามารถผลิตกรดซัลฟิวริกได้ มาสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก



รูปที่ 4.2 นิกเกิล(เปอร์เซ็นต์)ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นต่างๆ กัน



รูปที่ 4.3 นิกเกิล(พีพีเอ็ม)ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้นต่างๆ กัน



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆกัน

4.3 ผลของชนิดของแบคทีเรียต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

จากการศึกษาของ Tyagi และ Couillard (1987), Tyagi, Couillard และ Tran (1988) พบว่าเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* สามารถสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนซึ่งได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการย่อยสลายแล้ว ซึ่งเชื้อผสมดังกล่าวจะให้ประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักมากกว่าการใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* เพียงชนิดเดียว 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการใช้ *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* และเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* จึงน่าจะมีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักแตกต่างกัน

เมื่อทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะที่มีเชื้อแบคทีเรียต่างกัน ได้แก่ *T. ferrooxidans*, *T. thiooxidans* และเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ในระบบที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ 100 มิลลิลิตร และปริมาตรเชื้อ 10 มิลลิลิตร เลี้ยงในเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

พบว่า การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ทั้งในสภาวะที่มีการเติมผงซัลเฟอร์และไม่เติม สกัดนิกเกิลออกมาได้เท่ากัน คือ 82 เปอร์เซ็นต์ ในสภาวะที่มี *T. thiooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 99 เปอร์เซ็นต์ และสภาวะที่มีเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ปริมาณนิกเกิลจะถูกสกัดออกมาได้ 86 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระบบ แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่มีการเติมผงซัลเฟอร์ พีเอชลดลงจาก 2.60 เป็น 1.85 และที่ไม่เติมผงซัลเฟอร์ พีเอชลดลงจาก 2.60 เป็น 1.54 ในสภาวะที่มี *T. thiooxidans* พีเอชลดลงจาก 2.60 เป็น 1.38 และสภาวะที่มีเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* พีเอชลดลงจาก 2.60 เป็น 1.10 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่มีการเติมผงซัลเฟอร์และไม่เติม และสภาวะที่มีเชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.8)

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่าเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างกัน มีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

กระบวนการที่นิกเกิลละลายออกมาจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* อาจเป็นผลเนื่องจากปฏิกิริยาที่เฟอร์รัสอิออนถูกออกซิไดซ์ไปเป็นเฟอร์ริกอิออนตามธรรมชาติดังสมการที่ 4.2

$$Fe^{2+} + 1/2\ O_2 + H^+ \longrightarrow Fe^{3+} + 1/2\ H_2O \qquad 4.2$$

และเฟอร์รัสอิออนถูกออกซิไดซ์ไปเป็นเฟอร์ริกอิออนโดย *T. ferrooxidans* ดังสมการที่ 4.3

$$2FeSO_4 + 1/2\ O_2 + H_2SO_4 \xrightarrow{T.\ ferrooxidans} Fe_2(SO_4)_3 + 1/2\ H_2O \qquad 4.3$$

หลังจากนั้นเฟอร์ริกอิออนที่เกิดจากปฏิกิริยา 4.2 และ 4.3 จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์และกรดซัลฟิวริก ซึ่งทำให้ระบบมีสภาพเป็นกรด ส่งผลให้นิกเกิลละลายออกจากกากตะกอนโลหะหนัก แสดงดังสมการ 4.4 และ 4.5

$$2Fe(SO_4)_3 + 12\ H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 6H_2SO_4 \qquad 4.4$$

$$Ni(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow NiSO_4 + 2H_2O \qquad 4.5$$

เมื่อดุลสมการ 4.4 และ 4.5 จะได้สมการ 4.6

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ni(OH)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3NiSO_4 \qquad 4.6$$

จากสมการ 4.6 เมื่อทดลองให้เฟอร์ริกซัลเฟตและนิกเกิลไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากันในระบบที่มีน้ำ และพีเอชประมาณ 2.0 พบว่า เกิดตะกอนสีส้มเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีปริมาณมากกว่าชุดควบคุมที่มีเฟอร์ริกซัลเฟตอย่างเดียวเช่นเดียวกับการให้กากตะกอนโลหะหนักทำปฏิกิริยากับเฟอร์ริกซัลเฟต ปรากฏว่าเกิดตะกอนสีส้มปริมาณมากเป็น 2 เท่าของชุดควบคุม จึงคาดว่านอกจากนิกเกิลจะละลายออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยกรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้นจากสมการ 4.4 แล้ว ยังเกิดจากเฟอร์ริกซัลเฟต โดยเฟอร์ริกอิออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่อยู่ในกากตะกอนโลหะหนัก เพื่อให้ตัวเองมีความเสถียรในสารละลายมากขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าคงที่เสถียร (stability constant) พบว่า เฟอร์ริกอิออน (Fe^{3+}) มีค่าคงที่เสถียรมากกว่านิกเกิล (Stark และ Wallace, 1982, John, 1971) ซึ่งทำให้ถูกออกซิไดซ์ได้ยากกว่า จึงคาดว่า เฟอร์ริกอิออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับกากตะกอนโลหะหนัก เกิดเป็นสารประกอบที่มีความเสถียรมากขึ้น แล้วทำให้นิกเกิลอิออน (Ni^{2+}) หลุดออกมาจากตัวอย่างกากตะกอนโลหะหนัก ดังสมการที่ 4.6

การที่พิจารณาว่าเฟอร์ริกอิออนมีค่าคงที่เสถียรสูงกว่านิกเกิลอิออนนั้น เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะอิออนของเฟอร์ริกอิออนที่มีประจุบวกสูงกว่านิกเกิลอิออน อีกทั้งยังมีความยาวรัศมีสั้นกว่า และมีพลังงานอิสระในการฟอร์มรูป (G°) สูงกว่า (Stark และ Wallace, 1982) การที่นิกเกิลอิออนมีพลังงานอิสระในการฟอร์มรูปต่ำกว่าเฟอร์ริกอิออน ทำให้นิกเกิลอิออนอยู่ในรูปเดิมคือ Ni^{2+} และคาดว่านิกเกิลอิออนที่หลุดออกจากกากตะกอนโลหะหนัก จะจับกับซัลเฟตอิออน (SO_4^{2-}) ที่แตกตัวออกจากเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4.7H_2O$) เป็นนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4$) แล้วละลายอยู่ในสารละลาย

กระบวนการที่นิกเกิลละลายออกมาจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* เกิดจากการออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์ ไปเป็นกรดซัลฟิวริกโดย *T. thiooxidans* ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 4.7

$$S^0 + 3/2O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \qquad 4.7$$

กรดซัลฟิวริกที่เกิดขึ้น จะไปละลายนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ดังสมการที่ 4.8

$$Ni(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow NiSO_4 + 2H_2O \qquad 4.8$$

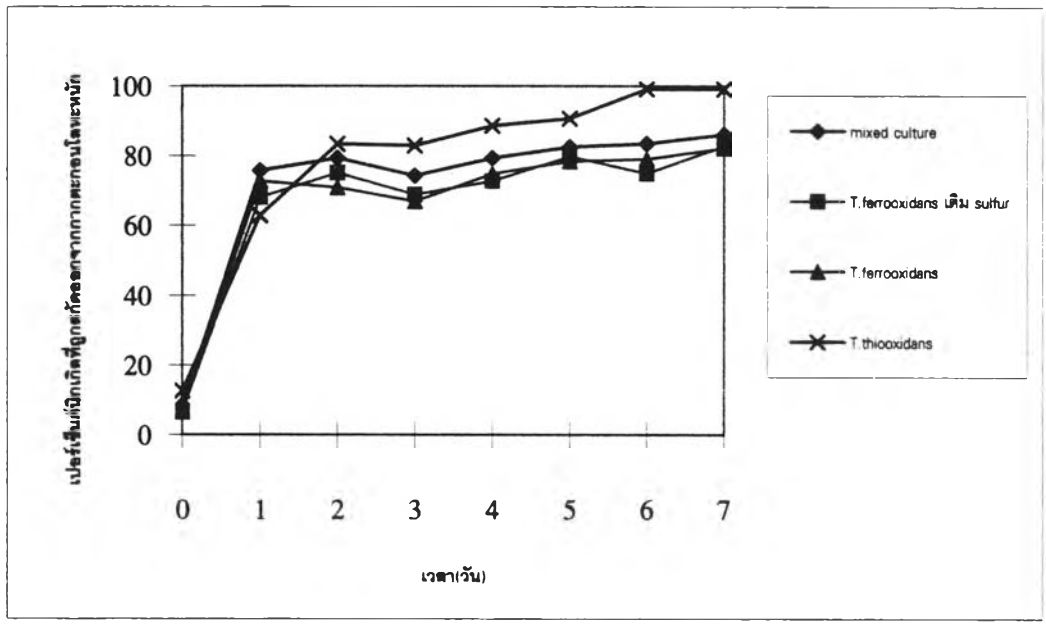
ซึ่งเมื่อพิจารณาระหว่างค่าพีเอชของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไป กับปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมา พบว่ามีความสอดคล้องกับสมการที่อธิบายไว้ข้างต้น คือ เมื่อพีเอชลดลง ซึ่งแสดงว่ามีกรดเพิ่มขึ้นในระบบ ปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมาจะมากขึ้น แสดงว่ากลไกที่นิกเกิลถูกสกัดออกมาจากกากตะกอนโลหะหนัก เกิดจากกรดซัลฟิวริกที่ *T. thiooxidans* สร้างขึ้น

จากการทดลองดังกล่าว พบว่า *T. thiooxidans* มีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้สูงสุด รองลงมาคือ เชื้อผสมของ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* และ *T. ferrooxidans* มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด การที่เชื้อผสมสกัดนิกเกิลได้มากกว่า *T. ferrooxidans* ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Tyagi และ Couillard (1987), Tyagi, Couillard และ Tran (1988) แสดงว่าการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักเกิดผ่านกลไก 2 ลักษณะ คือ เกิดจากกลไกการลิชชิ่งทางอ้อมโดย *T. ferrooxidans* และเกิดจากการสร้างกรดซัลฟิวริกจากผงซัลเฟอร์โดย *T. thiooxidans* แล้วเกิดการสกัดนิกเกิลออกมา

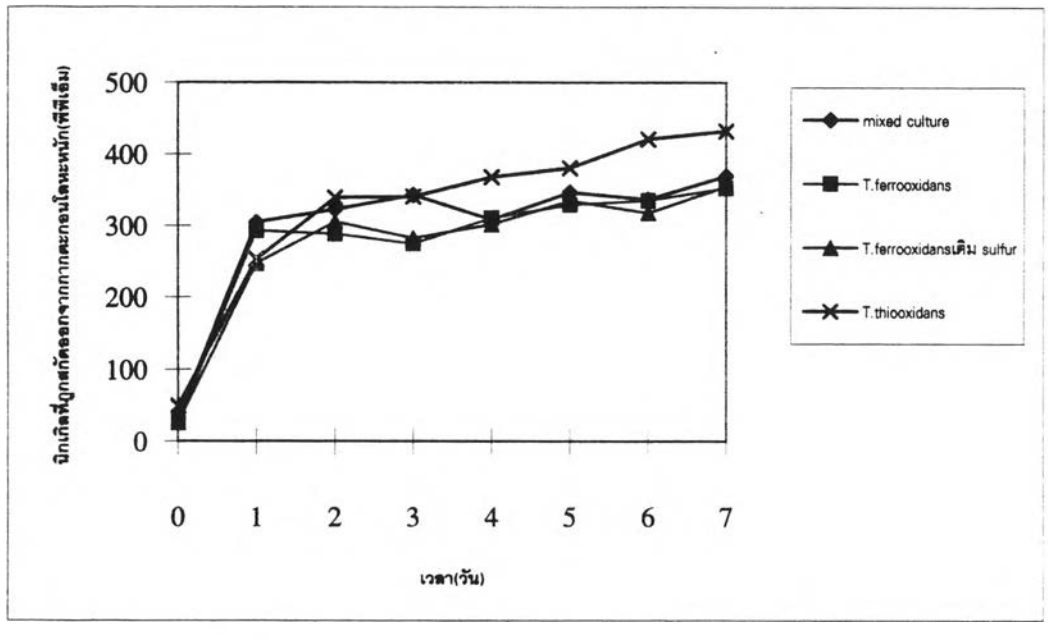
การที่ *T. thiooxidans* มีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้สูงสุด เกิดจากการที่ *T. thiooxidans* สามารถสร้างกรดซัลฟิวริกได้ตลอดเวลา จึงเกิดการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ตลอดเวลา ซึ่งเป็นข้อดีของ *T. thiooxidans* และพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญสูงกว่า *T. ferrooxidans* ทำให้ใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณน้อยในการปรับ

พีเอชให้เหมาะสม นอกจากนี้ *T. thiooxidans* ไม่มีปัญหาการตกตะกอนและสีของเฟอร์ริกอิออน จึงสามารถแยกนิกเกิลออกมาได้สะดวกกว่า แต่ก็มีข้อเสียคือ *T. thiooxidans* จะใช้เวลานานในการเจริญและออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์เป็นกรดซัลฟิวริก ทำให้สกัดนิกเกิลได้ช้ากว่า *T. ferrooxidans* ซึ่ง *T. ferrooxidans* สามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้โดยการออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออนเป็นเฟอร์ริกอิออน และถ้าระบบมีซัลเฟอร์ จะออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เป็นกรดซัลฟิวริก ซึ่งจะไปสกัดนิกเกิลออกมา นอกจากนี้ *T. ferrooxidans* จะใช้เวลาในการเจริญน้อยกว่า จึงสกัดนิกเกิลออกมาได้เร็ว แต่มีข้อเสียคือ ในระบบจะต้องมีเฟอร์รัสอิออนซึ่งมีราคาแพง แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมเฟอร์รัสอิออนในรูปแบบที่มีราคาถูก หรือเติมซัลเฟอร์ลงไปแทน รวมทั้งต้องใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณมากในการปรับพีเอชให้เหมาะสม และมีการตกตะกอนและสีของเฟอร์ริกอิออน ซึ่งอาจมีผลต่อการแยกนิกเกิล

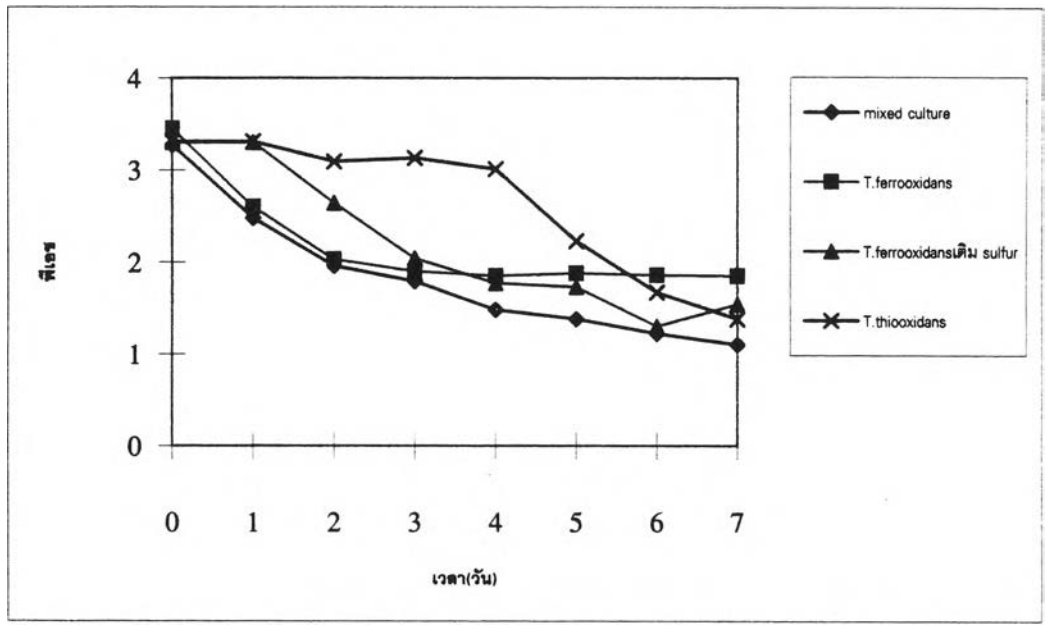
เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* พบว่า การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ต้องเสียค่าใช้จ่าย 4.25 บาทต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม และการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* ต้องเสียค่าใช้จ่าย 0.98 บาทต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม



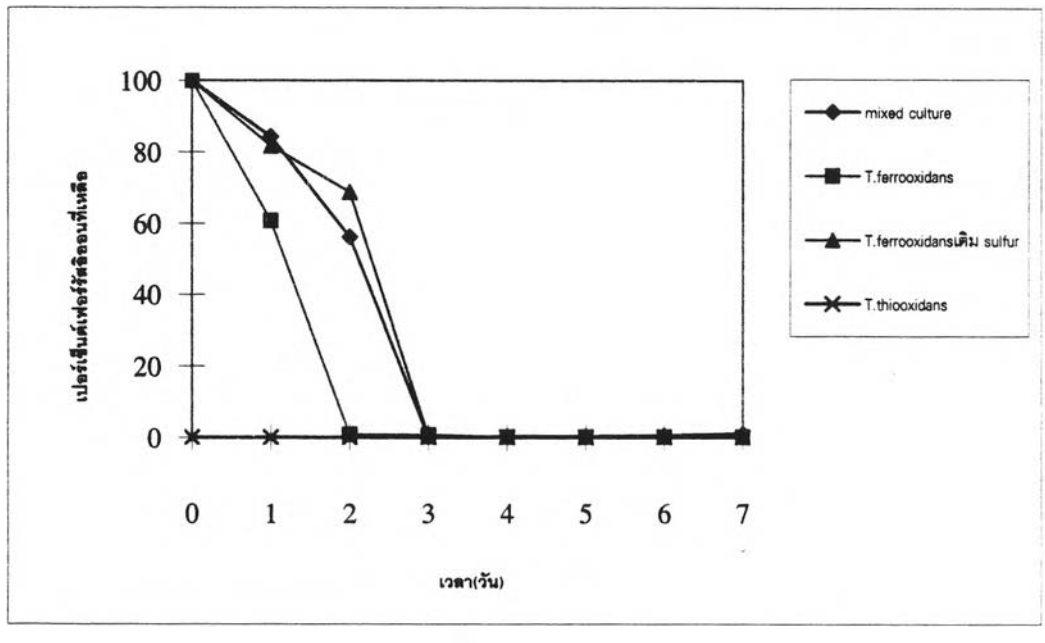
รูปที่ 4.5 นิกเกิล(เปอร์เซ็นต์)ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.6 นิกเกิล(พีพีเอ็ม)ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยแบคทีเรียชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยแบคทีเรียชนิดต่างๆ

4.4 ผลของช่วงเวลาเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

4.4.1 ผลของช่วงเวลาเลี้ยงเชื้อ *T. ferrooxidans* ต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

จากการศึกษาการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้กรดซัลฟิวริก พบว่ากรดซัลฟิวริกสามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ *T. ferrooxidans* ซึ่งสามารถออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออนและธาตุซัลเฟอร์ สกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ดังนั้นจึงทำการทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารอาหาร 100 มิลลิลิตร ที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนเข้มข้น 0.25 กรัมต่อลิตร โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ทุก 4 ชั่วโมง

พบว่า การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* นิกเกิลจะละลายออกมามากกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* (รูปที่ 4.9) ซึ่งภายในเวลา 24 ชั่วโมง ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* สกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ 80 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* สกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้เพียง 6 เปอร์เซ็นต์ การเปลี่ยนแปลงพีเอชพบว่า ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* พีเอชเริ่มต้นประมาณ 3.1 และจะค่อยๆ ลดลงเป็น 2.7 ส่วนในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* พีเอชค่อนข้างที่จะคงที่ที่ประมาณ 3.3 (รูปที่ 4.10) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออน พบว่าในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ปริมาณเฟอร์รัสอิออนลดลงมากกว่าสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* (รูปที่ 4.10)

จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ จึงเป็นไปได้ค่อนข้างมากที่กลไกการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก จะเป็นไปตามสมมุติฐานที่ตั้งไว้ โดย *T. ferrooxidans* ช่วยให้นิกเกิลละลายออกมาได้เร็วกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans*

และจากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้เกิดสมมุติฐานว่า ถ้าทำการเลี้ยง *T. ferrooxidans* ให้เจริญเต็มที่ใช้เวลาประมาณ 18-20 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเฟอร์ริกอิออนและกรดซัลฟิวริกปริมาณมาก แล้วจึงเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไป น่าจะเกิดการละลายของนิกเกิลได้เร็วกว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ *T. ferrooxidans* จึงได้ทำการทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารอาหาร 100 มิลลิลิตร ที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่ความเข้มข้น 0.25 กรัมต่อลิตร โดยการทดลองนี้จะเลี้ยง *T. ferrooxidans* ให้เจริญจนครบ 18 ชั่วโมง แล้วจึงเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปเปรียบเทียบกับในสภาวะที่ไม่มีแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* พบว่า ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* สกัด

นิกเกิลออกมาได้ 99 เปอร์เซ็นต์ และในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 67 เปอร์เซ็นต์ โดยในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* จะสามารถสกัดนิกเกิลออกมาได้มากกว่า (รูปที่ 4.11) และพีเอชของสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* พีเอชเริ่มต้นอยู่ประมาณ 2.5 และลดลงเป็น 2.3 ส่วนในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* พีเอชคงที่อยู่ที่ประมาณ 3.2 (รูปที่ 4.12) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออน พบว่าในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงมากกว่าสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* (รูปที่ 4.12)

เมื่อเปรียบเทียบการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักระหว่างการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ และเติมหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง พบว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง จะทำให้นิกเกิลละลายออกมาเร็วกว่า โดยนิกเกิลละลายออกมา 93 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเวลาผ่านไป 8 ชั่วโมง ซึ่งในสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ นิกเกิลละลายออกมาได้เพียง 46 เปอร์เซ็นต์ ในเวลาเท่ากัน (รูปที่ 4.13) และพบว่า พีเอชในสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง จะต่ำกว่า (รูปที่ 4.14) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออน พบว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงมากกว่าการเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ (รูปที่ 4.14)

เมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักระหว่างสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ และสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

4.4.2 ผลของช่วงเวลาเลี้ยงเชื้อ *T. thiooxidans* ต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

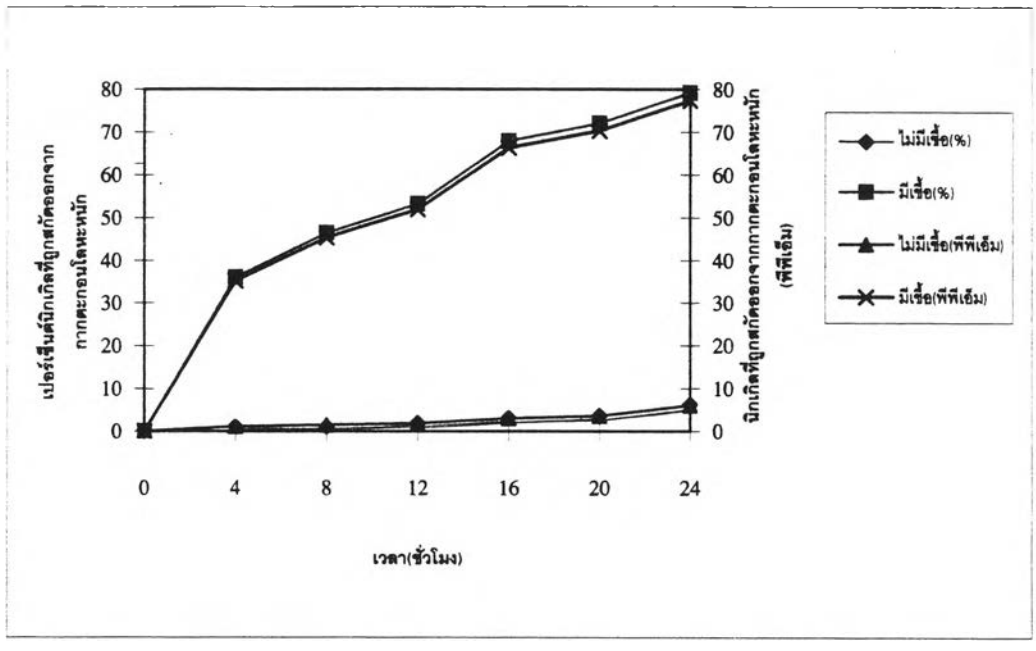
จากการศึกษาการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้กรดซัลฟิวริก พบว่ากรดซัลฟิวริกสามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ *T. thiooxidans* ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ธาตุซัลเฟอร์ สกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ดังนั้นจึงทำการทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักในระบบที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ thiomedium 100 มิลลิลิตร และแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ซึ่งมีอายุ 5 วัน ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทำการทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งไม่เติม *T. thiooxidans* เลี้ยงในเครื่องเขย่าที่มี

ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ในสภาวะที่มี *T. thiooxidans* ปริมาณนิกเกิลจะถูกสกัดออกมามากกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. thiooxidans* แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.15 ปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมาจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น จากการทำการทดลองในเวลา 7 วัน พบว่าในสภาวะที่มี *T. thiooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 94 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่มี *T. thiooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 74 เปอร์เซ็นต์ โดยการสกัดค่อนข้างคงที่

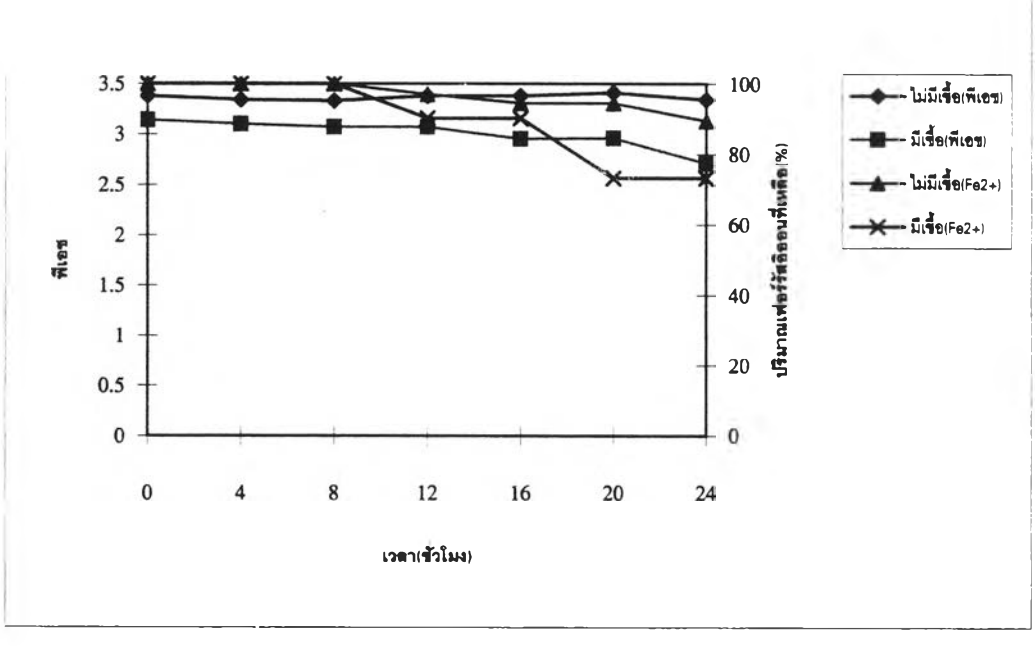
การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายในระบบแสดงดังรูปที่ 4.16 ในสภาวะที่ไม่เติม *T. thiooxidans* พีเอชค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 5.0 ส่วนในสภาวะที่เติม *T. thiooxidans* ในช่วง 4 วันแรกของการทดลอง พีเอชค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 3.0 ต่อจากนั้นหลังจากวันที่ 4 พีเอชจะลดลง ในวันที่ 7 ของการทดลอง พีเอชอยู่ที่ 1.90

เมื่อทำการทดลองโดยใช้ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก และสภาวะเช่นเดิม แต่จะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในอาหาร thiomedium จนมีอายุ 5 วัน แล้วจึงเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไป เปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งไม่มี *T. thiooxidans* แต่เป็นอาหาร thiomedium ที่ปรับพีเอชเท่ากับเชื้อเริ่มต้น จากการทดลอง พบว่า ปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมาทั้งในสภาวะที่เติมและไม่เติม *T. thiooxidans* นิกเกิลถูกสกัดออกมาได้ใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.17 ในเวลา 7 วัน ในสภาวะที่มี *T. thiooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในสภาวะที่ไม่มี *T. thiooxidans* สกัดนิกเกิลออกมาได้ 97 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าพีเอชของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.18 พีเอชของชุดควบคุมค่อนข้างคงที่ที่ 1.50 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมาที่ค่อนข้างคงที่ ส่วนในที่มี *T. thiooxidans* พีเอชในช่วง 2 วันแรก ค่อนข้างคงที่ที่ 1.50 และหลังจากนั้น พีเอชจะลดลง โดยวันที่ 7 พีเอชอยู่ที่ประมาณ 0.90

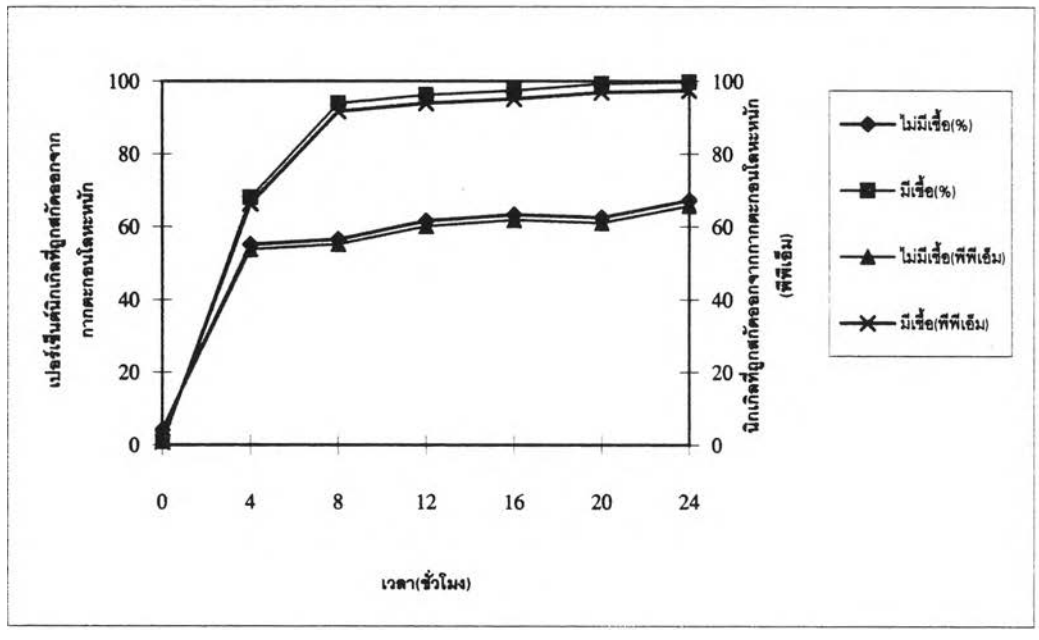
เมื่อเปรียบเทียบการทดลองการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย *T. thiooxidans* ที่ 2 สภาวะดังกล่าว พบว่า ปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดออกมา ในสภาวะที่เลี้ยง *T. thiooxidans* จนมีอายุ 5 วัน แล้วเติมกากตะกอนโลหะหนักลงไป นิกเกิลจะถูกสกัดออกมาได้เร็วกว่า และปริมาณมากกว่า ซึ่งในเวลา 3 วัน สกัดนิกเกิลออกมาได้ 99 เปอร์เซ็นต์ และสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ สกัดนิกเกิลออกมาได้ 89เปอร์เซ็นต์ แสดงดังรูปที่ 4.19 เมื่อพิจารณาพีเอชของสารละลาย พบว่า พีเอชในสภาวะที่เลี้ยง *T. thiooxidans* จนมีอายุ 5 วัน แล้วเติมกากตะกอนลงไปต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ที่เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจาก *T. thiooxidans* เจริญจนสร้างกรดได้มาก และไม่ได้รับความเป็นพิษของกากตะกอนโลหะหนัก



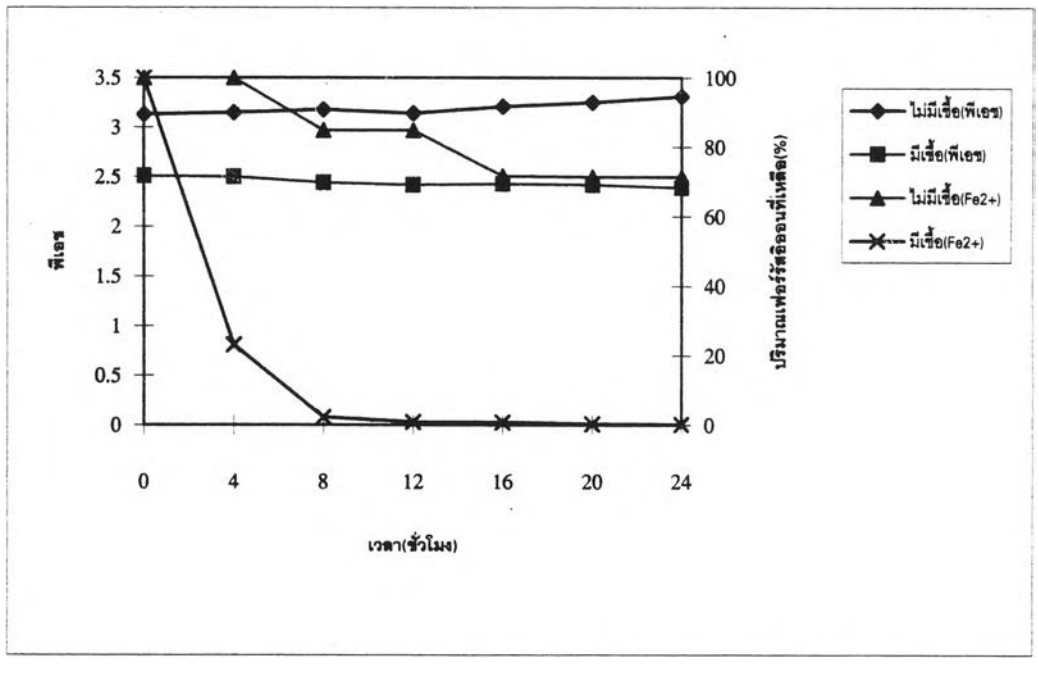
รูปที่ 4.9 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans*



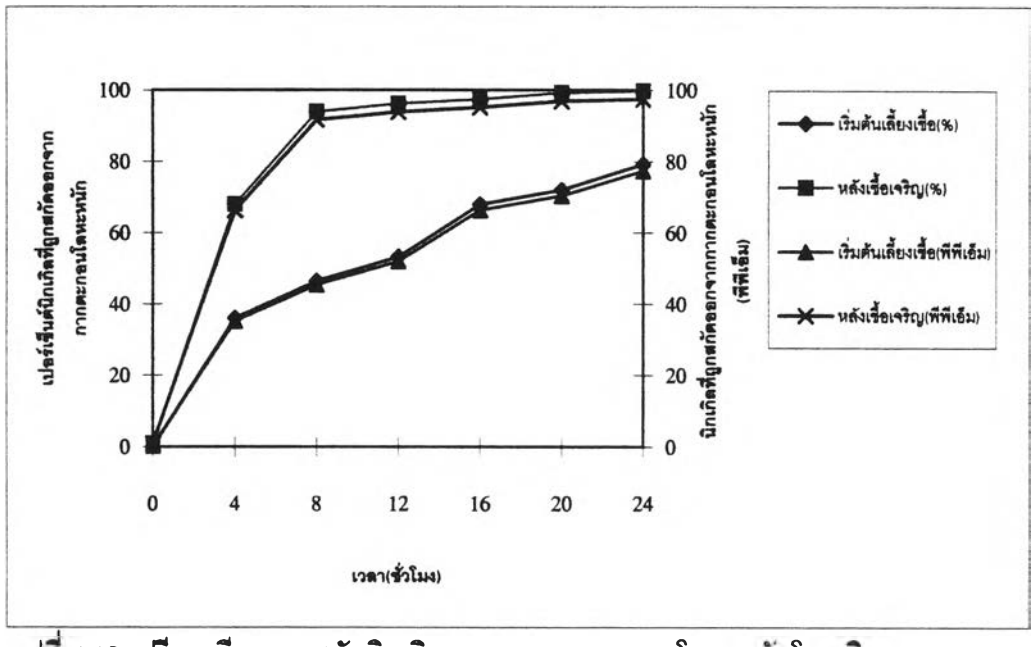
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans*



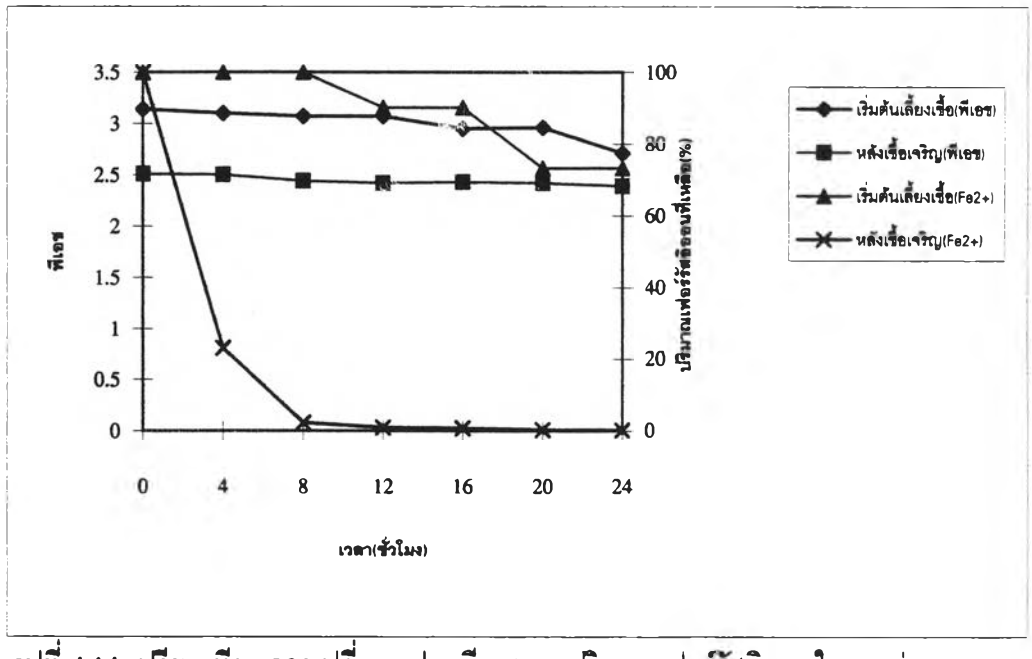
รูปที่ 4.11 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ซึ่งเติมกากตะกอนลงในระบบหลังจากแบคทีเรียเจริญได้ 18 ชั่วโมง



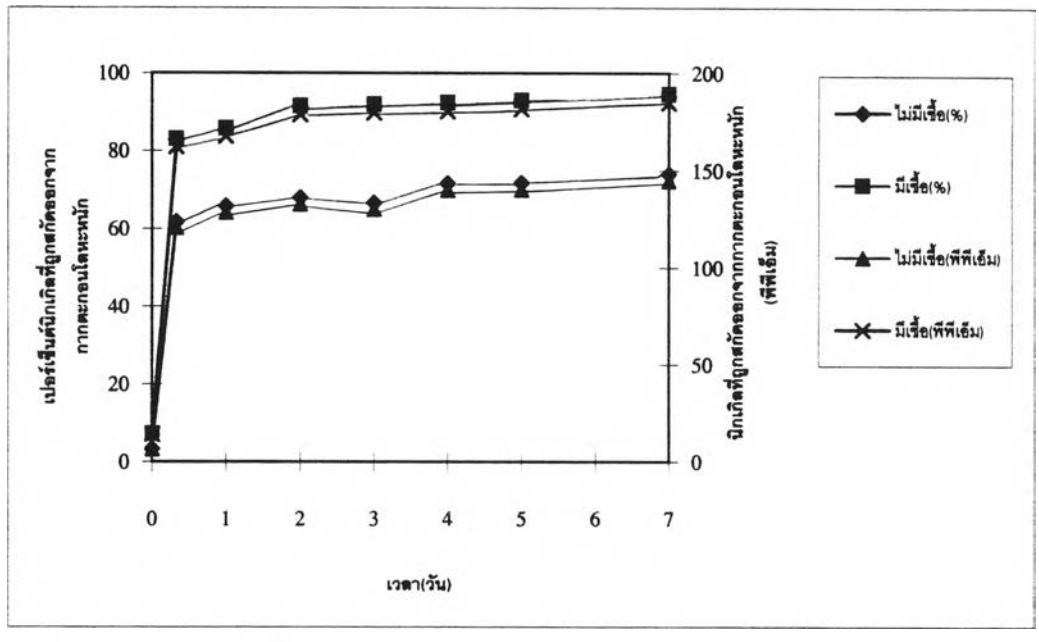
รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ซึ่งเติมกากตะกอนโลหะหนักหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง



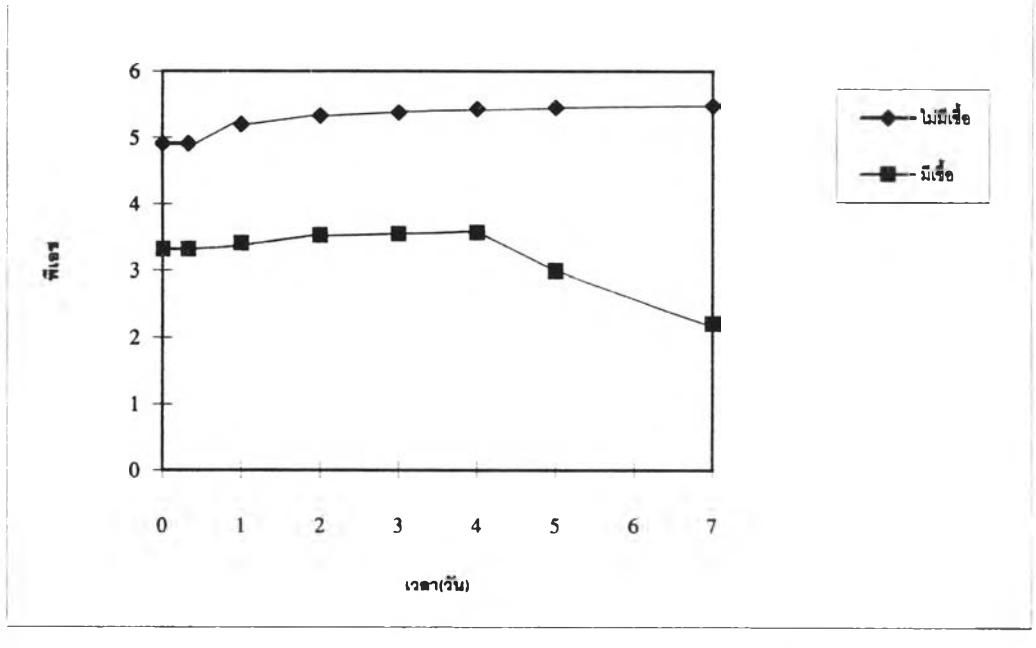
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยเติมกากตะกอนโลหะหนักในช่วงเวลาเริ่มต้นเลี้ยงเชื้อและหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง



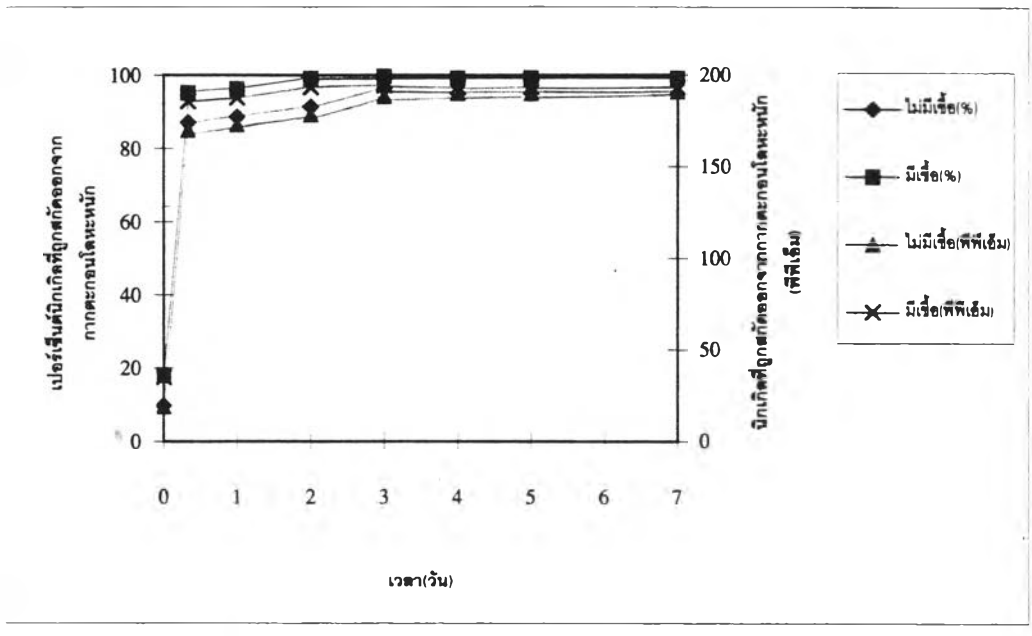
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยเติมกากตะกอนโลหะหนักในช่วงเริ่มต้นเลี้ยงเชื้อและหลังจากเชื้อเจริญได้ 18 ชั่วโมง



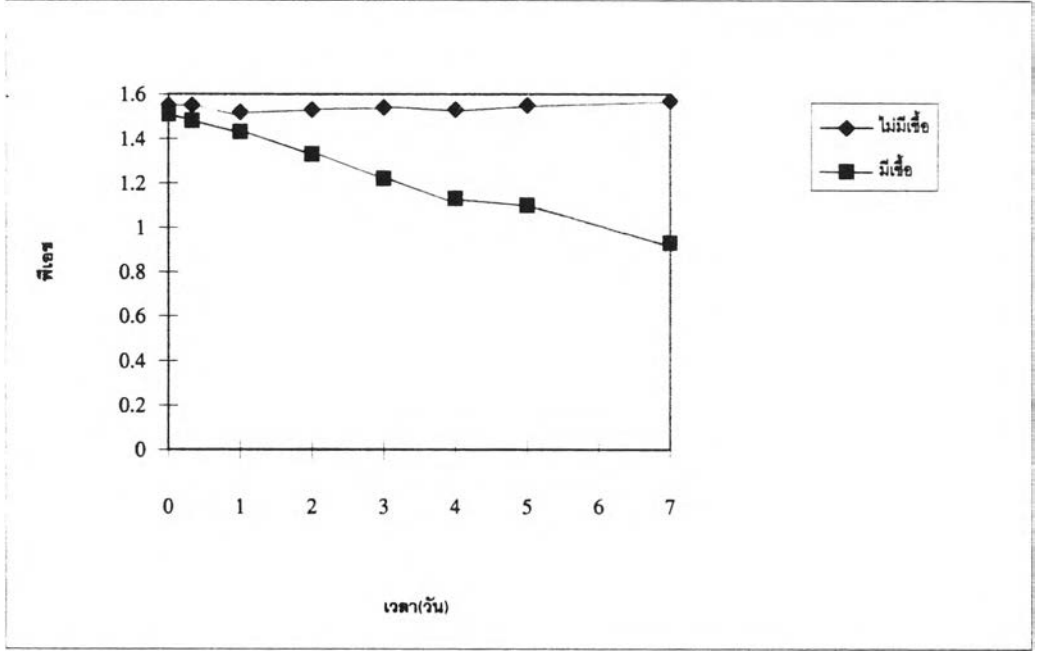
รูปที่ 4.15 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans*



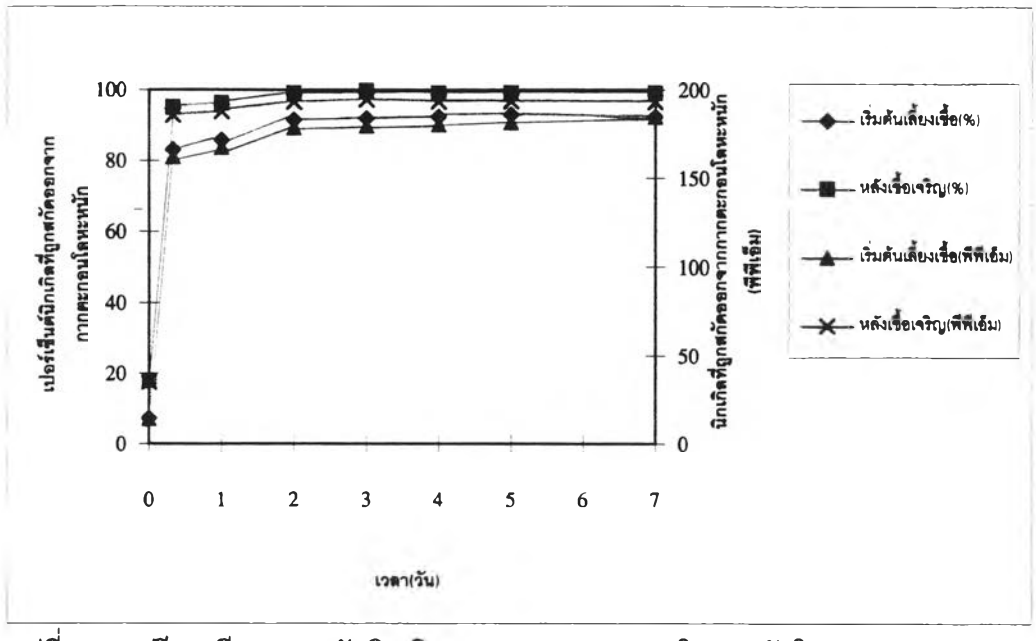
รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิล
ออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans*



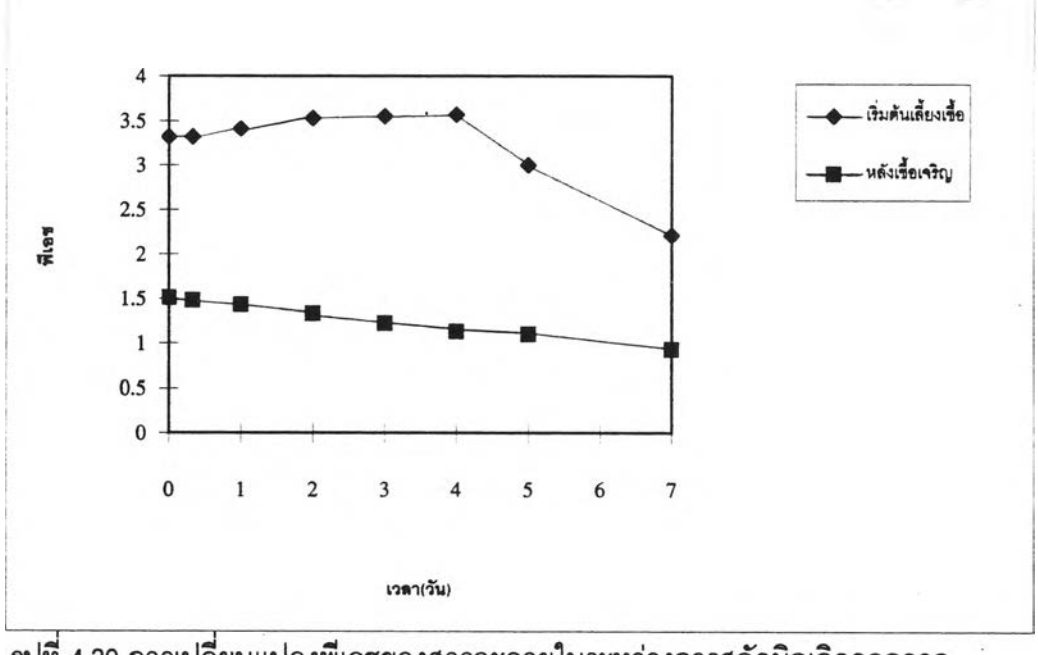
รูปที่ 4.17 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* ในสภาวะที่เติมกากตะกอนหลังจากเชื้อเจริญได้ 5 วัน



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* ในสภาวะที่เติมกากตะกอนหลังจากเชื้อเจริญได้ 5 วัน



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* ในสภาวะที่เติมกากตะกอนในช่วงเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อและเติมหลังเชื้อเจริญได้ 5 วัน



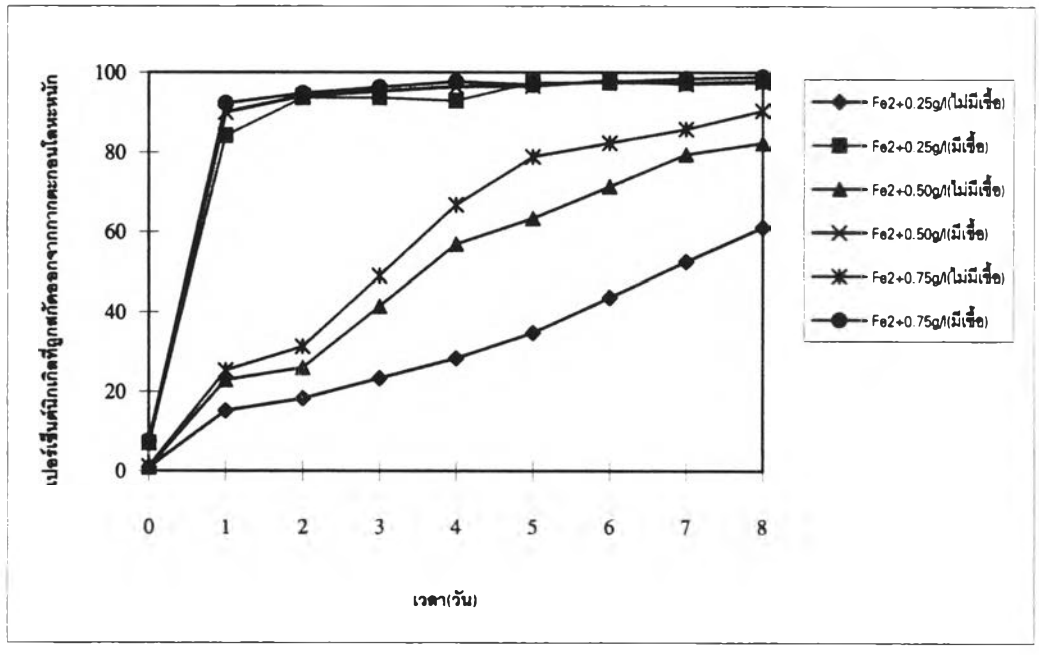
รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. thiooxidans* ในสภาวะที่เติมกากตะกอนในช่วงเริ่มต้นเลี้ยงเชื้อและหลังจากเชื้อเจริญได้ 5 วัน

เมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักระหว่างสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปในช่วงเวลาเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อ และสภาวะที่เติมกากตะกอนโลหะหนักลงไปหลังจากเชื้อเจริญได้ 5 วัน แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

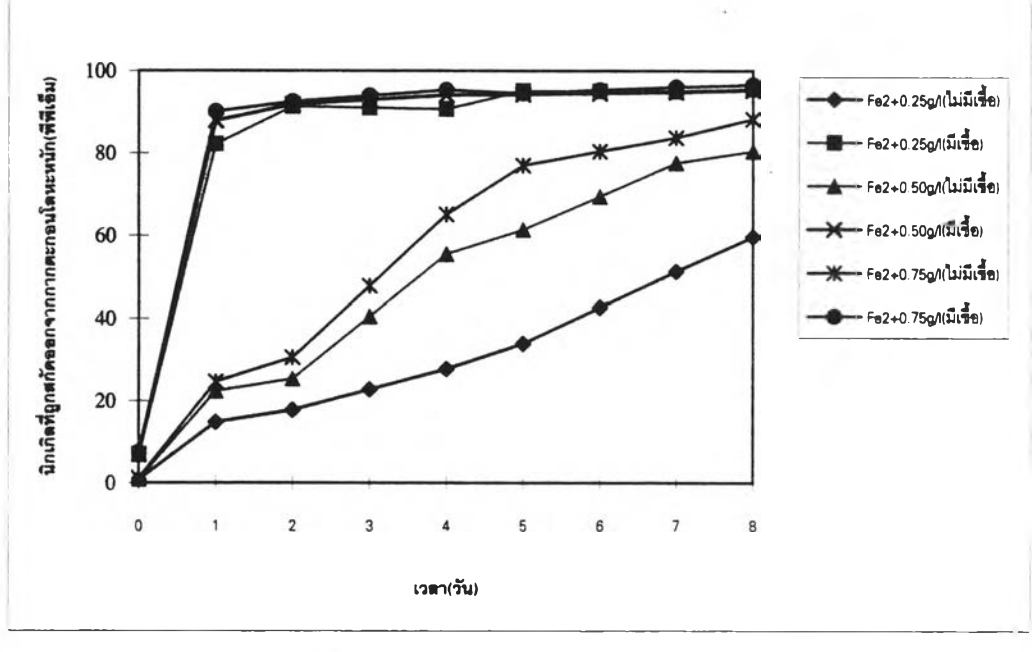
4.5 ผลของปริมาณเฟอร์รัสอิออนต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans*

เนื่องจากเฟอร์รัสอิออนมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของ *T. ferrooxidans* และมีความสำคัญต่อกระบวนการลิชชิ่งทั้งในปฏิกิริยาทางเคมีและในปฏิกิริยาของจุลินทรีย์ที่เกิดโดยทางอ้อม จึงทำการศึกษาสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก โดยใช้ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารอาหาร 100 มิลลิลิตร ซึ่งในอาหารจะเติมเฟอร์รัสอิออนในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.25, 0.50 และ 0.75 กรัมต่อลิตร เลี้ยงในเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ในที่ที่มีเฟอร์รัสอิออนความเข้มข้น 0.25, 0.50 และ 0.75 กรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 เมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* กับสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* พบว่า ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* นิกเกิลจะละลายออกมามากกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 พีเอชของการทดลอง พบว่า ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* พีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 2.9 แล้วค่อยๆ ลดลงเป็น 2.2 ส่วนที่ไม่มี *T. ferrooxidans* พีเอชจะคงที่อยู่ที่ประมาณ 3.0 (รูปที่ 4.23) การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่ทุกปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสอิออนเฟอร์รัสอิออนจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* เฟอร์รัสอิออนจะลดปริมาณลงอย่างช้าๆ (รูปที่ 4.24)

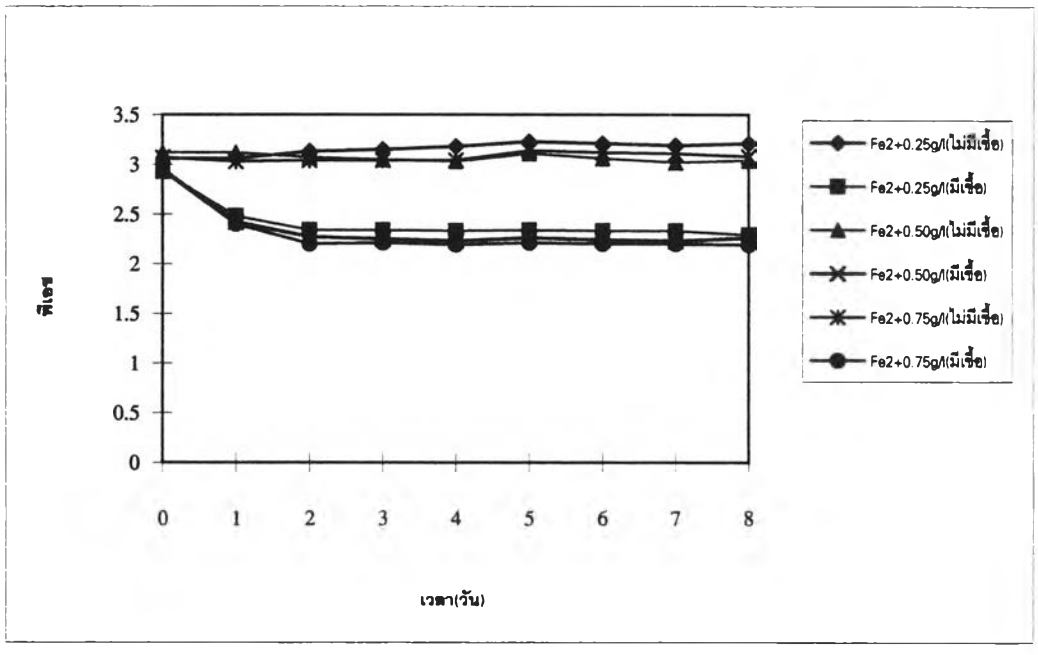
จากสมมุติฐานการละลายของนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ดังที่ได้กล่าวไปแล้วจะเห็นว่าปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะมีผลต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยกระบวนการไบโอลิชชิ่ง และจากสมการที่ 4.6 พบว่า กากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม จะเกิดปฏิกิริยาพอดีกับ $Fe_2(SO_4)_3$ 1.1 กรัม และ $Fe_2(SO_4)_3$ เกิดจาก $FeSO_4.7H_2O$ ที่เติมลงไปในสารอาหาร ดังนั้นกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัม จะต้องใช้ $FeSO_4.7H_2O$ 3.08 กรัม จึง



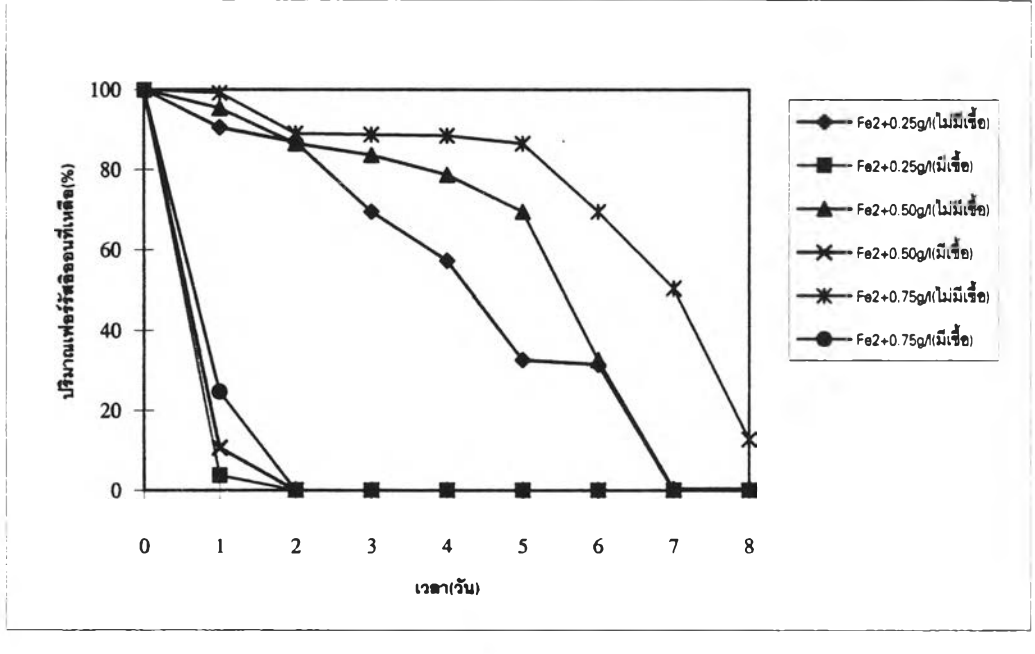
รูปที่ 4.21 ปริมาณนิกเกิล(เปอร์เซ็นต์)ที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในสารละลายโดย *T. ferrooxidans* ในระบบที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนแตกต่างกัน



รูปที่ 4.22 ปริมาณนิกเกิล(พีพีเอ็ม)ที่ถูกสกัดออกมาอยู่ในสารละลายโดย *T. ferrooxidans* ในระบบที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนแตกต่างกัน



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกาก
ตะกอนโลหะหนักโดย*T. ferrooxidans* ในระบบที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนต่างๆกัน



รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกาก
ตะกอนโลหะหนักโดย*T. ferrooxidans* ในระบบที่มีปริมาณเฟอร์รัสอิออนต่างๆกัน

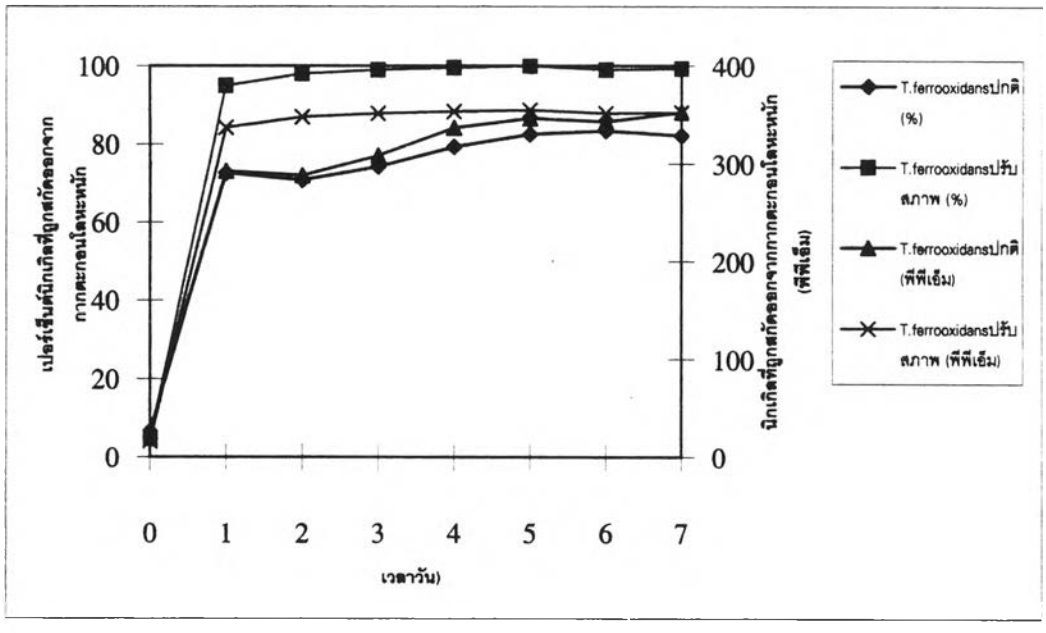
จะเกิดการละลายของนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้หมด และถ้ากากตะกอนโลหะหนัก 0.02 กรัม จะต้องใช้ $FeSO_4.7H_2O$ 0.0556 กรัม จึงจะเกิดการละลายของนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จากการทดลองศึกษาผลของปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะใช้ $FeSO_4.7H_2O$ 0.125, 0.250 และ 0.375 กรัม ซึ่งมากกว่าปริมาณที่ทำปฏิกิริยาได้พอดี จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่าง เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่เติมลงไปมีปริมาณมากเกินพอต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออนไปเป็นเฟอร์ริกอิออนมีผลต่อการละลายของนิกเกิล ดังนั้นปฏิกิริยาไบโอลิชชิ่งจึงช่วยส่งเสริมการละลายของนิกเกิลมากขึ้น โดย *T. ferrooxidans* จะช่วยเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์เฟอร์รัสอิออนไปเป็นเฟอร์ริกอิออน ทำให้เกิดเฟอร์ริกอิออนและกรดซัลฟิวริกในสารละลายมากขึ้น แล้วเฟอร์ริกอิออนและกรดซัลฟิวริกนี้จะไปทำให้เกิดการละลายของนิกเกิลตามสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น

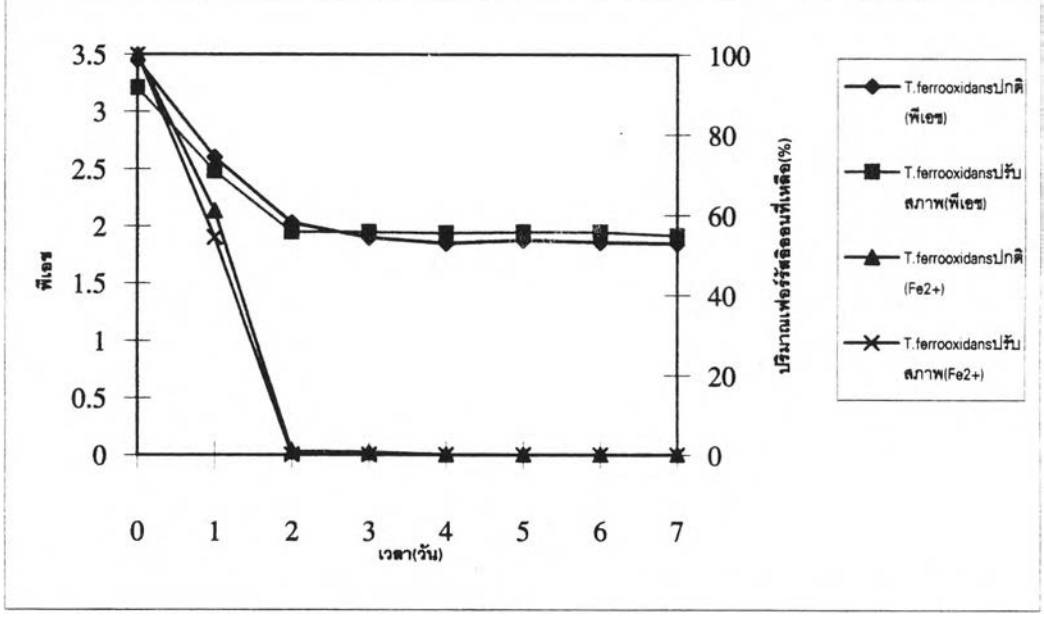
4.6 ผลของการปรับสภาพเชื้อ *T. ferrooxidans* ต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก

จากการศึกษาของ Kai, Nishi และ Takahashi (1995) พบว่า การปรับสภาพเชื้อ *T. ferrooxidans* ให้สามารถทนต่อนิกเกิลอิออนได้สูงถึง 1 กรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากนิกเกิลซัลไฟด์เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Couillard, Mercier และ Chartier (1991), Blais, Tyagi และ Auclair (1992) ซึ่งทำการปรับสภาพเชื้อให้ชินต่อกากตะกอนชุมชน ก่อนนำมาใช้สกัดโลหะหนัก พบว่าสามารถสกัดโลหะหนักได้สูงขึ้น จึงทำการทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยเปรียบเทียบระหว่าง *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพให้ชินต่อกากตะกอนโลหะหนักและ *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ โดยใช้ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรเชื้อ 10 มิลลิลิตร อาหารเลี้ยงเชื้อ 100 มิลลิลิตร

จากการทดลองพบว่า *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพเชื้อสกัดนิกเกิลออกมาได้ 99 เปอร์เซ็นต์ และ *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ สกัดนิกเกิลออกมาได้ 82 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.25)การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายทั้งในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ และ *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ ระดับพีเอชลดลงในลักษณะเดียวกัน คือ จากเริ่มต้นประมาณ 3.00 ลดลงเป็น 1.90 (รูปที่ 4.26) การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงเร็วกว่าสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ (รูปที่ 4.26)



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักระหว่าง *T. ferrooxidans* ปกติและปรับสภาพ



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงพีเอชและปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่เหลือในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ปกติและปรับสภาพ

เมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักระหว่าง *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ และ *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

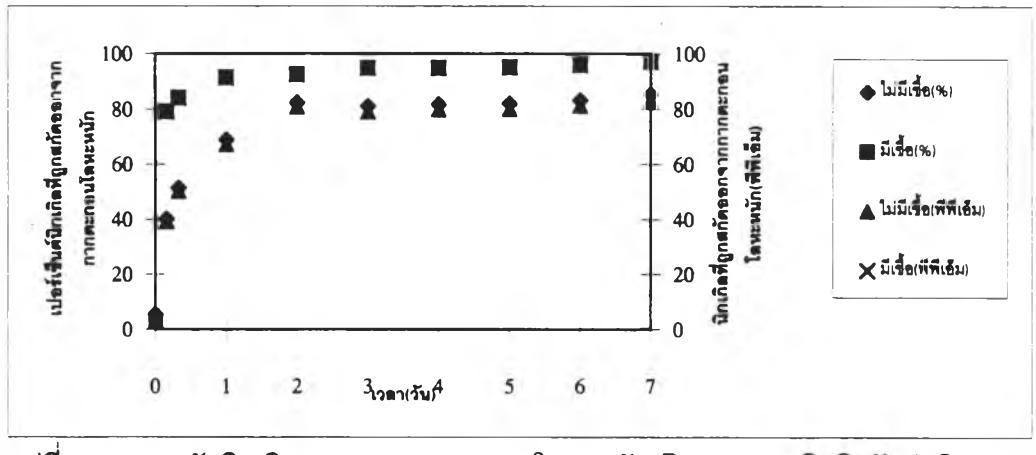
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า *T. ferrooxidans* ที่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ เจริญในที่ที่มีกากตะกอนโลหะหนักได้ดีกว่า *T. ferrooxidans* ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเชื้อ เห็นได้จากปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่เหลืออยู่น้อยกว่า ทำให้สกัดนิกเกิลออกมาจากกากตะกอนโลหะหนักได้มากกว่า แสดงว่าการปรับสภาพเชื้อ ทำให้เชื้อชินต่อกากตะกอนโลหะหนัก สามารถปรับสภาพตัวเองให้ทนต่อพิษของกากตะกอนโลหะหนักได้มากขึ้น จึงเจริญได้มาก และสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักได้มาก

4.7 ผลของปริมาณกากตะกอนโลหะหนักต่อการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans*

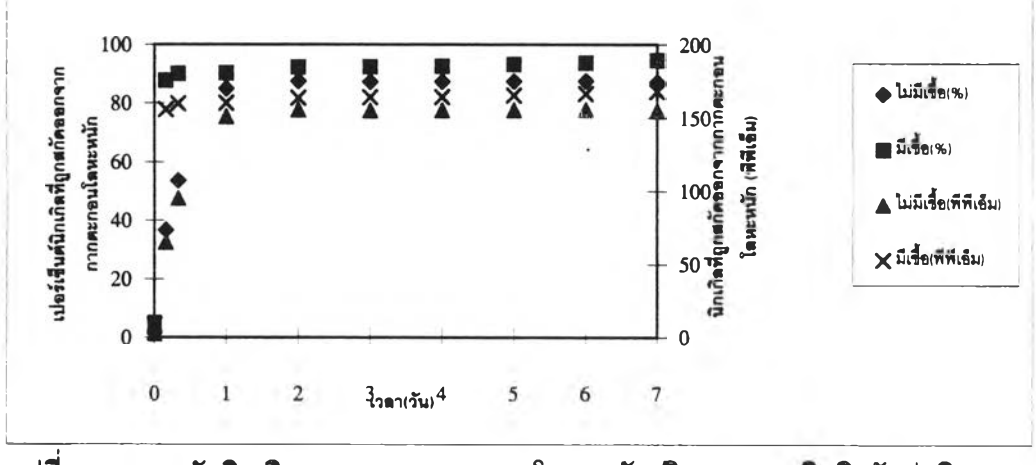
เมื่อทดลองสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในระบบที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ 9K medium 100 มิลลิลิตร *T. ferrooxidans* อายุ 18 ชั่วโมง ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และกากตะกอนโลหะหนักปริมาณต่าง ๆ กัน ได้แก่ 200, 400, 800 มิลลิกรัมต่อลิตร 1, 5, 8 กรัมต่อลิตร ทำการทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งไม่เติม *T. ferrooxidans* เลี้ยงในเครื่องเขย่าที่มีความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากการทดลองพบว่า ที่ทุกปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ปริมาณนิกเกิลจะถูกสกัดออกมามากกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* (รูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 และ 4.32) การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลาย ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* พีเอชจะลดลงต่ำกว่าในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* (รูปที่ 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38) ปริมาณเฟอร์รัสอิออน ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* เฟอร์รัสอิออนจะลดปริมาณลงอย่างรวดเร็วและหมดลงในช่วงสุดท้ายของการทดลอง ส่วนในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* เฟอร์รัสอิออนจะลดปริมาณลงอย่างช้า ๆ (รูปที่ 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37 และ 4.38)

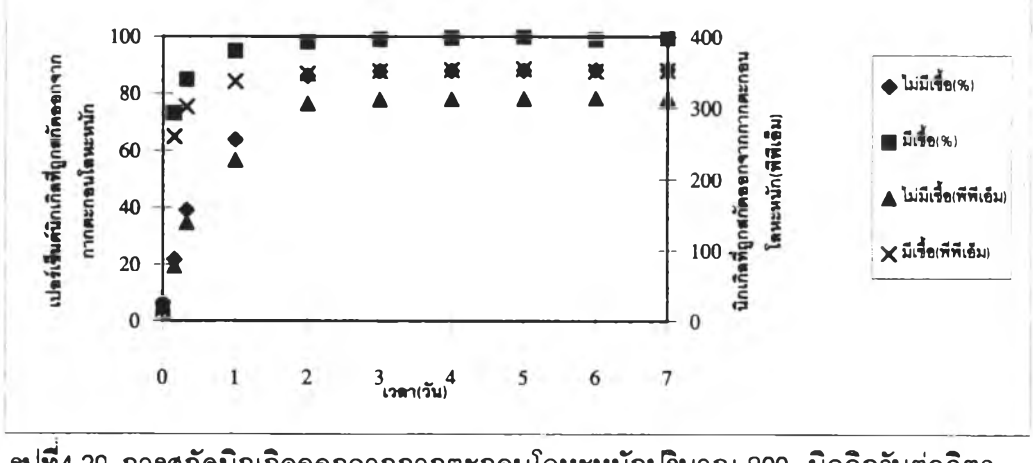
เมื่อเปรียบเทียบสภาวะที่มีปริมาณกากตะกอนโลหะหนักแตกต่างกัน พบว่า ที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 800 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลจะถูกสกัดออกมามากที่สุด ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ และที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 200 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลจะถูกสกัดออกมาได้ 97 และ 94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้นเป็น 1, 5 และ 8 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการสกัดนิกเกิลจะลดลง ซึ่งที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 1, 5 และ 8 กรัมต่อลิตร สกัดนิกเกิลออกมาได้ 85, 80 และ 82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



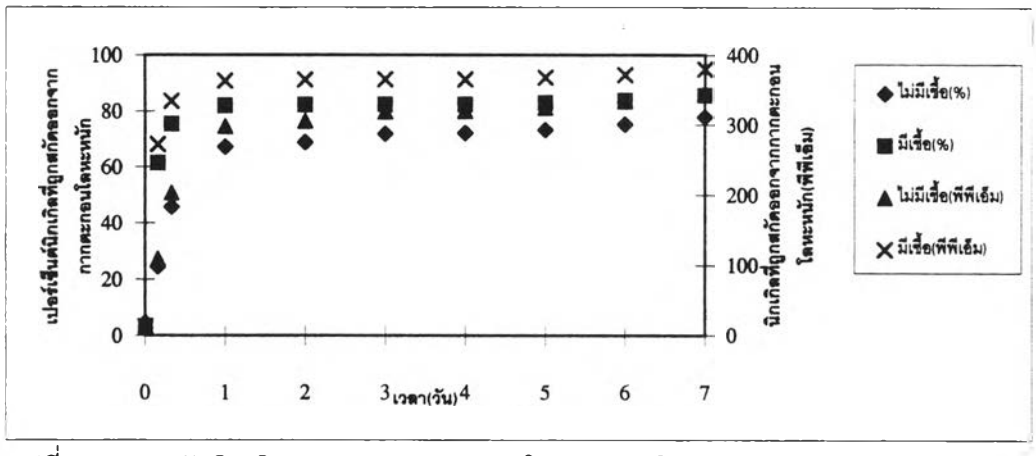
รูปที่4.27 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย *T. ferrooxidans*



รูปที่4.28 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย *T. ferrooxidans*

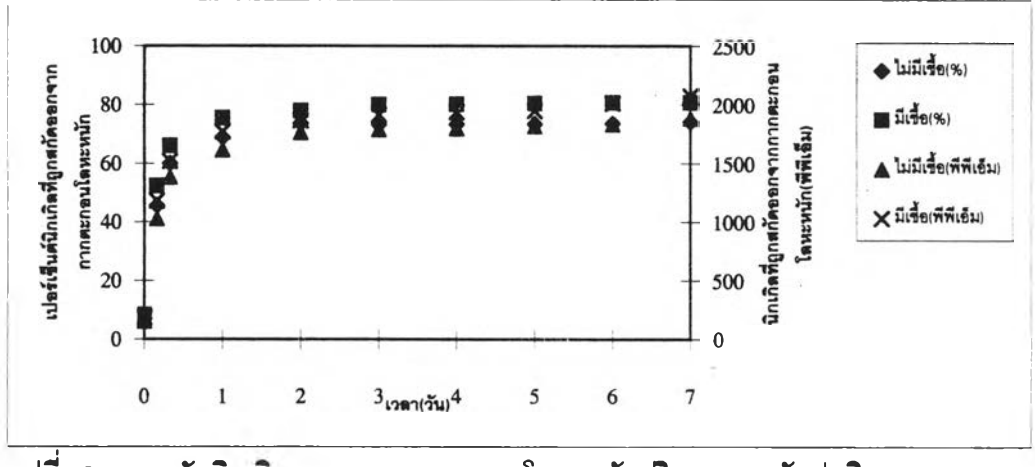


รูปที่4.29 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร โดย *T. ferrooxidans*



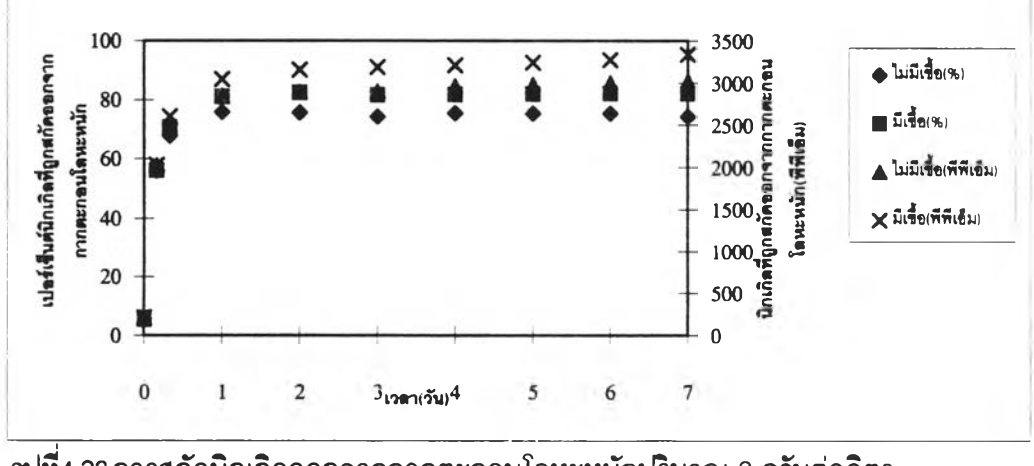
รูปที่4.30 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 1 กรัมต่อลิตร

โดย *T. ferrooxidans*



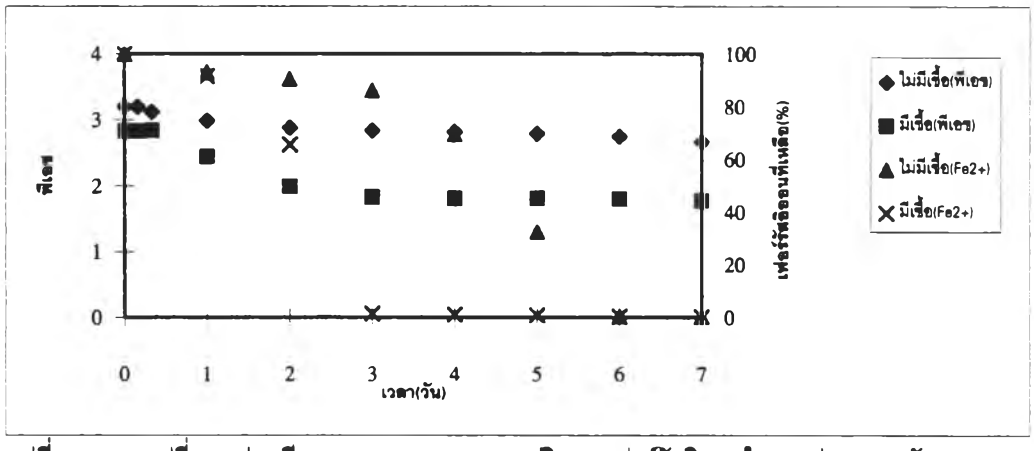
รูปที่4.31 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร

โดย *T. ferrooxidans*

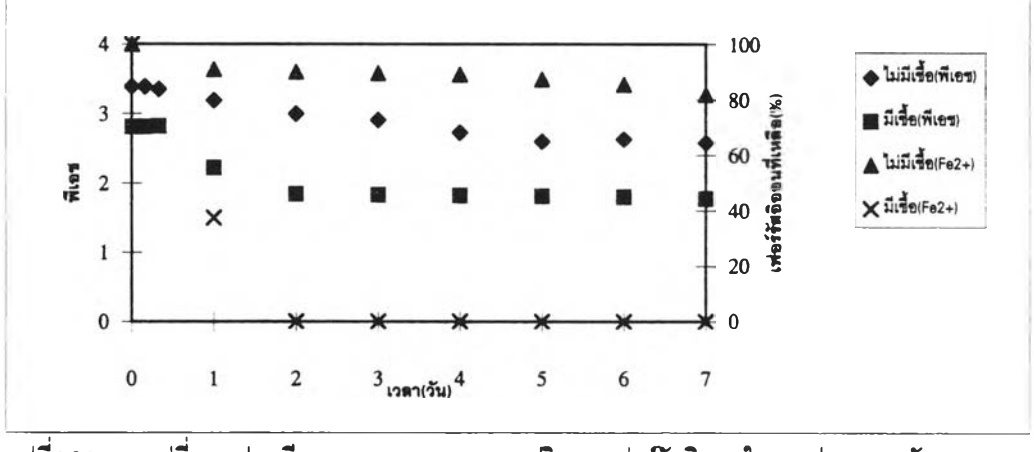


รูปที่4.32 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 8 กรัมต่อลิตร

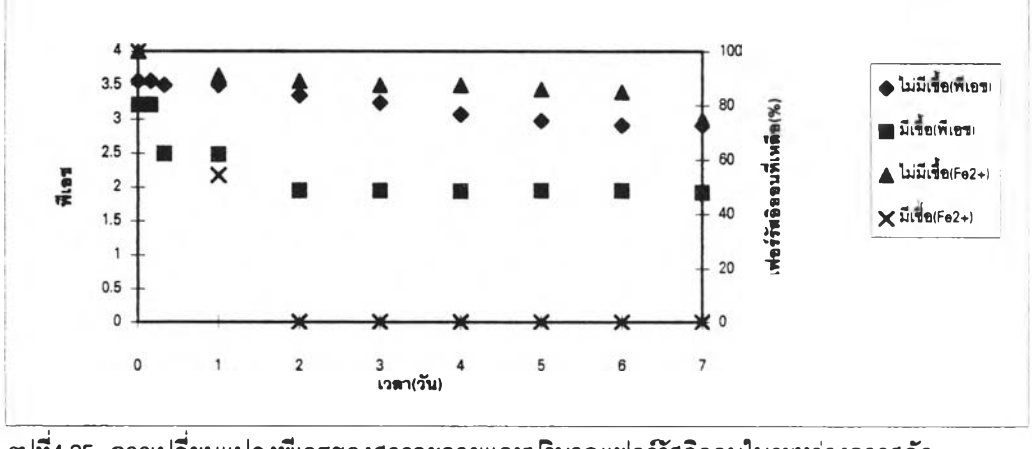
โดย *T. ferrooxidans*



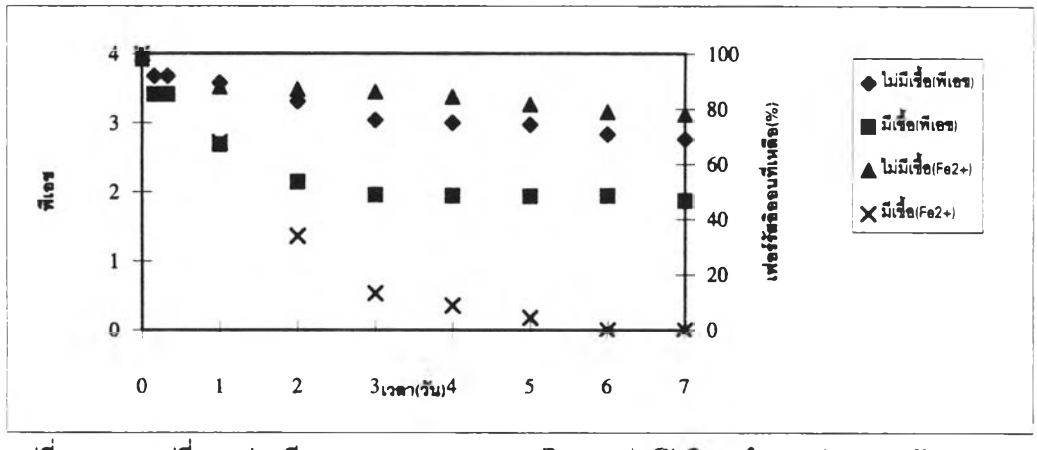
รูปที่4.33 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 200 มิลลิกรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*



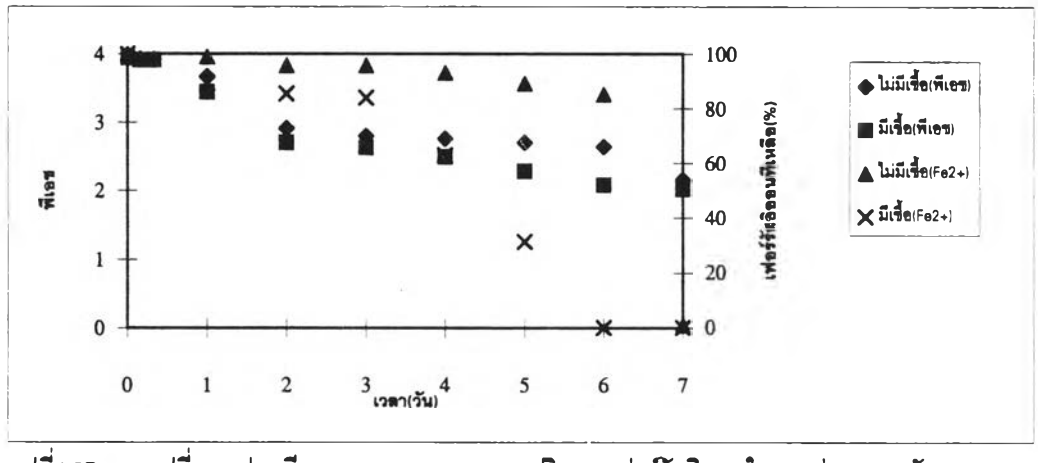
รูปที่4.34 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 400 มิลลิกรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*



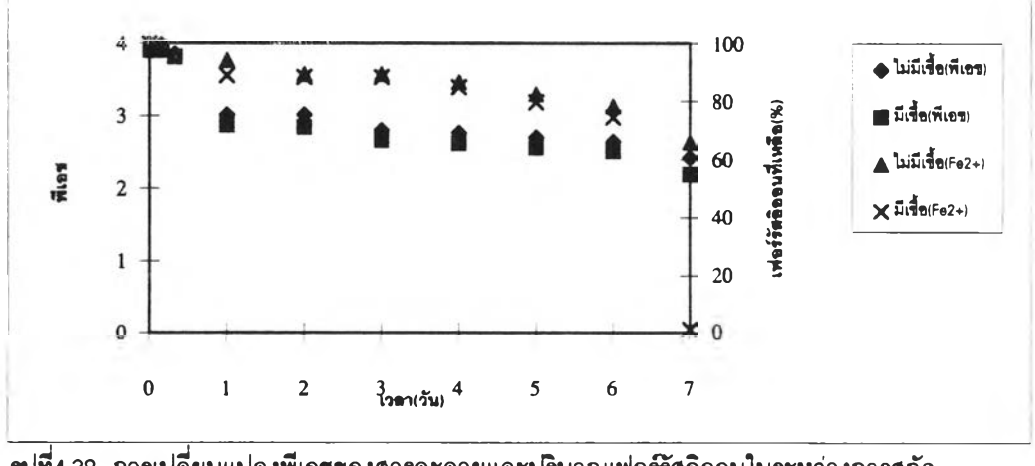
รูปที่4.35 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 800 มิลลิกรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*



รูปที่4.36 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 1 กรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*



รูปที่4.37 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 5 กรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*



รูปที่4.38 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายและปริมาณเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 8 กรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*

แสดงดังรูปที่ 4.39 การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลาย ที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 200, 400 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 กรัมต่อลิตร พีเอชลดลงในลักษณะเดียวกัน คือพีเอชเริ่มต้นประมาณ 3.00 ลดลงเป็น 1.90 ซึ่งลดลงมากกว่าที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 5 และ 8 กรัมต่อลิตร โดยพีเอชเริ่มต้นประมาณ 3.90 ลดลงเป็น 2.00 ระดับพีเอชที่ลดลงจะสอดคล้องกับปริมาณนิกเกิลที่ละลายออกมามากขึ้น (รูปที่ 4.40) การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 200, 400 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1 กรัมต่อลิตร ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงอย่างรวดเร็วและหมดไปในเวลา 3 วัน ส่วนที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 5 และ 8 กรัมต่อลิตร ปริมาณเฟอร์รัสอิออนจะลดลงอย่างช้า ๆ (รูปที่ 4.41)

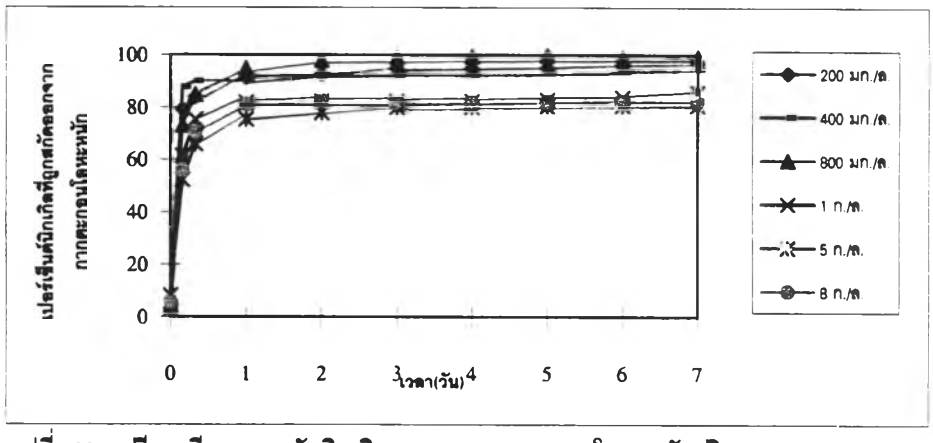
เมื่อทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one-way analysis of variance พบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในสภาวะที่มีปริมาณกากตะกอนโลหะหนักแตกต่างกัน ประสิทธิภาพจะแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

การที่ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักลดลงเมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุจากความเป็นพิษของโลหะหนักในกากตะกอนโลหะหนักต่อ *T. ferrooxidans* ซึ่งที่กากตะกอนโลหะหนักปริมาณน้อย เชื้อสามารถเจริญเติบโตได้ดี จึงเกิดการสกัดนิกเกิลออกมามาก แต่เมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักเพิ่มขึ้น เชื้อเจริญเติบโตได้น้อยลง จึงเกิดการสกัดนิกเกิลออกมาน้อย จากการทดลองพบว่า ปริมาณกากตะกอนโลหะหนักที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการสกัดนิกเกิลออกมาได้สูงสุดคือ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสกัดนิกเกิลได้ 99 เปอร์เซ็นต์

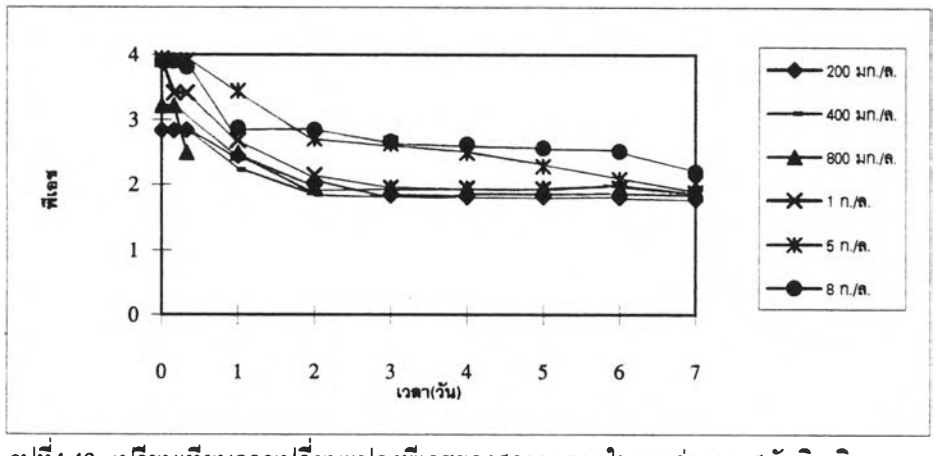
4.8 การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในระบบถังปฏิกรณ์แบบทีละเท

จากการศึกษาการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* โดยพิจารณาผลของปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก พบว่าเมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักมากกว่า 1 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลจะลดลง และที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนัก 800 มิลลิกรัมต่อลิตร จะสกัดนิกเกิลออกมาได้มากที่สุดถึง 99 เปอร์เซ็นตร์ จึงใช้ปริมาณกากตะกอนโลหะหนักนี้ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบทีละเทปริมาตร 9 ลิตร ซึ่งมีอาหาร 9K medium 7 ลิตร เชื้อ *T. ferrooxidans* อายุ 18 ชั่วโมง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ให้อากาศอย่างมากเกินพอ ทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่เติม *T. ferrooxidans*

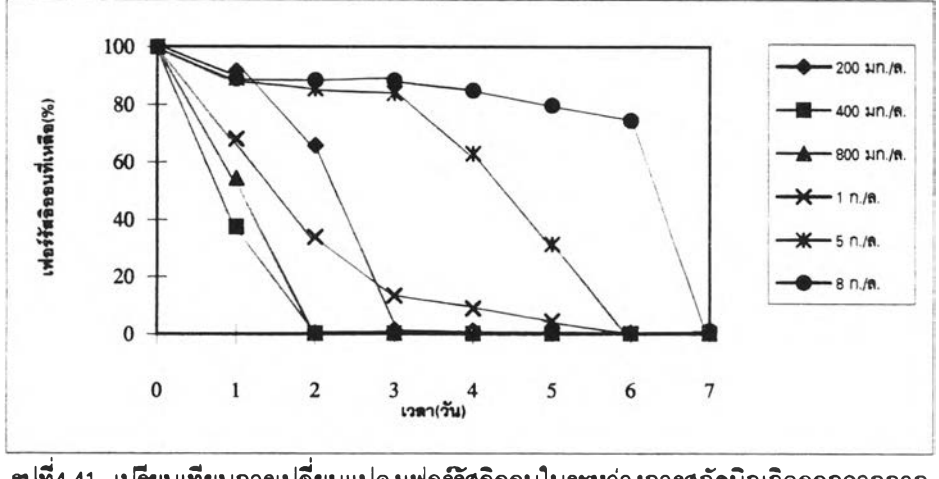
จากการทดลองพบว่า ในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* นิกเกิลถูกสกัดออกมาได้ 77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ซึ่งสกัดนิกเกิลออกมาได้ 90 เปอร์เซ็นต์



รูปที่4.39 เปรียบเทียบการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 200, 400, 800 มิลลิกรัมต่อลิตร 1, 5 และ 8 กรัมต่อลิตร โดย *T. ferrooxidans*



รูปที่4.40 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักปริมาณ 200, 400, 800 มิลลิกรัมต่อลิตร 1, 5 และ 8 กรัมต่อลิตร โดย *T. ferrooxidans*



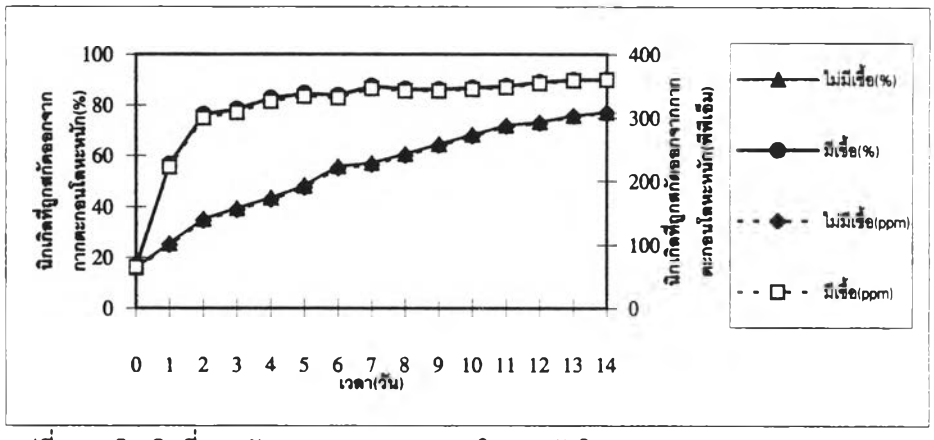
รูปที่4.41 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเฟอร์รัสอิออนในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก 200, 400, 800 มิลลิกรัมต่อลิตร 1, 5, 8 กรัมต่อลิตรโดย *T. ferrooxidans*

(รูปที่ 4.42) การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* พีเอชคงที่ที่ประมาณ 3.50 ส่วนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* พีเอชเริ่มต้นที่ประมาณ 3.20 และจะลดลงตลอดเวลา พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 1.80 (รูปที่ 4.43) การเปลี่ยนแปลงค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลค่อยๆ เพิ่มขึ้นในระยะแรกและคงที่ที่ 300 มิลลิโวลต์ ส่วนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลเพิ่มขึ้นตลอดเวลา จากเริ่มต้น 300 มิลลิโวลต์ เป็น 600 มิลลิโวลต์ (รูปที่ 4.43) ระดับอุณหภูมิของระบบทั้งที่มีและไม่มี *T. ferrooxidans* อุณหภูมิคงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.44) การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสอิออน ในสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* ปริมาณเฟอร์รัสอิออนค่อนข้างคงที่ และลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงสุดท้าย ส่วนในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* เฟอร์รัสอิออนลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 4.44)

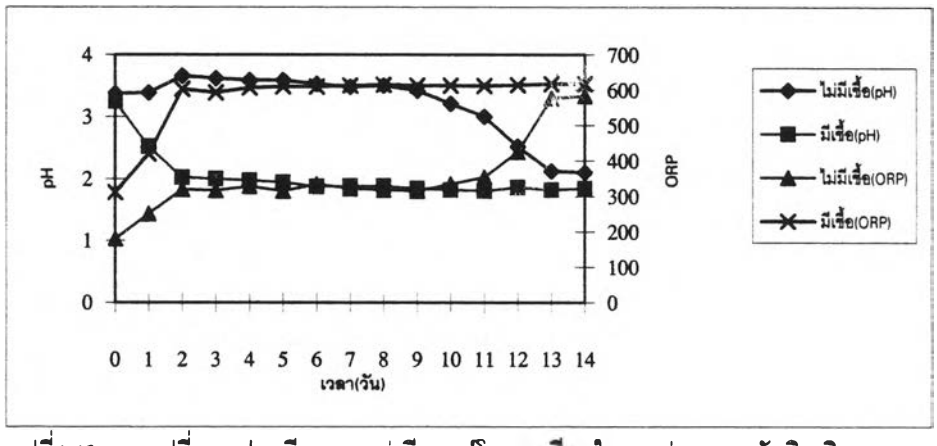
จากการทดสอบข้อมูลทางสถิติด้วยวิธี one - way analysis of variance พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท ในสภาวะที่มี *T. ferrooxidans* และสภาวะที่ไม่มี *T. ferrooxidans* ประสิทธิภาพจะแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

จากค่าพีเอชและปริมาณเฟอร์รัสอิออนที่ลดลง แสดงว่าเชื้อมีการเจริญ และค่ารีดอกซ์-โพเทนเชียลที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการลิชชิ่งได้ดี แต่เมื่อพิจารณาผลการสกัดนิกเกิลในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท เปรียบเทียบกับในระบบขวดเขย่า พบว่าในระบบขวดเขย่า สกัดนิกเกิลได้ 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าในระบบถังปฏิกรณ์แบบทีละเทซึ่งสกัดนิกเกิลได้ 90 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากในระบบขวดเขย่า มีการผสมที่สมบรูณ์กว่าในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการศึกษาของ บริบรูณ์ พุทธรักษา (2537) ซึ่งได้ศึกษาความสามารถของ *T. ferrooxidans* ในการสกัดนิกเกิลออกจากตะกอนนิกเกิลซัลไฟด์สังเคราะห์ ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ปริมาตร 15 ลิตร ซึ่งพบว่า ในระยะเวลากักเก็บ 4 วัน ที่ปริมาณของนิกเกิลซัลไฟด์ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร สกัดนิกเกิลได้ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการกับการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนัก ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเทที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ สามารถสกัดนิกเกิลได้ 82 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเวลาเท่ากัน

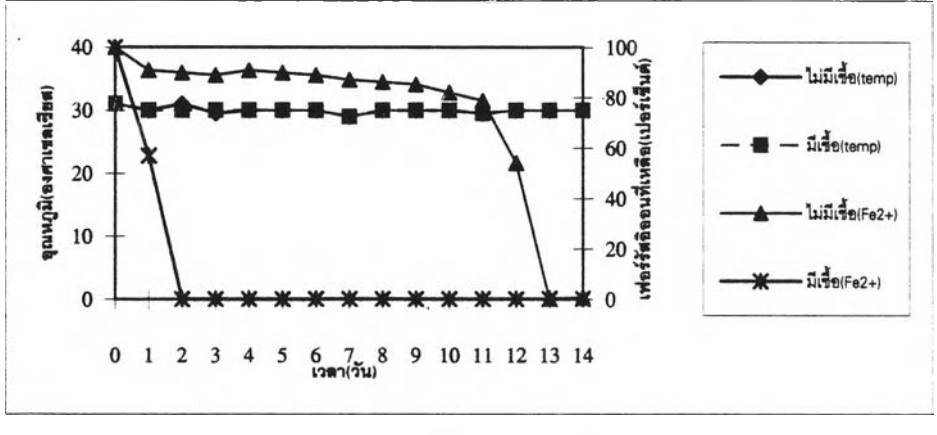
จากผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ระบบถังปฏิกรณ์แบบทีละเท และเป็นระบบเปิด ก็สามารถสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดยใช้ *T. ferrooxidans* ได้



รูปที่4.42 นิกเกิลที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย T. ferrooxidans ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท



รูปที่4.43 การเปลี่ยนแปลงพีเอชและค่ารีดอกซ์โพเทนเชียลในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท



รูปที่4.44 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเฟอร์รัสไอออนและอุณหภูมิของสารละลายในระหว่างการสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนโลหะหนักโดย *T. ferrooxidans* ในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท