บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.1 การดำเนินการทดลอง

4.1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองนี้ เตรียมขึ้นจากสารเคมีนิกเกิลซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์ขั้นต่ำที่ 94% ในการทดลองนี้จึงได้เตรียมความเข้มข้นโดยคำนวณเผื่อความบริสุทธิ์นี้ด้วย จากนั้นจึงได้นำสารเคมีนี้มาผสมกับน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเวอร์สออสโมซีส (RO) สาเหตุที่ต้องใช้น้ำ RO เนื่องมาจาก การทดลองนี้ส่วนใหญ่กระทำที่ความเข้มข้นของนิกเกิลค่อนข้างต่ำประมาณ 10 มก./ล. ดังนั้นจึงเกรงว่าหากใช้น้ำประปาซึ่งมีสารอื่นๆปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก อาจมีผลรบกวนต่อการทดลองได้

4.1.2 การเตรียมตัวกลางเศษเหล็ก

ก่อนเริ่มการทดลองได้ทำการเตรียมเศษเหล็กที่จะใช้เป็นตัวกลางในการทดลอง โดยได้นำเศษเหล็กจากโรงกลึงที่ต่างๆ ปรากฏว่าเศษเหล็กที่ได้มีลักษณะรูปร่างและสีไม่สม่ำเสมอ จึงเกรงว่าถ้านำเศษเหล็กที่มีรูปร่างลักษณะไม่เหมือนกันนี้มาทำการทดลอง อาจทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ จึงได้นำเหล็กไปทำการกลึงเองโดยได้ไปใช้เครื่องกลึงของคณะวิศวกรรมเครื่องกล จนได้เหล็กที่มีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 จากนั้นจึงได้ทำการตัดเศษเหล็กให้เป็นชิ้นเล็กๆ นำไปทำความสะอาดล้างคราบน้ำมันที่เคลือบบนผิวเหล็กออก และปล่อยทิ้งไว้ให้สัมผัสกับน้ำและอากาศเป็นเวลา 1 เดือน จนกระทั่งได้ตัวกลางเหล็กออกไซด์ตามที่ต้องการ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ โดยตัวกลางเหล็กออกไซด์ที่ได้มีขนาดเฉลี่ย กว้าง 4.4 มม. ยาว 6.5 มม. หนา 0.3 มม.

4.1.3 ระยะเวลาการทำวิจัย

ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดประมาณ 14 เดือน โดยเริ่มจากเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2542 ถึงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2543 ช่วง 2 เดือนแรกเป็นการเตรียมตัวกลางเศษเหล็ก และติดตั้งอุปกรณ์ และหลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองและวิเคราะห์ผลตามลำดับ ลำดับการทดลองและระยะเวลาที่ทำการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาการทำวิจัย

ลำดับการทดลอง	พ.ศ. 2542								พ.ศ. 2543					
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
การเตรียมตัวกลางเศษเหล็ก และติดตั้งอุปกรณ์	▬	▬												
ส่วนที่ 1 วิธีการทดลองโดยใช้คอลัมน์แบบต่อเนื่อง														
การทดลองที่ 1.1 ศึกษาผลของความสูงชั้นตัวกลาง			▬	▬	▬	▬								
การทดลองที่ 1.2 ศึกษาผลของอัตราไหล								▬	▬	▬	▬			
ส่วนที่ 2 วิธีการทดลองแบบแบตช์														
การทดลองที่ 2.1 ศึกษา adsorption isotherm				▬	▬									
การทดลองที่ 2.2 ศึกษาลักษณะเศษเหล็กด้วย x-ray diffraction						▬								
การทดลองที่ 2.3 ศึกษาผลของพีเอช							▬	▬						
การทดลองที่ 2.4 ศึกษาผลของออกซิเจนละลาย								▬	▬					
การทดลองที่ 2.5 ศึกษาผลของอิออนลบ										▬	▬			
การทดลองที่ 2.6 ศึกษาผลของอิออนบวก												▬	▬	

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง

4.2.1 ผลของความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

ในการทดลองเพื่อทดสอบหาความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กในคอลัมน์ที่เหมาะสมต่อการกำจัดนิกเกิลได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1 โดยกำหนดความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กไว้ที่ 20, 40, 60 และ 80 ซม. ตามลำดับ

รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

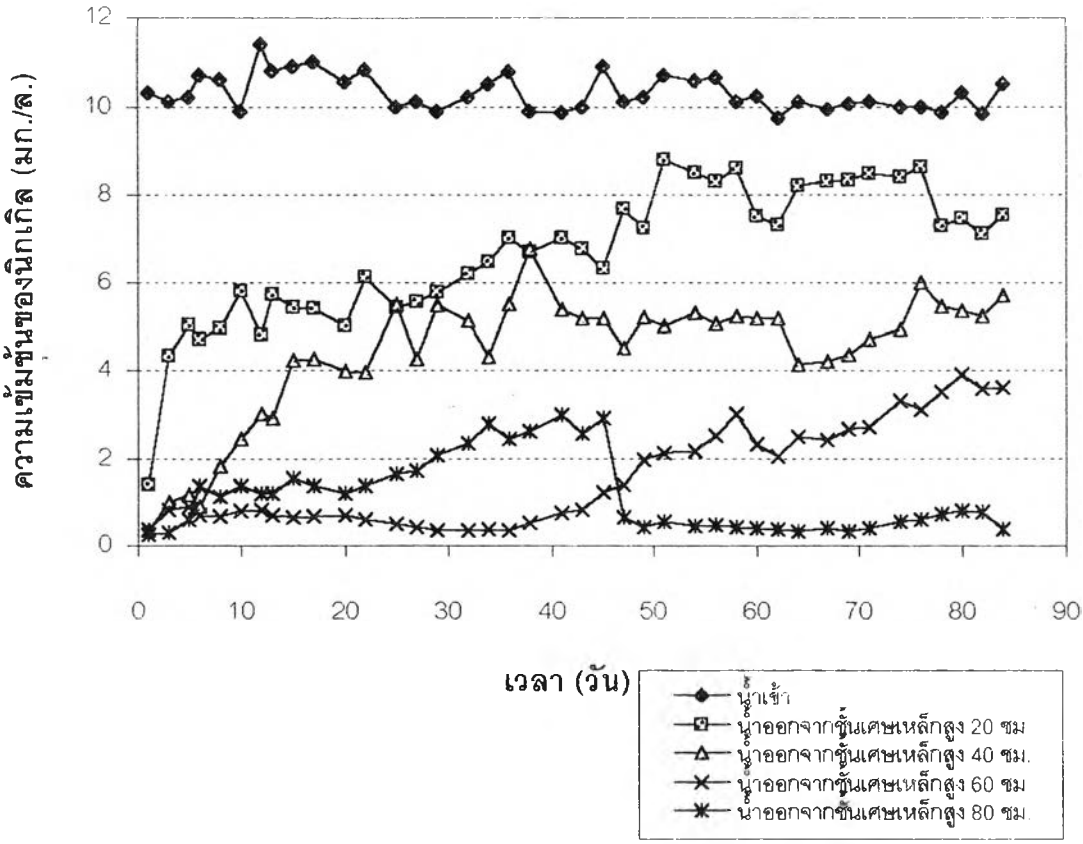
จากรูปที่ 4.1 นอกจากจะควบคุมระดับความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กไว้ที่ 20, 40, 60 และ 80 ซม. แล้ว ยังได้ควบคุมให้ความหนาแน่นของตัวกลางเศษเหล็กทั้ง 4 คอลัมน์ ให้คงที่อีกด้วย โดยควบคุมให้ความหนาแน่นเท่ากันที่ 2.8 กรัมต่อซม. ของความสูงของคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.

การปรับอัตราไหลของปั๊มน้ำทั้ง 4 ตัวให้คงที่ 10 ลิตรต่อวัน พบว่าเมื่อระดับน้ำในถังเก็บน้ำเสียสังเคราะห์เปลี่ยน จะมีผลทำให้อัตราไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย คือประมาณ ±0.2 ลิตรต่อวัน ดังนั้นจึงได้ทำการปรับตั้งอัตราไหลของน้ำที่ระดับกึ่งกลางของน้ำในถังเพื่อให้อัตราไหลเฉลี่ย ใกล้เคียงกับ 10 ลิตรต่อวัน ให้มากที่สุด

ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงที่ ตาราง 4.2 และผลของความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1

ตัวแปร	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 20 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 40 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 60 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 80 ซม.
อัตราไหล (ลิตร/วัน)	10	10	10	10
ความหนาแน่นเศษเหล็ก (กรัมต่อซม.ของคอลัมน์ ∅ 2.5 ซม)	2.8	2.8	2.8	2.8
[Ni] น้ำเข้าเฉลี่ย (มก./ล.)	10.32	10.32	10.32	10.32
พีเอชน้ำเข้าเฉลี่ย	5.64	5.64	5.64	5.64
[Ni] น้ำออกเฉลี่ย (มก./ล.)	6.71	4.43	1.67	1.11
พีเอชน้ำออกเฉลี่ย	5.47	5.63	5.42	5.54

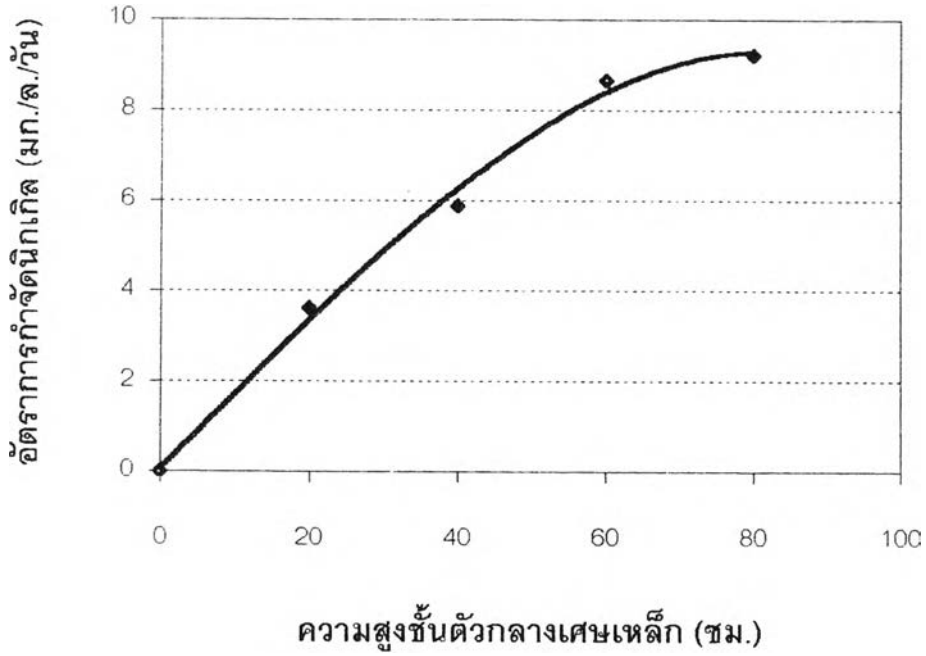


รูปที่ 4.2 ผลของความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

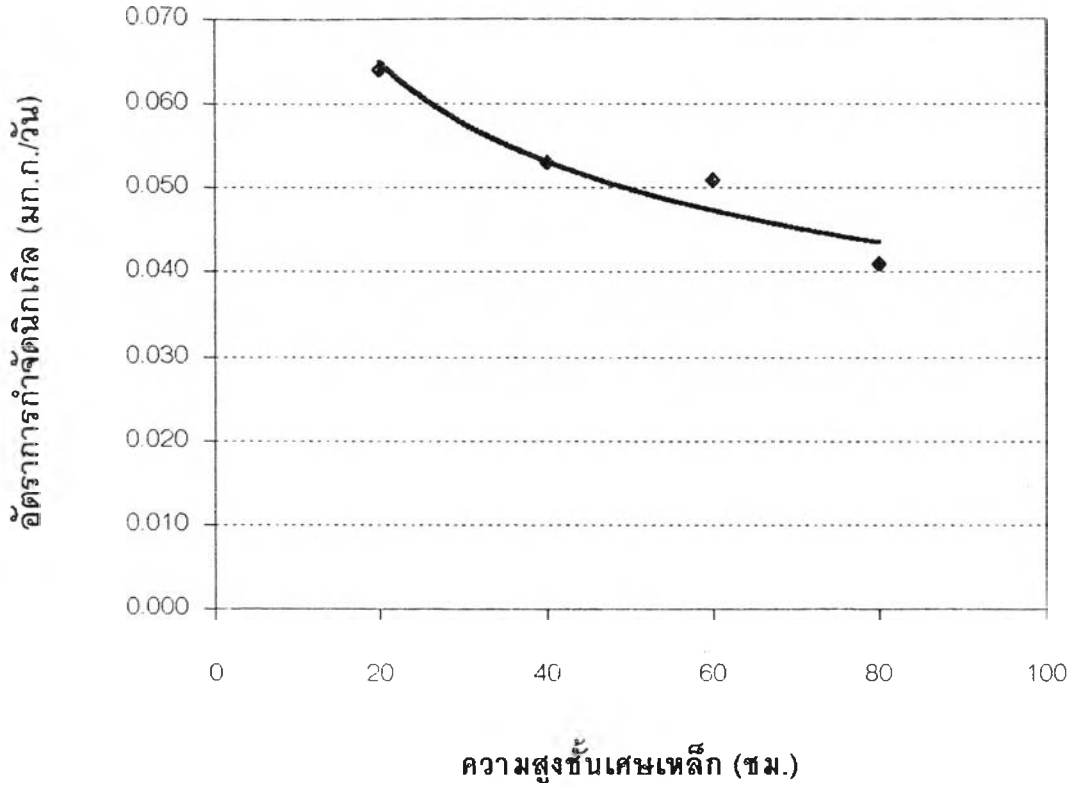
การทดลองได้ดำเนินเป็นเวลา ทั้งสิ้น 3 เดือน และ ผลของความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล ได้สรุปไว้ใน รูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความสูงของชั้นตัวกลาง โดยมีอัตราการป้อนนิกเกิลเฉลี่ยเข้าที่แต่ละคอลัมน์ 10.32 มก./ล./วัน อย่างก็ตามเมื่อความสูงของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้นมากกว่า 60 ซม. อัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีอัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 8.65 มก./ล./วัน ที่ความสูง 60 ซม. เป็น 9.21 มก./ล./วัน ที่ความสูง 80 ซม.

ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงชั้นเศษเหล็กและความสามารถในการกำจัดนิกเกิล ว่าการเพิ่มขึ้นของความสูงของชั้นตัวกลาง เป็นการลดความสามารถในการกำจัดนิกเกิล สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจาก การที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอในส่วนล่างของคอลัมน์ ซึ่งจะเป็นผลทำให้ เกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่นไม่สมบูรณ์ของ เศษเหล็กที่จะเป็นเหล็กออกไซด์และเกิดหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว โดยสังเกตได้จากสีของเหล็กที่มีความแตกต่างกัน คือ สีน้ำตาล และสีดำ โดยสีดำจะแสดงถึงการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่นไม่สมบูรณ์ และคาดว่าเหล็กที่มีสีดำจะเป็นส่วนที่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชั้นเศษเหล็กที่มีความสูงมาก เช่น 80 ซม. จะมีเหล็กส่วนที่มีสีดำมากตามไปด้วย นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นอีกว่า ระหว่าง

ช่วงวันที่ 5 ถึง 45 ของการทดลอง คอลัมน์ที่มีชั้นเหล็กสูง 80 ซม เกิดน้ำท่วมคอลัมน์เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำกว่า คอลัมน์ที่มีชั้นเหล็กสูง 60 ซม. หลังจากวันที่ 45 ได้ทำการแก้ไขส่วนที่อุดตันที่ปลายทางออกของคอลัมน์ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกริยาการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงชั้นเหล็กกับอัตราการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงชั้นเศษเหล็ก และความสามารถในการกำจัดนิกเกิล

ในส่วนสมดุลของมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็ก ซึ่งดำเนินการทดลองทั้งสิ้นเป็นเวลา 89 วัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมดุลมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็กจากการทดลอง

ตัวแปร	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 20 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 40 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 60 ซม.	ชั้นตัวกลางเศษเหล็กสูง 80 ซม.
นิกเกิลในน้ำเข้า (มก.)	9,185	9,185	9,185	9,185
นิกเกิลที่สะสมในชั้นตัวกลางเศษเหล็ก (มก.)	3,213	5,242	7,699	8,197
นิกเกิลในน้ำออก (มก.)	5,972	3,943	1,486	988

4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่อัตราไหลต่าง ๆ

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแปรผันโดยตรงกับความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กในคอลัมน์ แต่คอลัมน์ที่มีชั้นตัวกลางสูง จะมีข้อจำกัดเรื่องการอุดตันของน้ำในคอลัมน์ และการถ่ายเทของออกซิเจนในระบบ การทดลองนี้จึงได้ทำการปรับปรุงโดยการตัดคอลัมน์ความยาว 1 เมตร ออกเป็น 3 ส่วน เท่าๆกัน จะได้คอลัมน์ขนาดความยาวประมาณ 33.5 ซม. ทั้งสิ้นจำนวน 12 ท่อน และได้ทำการบรรจุตัวกลางเศษเหล็กแต่ละท่อนสูง 30 ซม. จากนั้นนำไปติดตั้งเป็นอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.5 ทำให้ได้คอลัมน์ทั้งหมด 4 คอลัมน์ โดยแต่ละคอลัมน์มีความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็ก 3 X 30 ซม.

จากรูปที่ 4.5 นอกจากจะควบคุมระดับความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กของแต่ละคอลัมน์ไว้ที่ 3 X 30 ซม. แล้ว ยังได้ควบคุมให้ความหนาแน่นของตัวกลางเศษเหล็กทั้ง 4 คอลัมน์ ให้คงที่ด้วย โดยควบคุมให้ความหนาแน่นเท่ากันที่ 2.8 กรัมต่อซม.ของความสูงของคอลัมน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม.

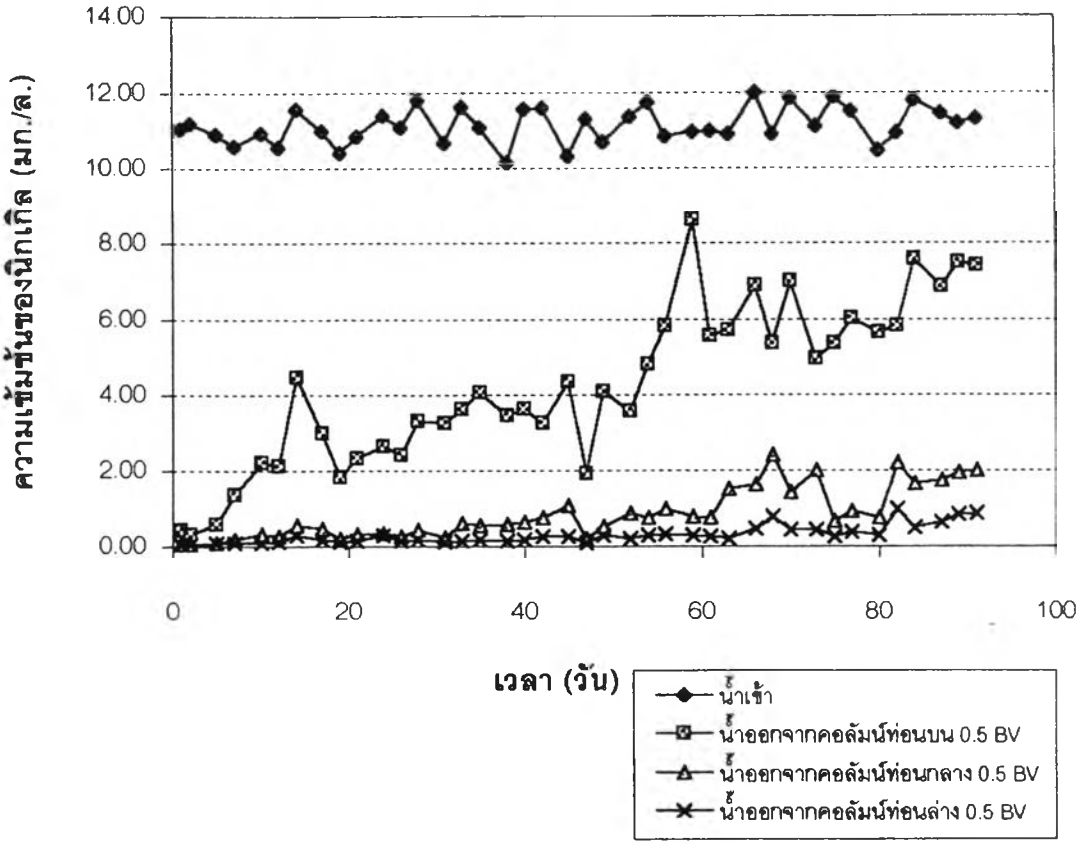
ทำการปรับอัตราไหลของของน้ำเข้าคอลัมน์ทั้ง 4 คอลัมน์ให้เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 BV/Hr ซึ่งจะมีอัตราไหลเท่ากับ 4.89, 9.77. 14.66, และ 19.54 ลิตรต่อวัน ตามลำดับ

รูปที่4.5การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

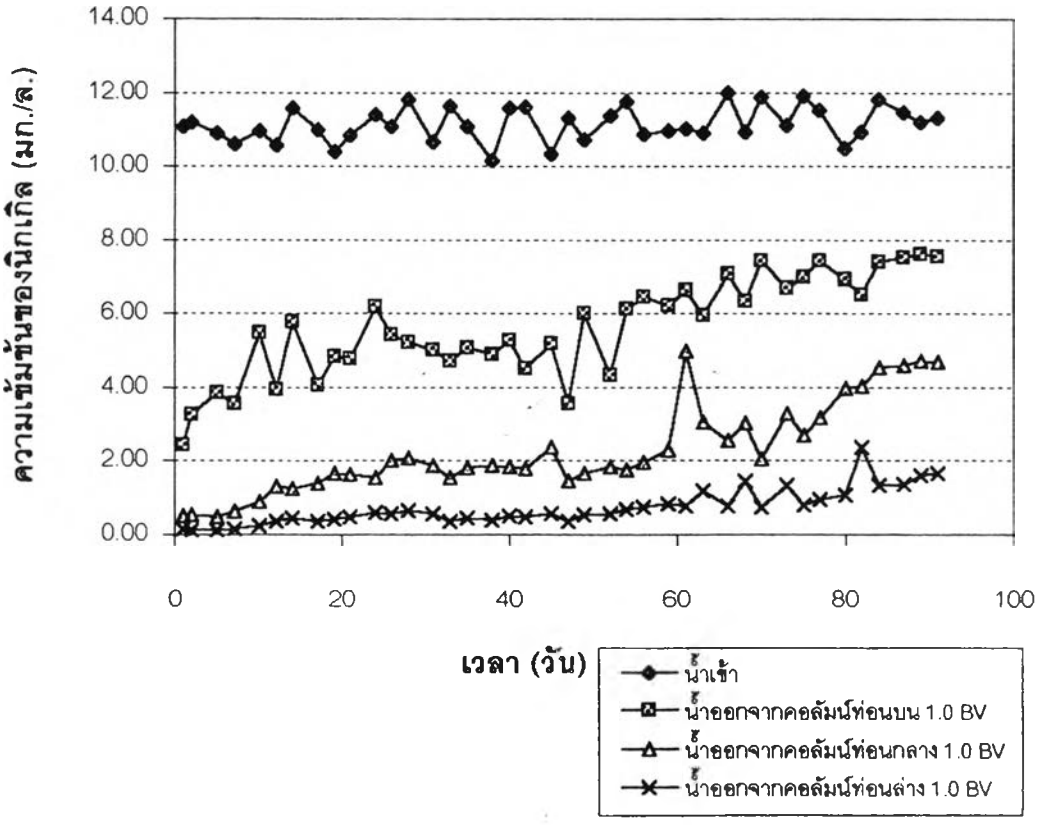
ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.4 และผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.6 ถึง 4.10

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2

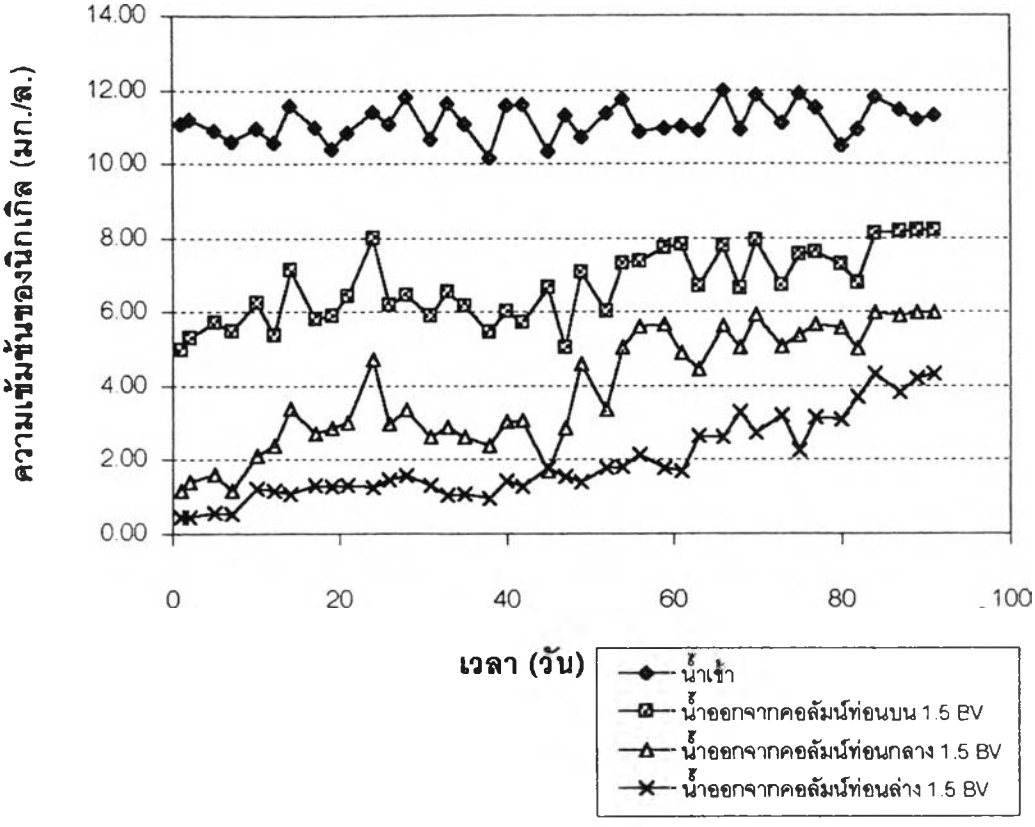
ตัวแปร	อัตราไหล 0.5 BV/Hr	อัตราไหล 1.0 BV/Hr	อัตราไหล 1.5 BV/Hr	อัตราไหล 2.0 BV/Hr
อัตราไหล (ลิตร/วัน)	4.89	9.77	14.66	19.54
ความหนาแน่นเศษเหล็ก (กรัมต่อซม.ของคอลัมน์ ∅ 2.5 ซม)	2.8	2.8	2.8	2.8
ความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็ก	30 ซม. x 3	30 ซม. x 3	30 ซม. x 3	30 ซม. x 3
เวลาสัมผัส (ซม.)	2.0	1.0	0.7	0.5
[Ni] น้ำเข้าเฉลี่ย (มก./ล.)	11.14	11.14	11.14	11.14
พีเอชน้ำเข้าเฉลี่ย	5.52	5.52	5.52	5.52
[Ni] น้ำออกจากคอลัมน์ท่อนบน เฉลี่ย (มก./ล.)	4.22	5.6	6.68	7.67
พีเอชน้ำออกจากคอลัมน์ท่อนบน เฉลี่ย	5.36	5.35	5.34	5.35
[Ni] น้ำออกจากคอลัมน์ท่อนกลาง เฉลี่ย (มก./ล.)	0.84	2.28	3.86	5.19
พีเอชน้ำออกจากคอลัมน์ท่อนกลางเฉลี่ย	5.30	5.29	5.30	5.27
[Ni] น้ำออกจากคอลัมน์ท่อนล่าง เฉลี่ย (มก./ล.)	0.30	0.77	1.90	2.94
พีเอชน้ำออกจากคอลัมน์ท่อนล่าง เฉลี่ย	5.38	5.33	5.30	5.31



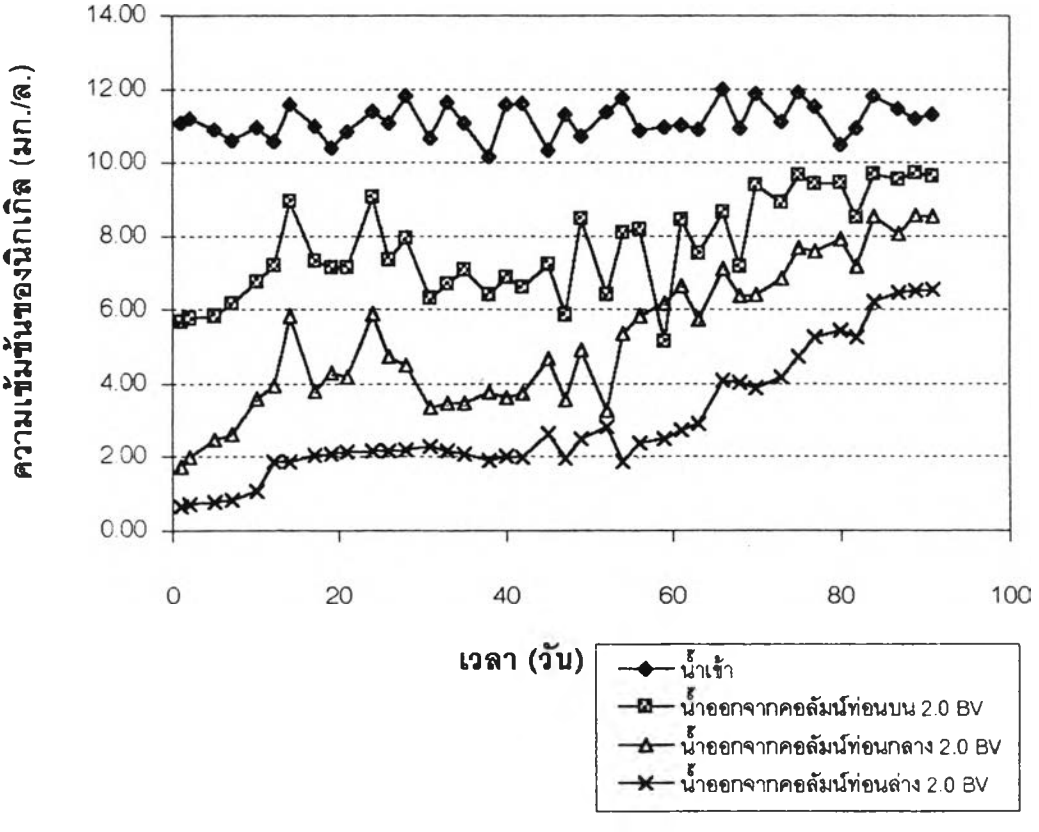
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราไหล 0.5 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



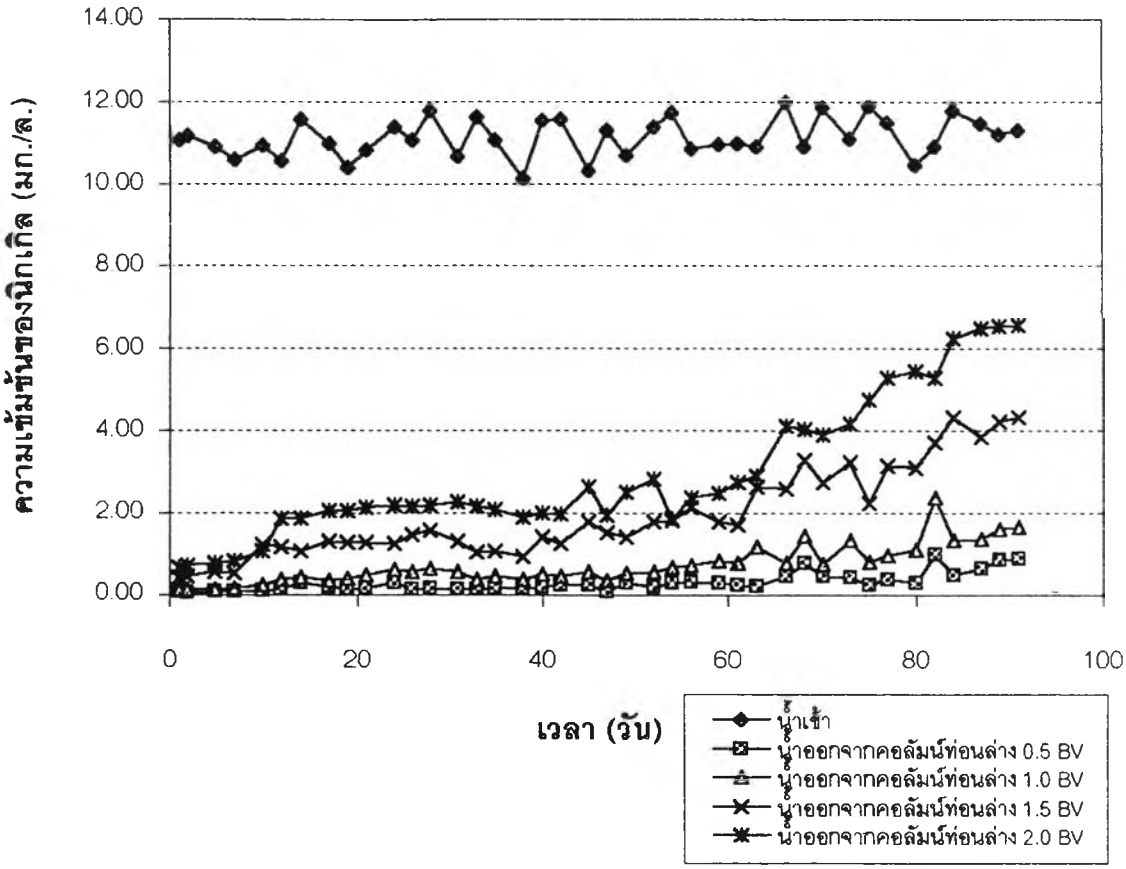
รูปที่ 4.7 ผลของอัตราไหล 1.0 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราไหล 1.5 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.9 ผลของอัตราไหล 2.0 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลของอัตราไหลของ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 BV

การทดลองได้ดำเนินเป็นเวลา ทั้งสิ้น 3 เดือน และ ผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล ได้แสดงไว้ใน รูปกราฟที่ 4.6-4.10 และได้สรุปอัตราเฉลี่ยของการกำจัดนิกเกิลไว้ในตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้คอลัมน์สั้นๆ ยาว 30 ซม. มาเรียงต่อกันแบบอนุกรม 3 คอลัมน์ สามารถให้คุณภาพน้ำออกที่ดีกว่าการใช้คอลัมน์ยาวๆ เพียงคอลัมน์เดียว โดยมีอัตราการป้อนนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเฉลี่ย 11.14 มก./ล./วัน และสามารถกำจัดได้ถึง 10.84, 10.37, 9.24 และ 8.20 มก./ล./วัน หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นได้เท่ากับ 97.3%, 93.1%, 82.9% และ 73.6% ที่อัตราไหล 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 BV/Hr ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 อัตราการกำจัดนิกเกิล (มก./ล./วัน) จากการทดลอง

ตัวแปร	อัตราไหล 0.5 BV/Hr	อัตราไหล 1.0 BV/Hr	อัตราไหล 1.5 BV/Hr	อัตราไหล 2.0 BV/Hr
คอลัมน์ท่อนบน	6.92	5.54	4.46	3.47
คอลัมน์ท่อนกลาง	3.38	3.32	2.82	2.48
คอลัมน์ท่อนล่าง	0.54	1.51	1.96	2.25
รวม	10.84	10.37	9.24	8.2

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการกำจัดนิกเกิล (มก./ก./วัน) จากการทดลอง

ตัวแปร	อัตราไหล 0.5 BV/Hr	อัตราไหล 1.0 BV/Hr	อัตราไหล 1.5 BV/Hr	อัตราไหล 2.0 BV/Hr
คอลัมน์ส่วนบน	0.082	0.066	0.053	0.041
คอลัมน์ส่วนกลาง	0.040	0.040	0.034	0.030
คอลัมน์ส่วนล่าง	0.006	0.018	0.023	0.027
รวม	0.043	0.041	0.037	0.033

เมื่อพิจารณาที่คอลัมน์ท่อนบน พบว่าอัตราการกำจัดนิกเกิลของคอลัมน์ 0.5 BV/Hr จะสามารถกำจัดได้ดีที่สุด รองลงมาก็จะเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 BV/Hr ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากที่คอลัมน์ 0.5 BV/Hr มีระยะเวลาสัมผัสกับน้ำเสียนานที่สุดนั่นเอง

เมื่อพิจารณาที่คอลัมน์ท่อนกลาง พบว่าอัตราการกำจัดนิกเกิลของคอลัมน์ 0.5 BV/Hr ก็สามารถกำจัดได้ดีที่สุด ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับคอลัมน์ท่อนบน รองลงมาก็จะเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 BV/Hr ตามลำดับ แต่อัตราการกำจัดจะน้อยกว่าในคอลัมน์ท่อนบน ทั้งนี้เนื่องมาความเข้มข้นของนิกเกิลที่ป้อนลงมาที่คอลัมน์ท่อนกลางมีค่าน้อยกว่าที่คอลัมน์ท่อนบน เพราะนิกเกิลบางส่วนถูกกำจัดและสะสมอยู่ในคอลัมน์ท่อนบน และนอกจากนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการตกตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ที่มาจากคอลัมน์ท่อนบน ปกคลุมบนผิวเหล็กออกไซด์ของคอลัมน์ท่อนกลาง

ในส่วนคอลัมน์ท่อนล่าง พบว่าอัตราการกำจัดนิกเกิลของคอลัมน์กลับเป็นตรงกันข้ามกับท่อนบน และท่อนกลาง นั่นคือคอลัมน์ 0.5 BV/Hr มีอัตราการกำจัดที่น้อยที่สุดโดยมีค่าเพียง 0.54 มก./ล./วัน คาดว่าสาเหตุเนื่องมาจาก ความเข้นข้นของนิกเกิลที่ป้อนมาจากคอลัมน์ท่อนกลาง มีค่าค่อนข้างต่ำ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า นิกเกิลในคอลัมน์ท่อนล่างของคอลัมน์ 0.5 BV/Hr ได้ถูกคอลัมน์ท่อนบนและท่อนกลาง กำจัดไปเกือบหมด ทำให้มีค่าความเข้มข้นที่ป้อนลงมาที่คอลัมน์ท่อนล่างต่ำเกินไปจนทำให้มีอัตราการกำจัดที่น้อยที่สุด และนอกจากนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากการตกตะกอนของ $Fe(OH)_3$ ที่มาจากคอลัมน์ท่อนกลาง ปกคลุมบนผิวเหล็กออกไซด์ของคอลัมน์ท่อนล่างด้วยเช่นเดียวกัน

การใช้คอลัมน์ท่อนสั้นๆ 3 ท่อน มาเรียงต่อกันแบบอนุกรม สามารถทำให้ลดปัญหาเรื่องน้ำท่วมระบบได้ดีกว่าการใช้คอลัมน์ยาวๆ เพียงคอลัมน์เดียว แต่อย่างไรก็ตามเมื่อถึงตอนท้ายของการทดลอง ประมาณกลางเดือนที่สามหรือเดือนสุดท้ายของการทดลอง น้ำก็เริ่มท่วมระบบเนื่องมาจากเกิดตะกรันจับเป็นก้อนในตัวกลางเศษเหล็ก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปัญหาการอุดตันเป็นจุดอ่อนที่สำคัญในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก

นอกจากนี้การนำคอลัมน์ท่อนสั้นๆ มาเรียงต่อกันแบบอนุกรมนี้ จะทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในระบบดีขึ้น โดยสังเกตได้จากสีของเหล็กพบว่ามีเหล็กสีน้ำตาลในปริมาณที่มากกว่าแบบคอลัมน์ท่อนยาว และความสามารถในการกำจัดนิกเกิลคอลัมน์ท่อนสั้นๆ ที่มาเรียงต่อกันแบบอนุกรมนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ในส่วนสมดุลของมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็ก ซึ่งดำเนินการทดลองทั้งสิ้นเป็นเวลา 91 วัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 สมดุลมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็กจากการทดลอง

ตัวแปร	อัตราไหล 0.5 BV/Hr	อัตราไหล 1.0 BV/Hr	อัตราไหล 1.5 BV/Hr	อัตราไหล 2.0 BV/Hr
นิกเกิลในน้ำเข้า (มก.)	4,957	9,904	14,861	19,808
นิกเกิลที่สะสมคอลัมน์เศษเหล็กท่อนบน (มก.)	3,079	4,925	5,950	6,170
นิกเกิลที่สะสมคอลัมน์เศษเหล็กท่อนกลาง (มก.)	1,504	2,952	3,762	4,410
นิกเกิลที่สะสมคอลัมน์เศษเหล็กท่อนล่าง (มก.)	240	1,342	2,615	4,001
นิกเกิลในน้ำออก (มก.)	134	685	2,534	5,227

4.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบแบตช์

4.3.1 Adsorption Isotherm ของปฏิกริยาระหว่างนิกเกิลและเศษเหล็ก

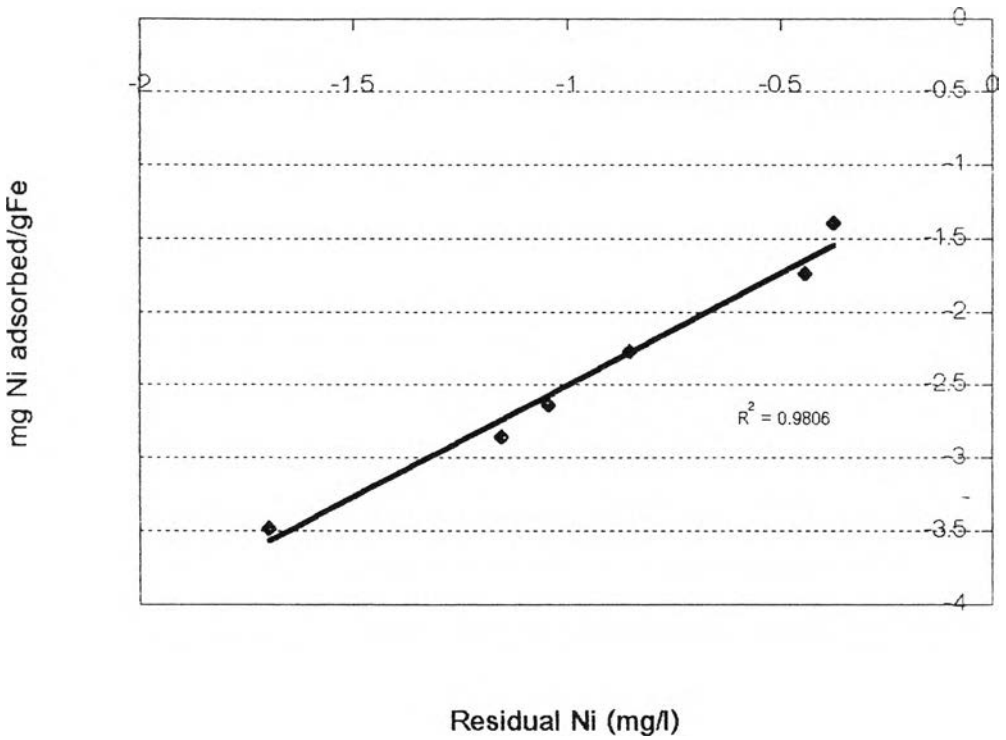
การศึกษา Adsorption Isotherm ของปฏิกริยาระหว่างนิกเกิลและเศษเหล็ก เป็นการศึกษาหาสมการสมดุล เพื่อที่จะใช้กับสภาวะที่เป็นผลหลังจากอิออนของนิกเกิลมีการดูดติดผิวกับเศษเหล็กในเวลาเพียงพอที่จะให้เกิดสมดุล โดยอัตราเร็วในการดูดติดผิวเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณากระบวนการดูดติดผิวนี้

ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.8 และผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.8 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1

ตัวแปร	ค่าที่ใช้
ความเข้มข้นของนิกเกิล (mM)	0.17
พีเอช	3 - 10
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
เวลาที่ใช้ (นาที)	0 - 1440
สารละลายอิเล็กโตรไลท์ $NaNO_3$ (mM)	0.01

จากรูป 4.11 พบว่าความสัมพันธ์ในรูปล็อกการิทึม ใกล้เคียงกับ สมการของ Freundlich Isotherm โดยความสัมพันธ์ที่ได้เป็นรูปกราฟเส้นตรง และมีค่า $R^2 = 0.9806$ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็นเล็กน้อย โดยค่า R^2 ที่เหมาะสมไม่ควรจะต่ำกว่า 0.995 ซึ่งสาเหตุอาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง



รูปที่ 4.11 ล็อกการิทึม ของ Freundlich Isotherm สำหรับการดูดติดผิวนิกเกิลโดยเศษเหล็กที่เวลา 24 ชั่วโมง

Freundlich ศึกษาปรากฏการณ์การดูดติดผิวและได้แสดงว่าการดูดติดผิวจากสารละลายสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$q = KC^{1/n} \quad (1)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของโมเลกุลสารปนเปื้อนภายหลังการดูดติดผิว

q = มวลของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารที่ใช้ดูดติดผิว

K และ n = ค่าคงที่ของสารแต่ละชนิดและอุณหภูมิ

หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$\log q = \log K + (1/n) \log C \quad (2)$$

จากรูป 4.11 สามารถหาค่า K และ n ได้เท่ากับ 0.1122 และ 0.63 ตามลำดับ ดังนั้นสมการ Freundlich Isotherm จะได้เป็น $q = 0.1122C^{1/0.63}$

ถ้าพิจารณาในรูปแบบของ Langmuir Isotherm จะได้ความสัมพันธ์ที่ไม่อยู่ในรูปกราฟเส้นตรง ซึ่งไม่เป็นไปตามสมการของ Langmuir ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งาน

4.3.2 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กก่อนและหลังการทำปฏิกริยากับนิกเกิล ด้วยเครื่อง x-ray diffraction

การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กก่อนและหลังการทำปฏิกริยากับนิกเกิล ด้วยเครื่อง x-ray diffraction เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเศษเหล็กโดยเฉพาะที่พื้นผิวภายหลังการทำปฏิกริยากับนิกเกิล เพื่อที่จะตรวจสอบดูว่าเกิดการดูดติดผิวของนิกเกิลกับเศษเหล็กจริงหรือไม่

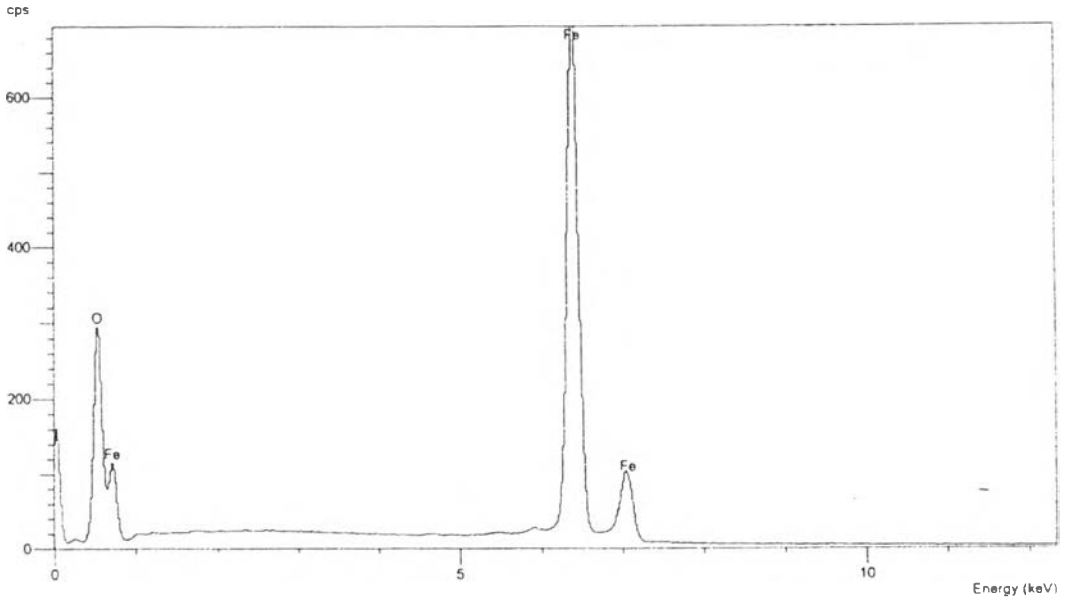
ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.9 และผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.12-13

ตารางที่ 4.9 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2

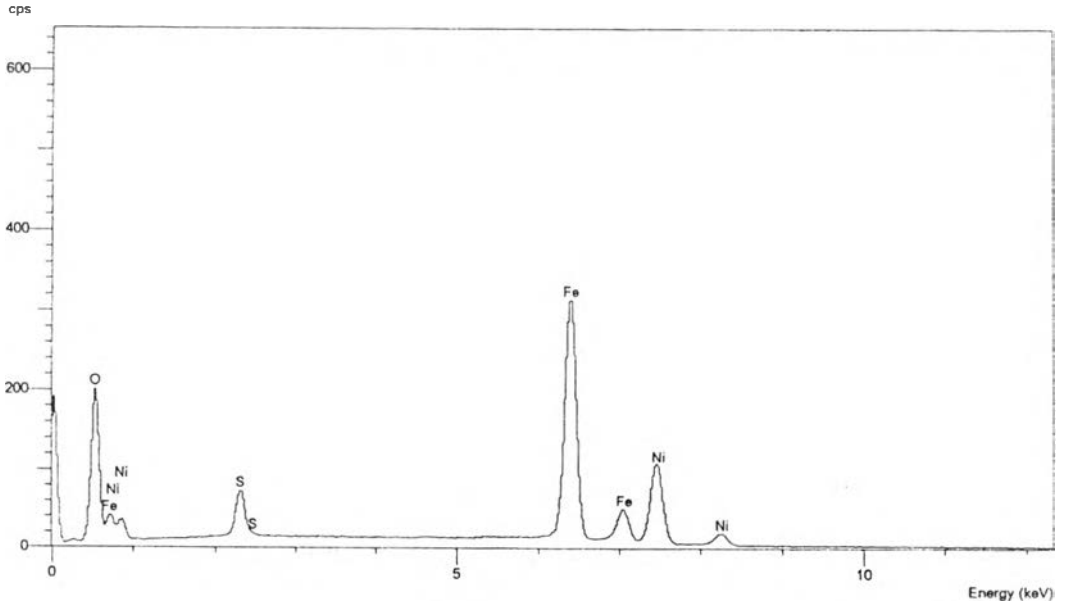
ตัวแปร	ค่าที่ใช้
ความเข้มข้นของนิกเกิล (มก./ล.)	50
พีเอช	5.8
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	24

จากรูปที่ 4.12 เป็นลักษณะของเศษเหล็กก่อนการทำปฏิกริยากับนิกเกิล จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง x-ray diffraction ปรากฏว่าตรวจพบธาตุเพียง 2 ธาตุ คือ เหล็ก กับ ออกซิเจน หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเศษเหล็กที่ใช้ในการทดลองก็คือเหล็กออกไซด์นั่นเอง ซึ่งจากรูปจะตรวจพบเหล็กที่ระดับพลังงานของ Shell K_α, K_β และ L ส่วนออกซิเจนตรวจพบที่ระดับพลังงานของ Shell L เท่านั้น

ส่วนในรูปที่ 4.13 เป็นลักษณะของเศษเหล็กหลังการทำปฏิกริยากับนิกเกิล ปรากฏว่าตรวจพบธาตุจำนวน 4 ธาตุ คือ เหล็ก นิกเกิล ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการดูดติดผิวของนิกเกิลกับเศษเหล็กจริง และเนื่องจากว่าการทดลองนี้ใช้นิกเกิลในรูปของนิกเกิลซัลเฟต ทำให้ตรวจพบซัลเฟอร์ที่พื้นผิว แสดงให้เห็นว่าเกิดการดูดติดผิวของซัลเฟอร์กับเศษเหล็กด้วยเช่นกัน จากรูปตรวจพบเหล็กและนิกเกิลที่ระดับพลังงานของ Shell K_α, K_β และ L ส่วนออกซิเจนและซัลเฟอร์ตรวจพบที่ระดับพลังงานของ Shell L เท่านั้น



รูปที่ 4.12 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กก่อนการทำปฏิกริยากับนิกเกิล ด้วยเครื่อง x-ray diffraction



รูปที่ 4.13 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กหลังการทำปฏิกริยากับนิกเกิล ด้วยเครื่อง x-ray diffraction

4.3.3 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

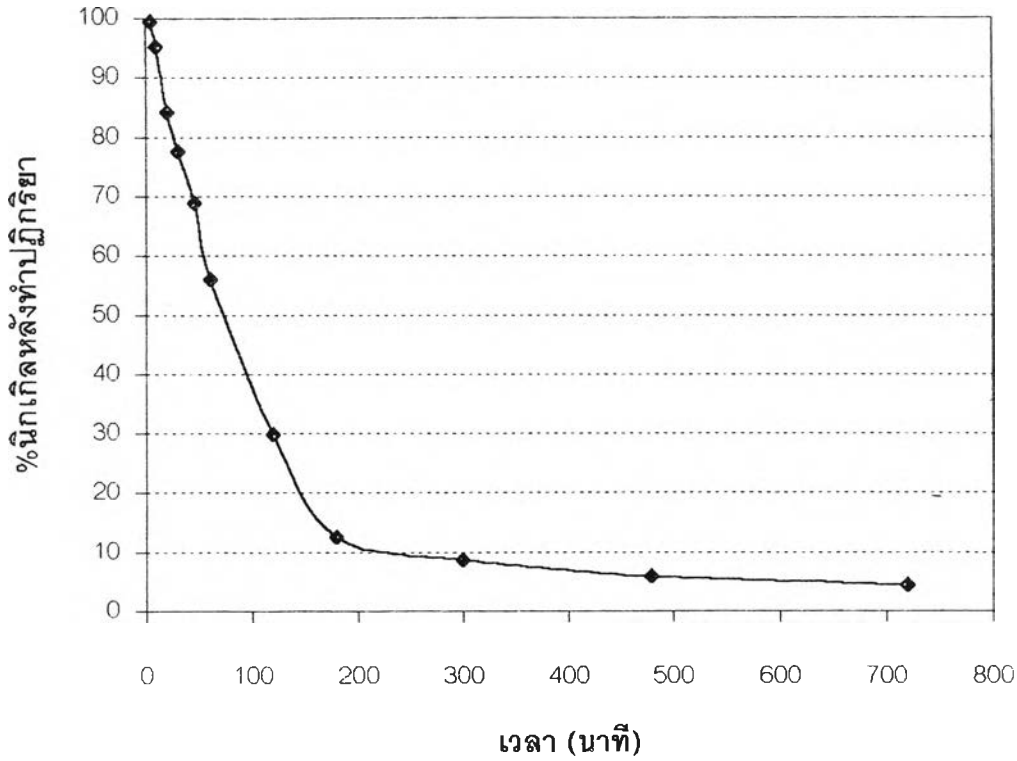
จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพีเอชเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างมากในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้เหล็กออกไซด์ จึงได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของพีเอชในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก ในการทดลองแบบแบตช์

แต่ก่อนที่จะทำการทดลอง จำเป็นต้องหาเวลาสมดุลของการทำปฏิกริยาระหว่างนิเกิลและเศษเหล็กเสียก่อน โดยค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.10 และผลของเวลาสมดุล แสดงไว้ในรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.10 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.3

ตัวแปร	ค่าที่ใช้
ความเข้มข้นของนิกเกิล (mM)	0.17
พีเอช	3 - 10
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
เวลาที่ใช้ในการทดลอง (นาที)	0-1440
สารละลายอิเล็กโตรไลท์ $NaNO_3$ (mM)	0.01

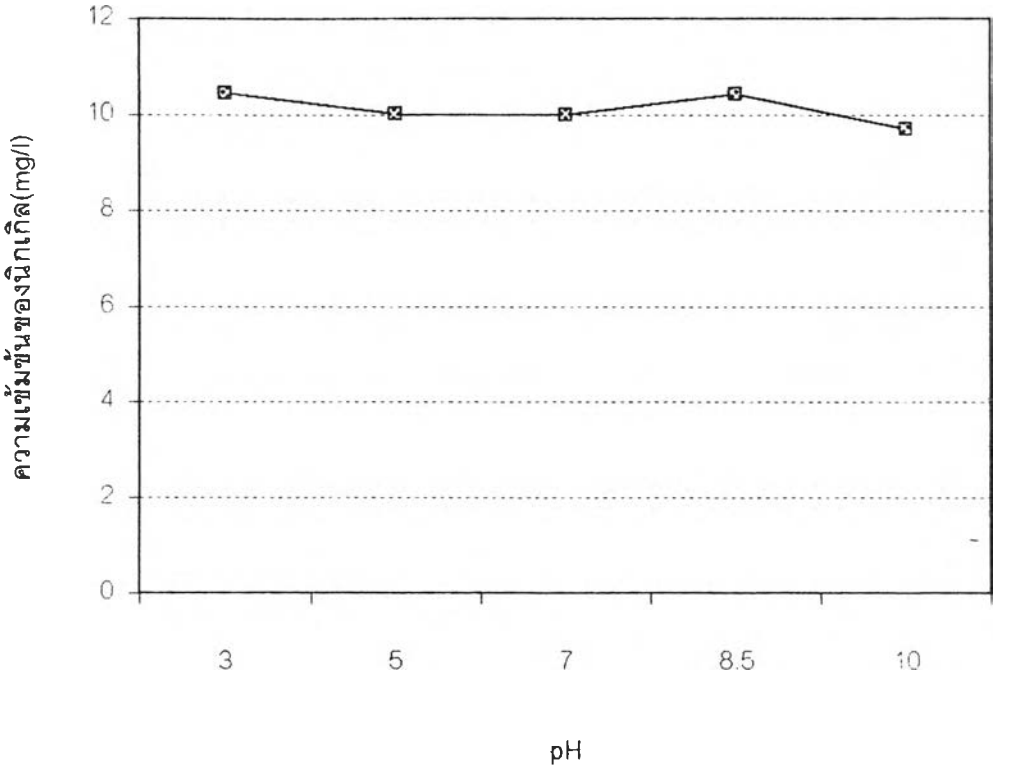
จากรูปที่ 4.14 เวลาสมดุลของการทำปฏิกริยาของนิกเกิลและเศษเหล็ก จะได้ประมาณ 720 นาที หรือ 12 ชั่วโมงซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดลองแต่ละครั้งจะต้องทำการทดลองด้วยเวลาที่ไม่น้อยกว่าเวลาสมดุลนี้ และเพื่อให้แน่ใจว่าปฏิกริยาที่เกิดถึงจุดสมดุลอย่างแน่นอน จึงได้เลือกใช้เวลาที่ 24 ชั่วโมงในการทดลอง นอกจากนี้ในรูปยังแสดงให้เห็นอีกว่า การกำจัดนิกเกิลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำปฏิกริยา นั่นคือสามารถกำจัดได้เกือบ 90% ในระยะเวลาเพียง 3 ชั่วโมงแรกของการทดลอง



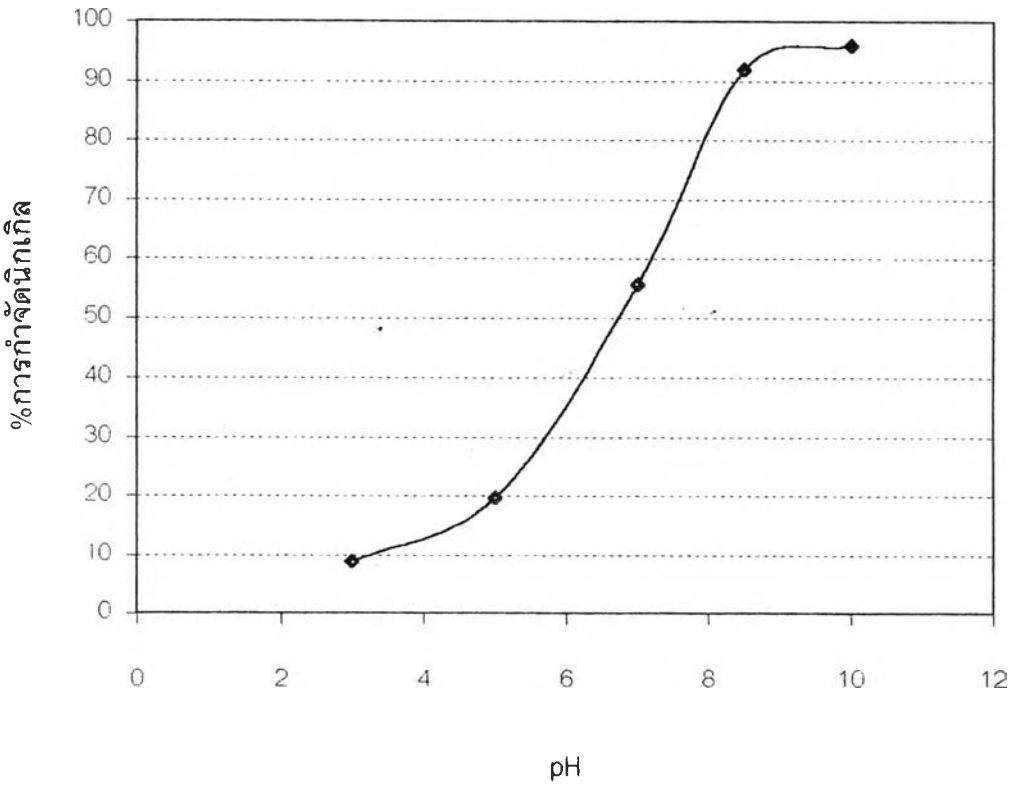
รูปที่ 4.14 เวลาสมดุลของการทำปฏิกริยาระหว่างนิกเกิลและเศษเหล็ก

นอกจากนี้ยังมีข้อสงสัยว่าตัวแปรอื่น เช่น การเปลี่ยนแปลงพีเอชจะมีผลอย่างไรต่อการดูดติดผิวระหว่างนิกเกิลและผนังขวดพลาสติกที่ใช้ในการทดลองหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบผลของปฏิกริยาของนิกเกิลและผนังขวดที่พีเอชต่างๆ โดยไม่มีการเติมเศษเหล็ก ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.15

ท้ายที่สุดได้ทำการทดสอบผลของพีเอชที่มีต่อปฏิกริยาในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ผลความเข้มข้นของนิกเกิลที่ พีเอชต่างๆ โดยไม่มีการเติมเศษเหล็ก



รูปที่ 4.16 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอช โดยไม่มีการเติมเศษเหล็ก แทบจะไม่มีผลอย่างไรต่อค่าความเข้มข้นของนิกเกิล แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงพีเอช ไม่มีผลต่อการดูดติดผิวโดยผนังขวดพลาสติก ซึ่งสาเหตุอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องมาจากการทดลองนี้กระทำที่ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลค่อนข้างต่ำ คือ 10 มก./ล จึงทำให้ไม่เกิดการตกตะกอนของนิกเกิลในการทดลอง

และจากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าพีเอชเป็นตัวแปรมีบทบาทอย่างสำคัญในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก จากการทดลองความสามารถของการดูดติดผิวได้แปรเปลี่ยนจาก การดูดติดผิวที่น้อยกว่า10% ที่พีเอชต่ำกว่า 4 ไปเป็นมากกว่า 90% ที่พีเอชมากกว่า 8 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อพิจารณาสมการการดูดติดผิวโลหะประจุบวกจากตารางที่ 2.3

$$S\text{-}OH + M^{Z+} = S\text{-}OM^{(Z-1)+} + H^{+}$$

เมื่อ S คือ พื้นผิว(Surface) และ M^{Z+} คือ โลหะประจุบวกสอง

จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิวที่พื้นผิวเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดการดูดติดผิว โดยโลหะประจุบวกสองจะเกิดการยึดติดกับอะตอมของออกซิเจน และควบคู่กับการปล่อยโปรตอน (H^{+}) ถ้าในกรณีที่พีเอชของสารละลายต่ำ จะมีผลทำให้สมดุลเลื่อนไปทางซ้ายของสมการทำให้เกิดการดูดติดผิวน้อย และถ้าในกรณีที่พีเอชของสารละลายสูงก็จะเกิดผลในทางตรงกันข้ามนั่นก็คือจะทำให้สมดุลเลื่อนไปทางขวาของสมการ ทำให้เกิดการดูดติดผิวมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก ควรกระทำที่ พีเอชที่เป็นกลางหรือที่ พีเอชสูงเท่านั้น

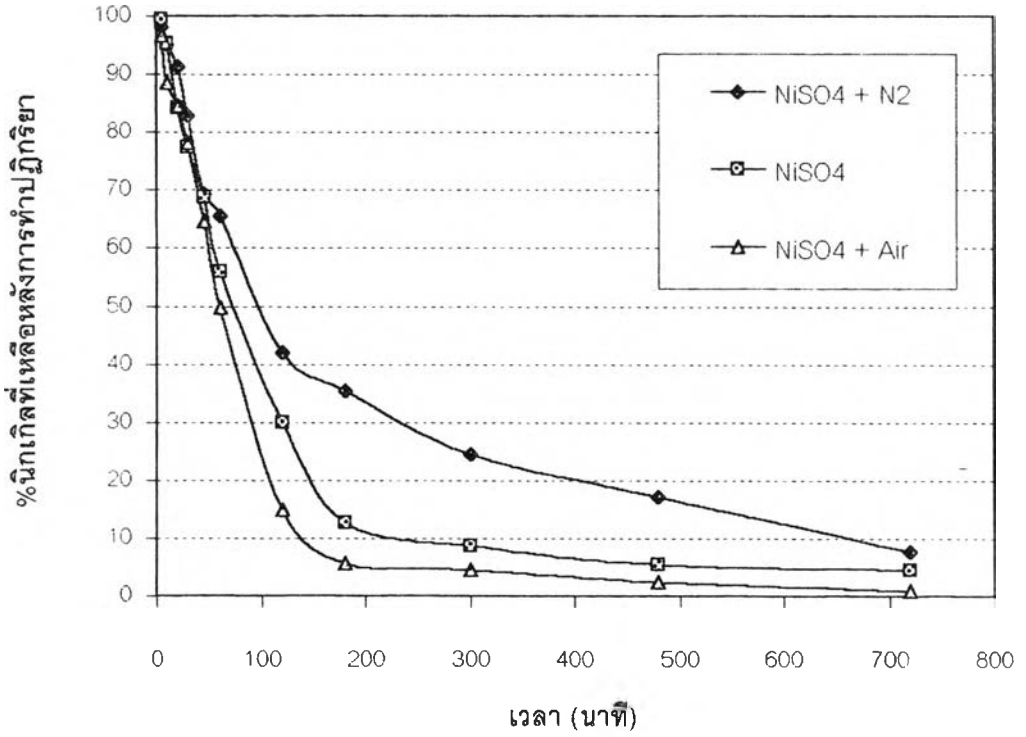
4.3.4 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

จากปัญหาที่พบในการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 ในการทดลองเรื่องผลของความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล พบว่าคอลัมน์ที่มีความสูงมาก จะมีปัญหาการท่วมของน้ำในระบบได้ง่าย และจะมีผลทำให้ความสามารถในการกำจัดนิกเกิลลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงคาดว่าสาเหตุเนื่องมาจากน้ำท่วมระบบ จะทำให้การถ่ายเทออกซิเจนในระบบลดลง ดังนั้นออกซิเจนน่าจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อระบบการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก จึงได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของออกซิเจนละลาย ในการทดลองแบบแบตช์

ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.11 และผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแสดงไว้ในรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.11 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.4

ตัวแปร	ค่าที่ใช้
ค่า DO ของ $NiSO_4$ (มก./ล.)	2.71
ค่า DO ของ $NiSO_4$ + Air (มก./ล.)	7.80
ค่า DO ของ $NiSO_4$ + N_2 (มก./ล.)	0.40
ความเข้มข้นของนิกเกิล (mM)	0.17
พีเอช	5.6
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
เวลาที่ใช้ (นาที)	0-720
สารละลายอิเล็กโตรไลท์ $NaNO_3$ (mM)	0.01

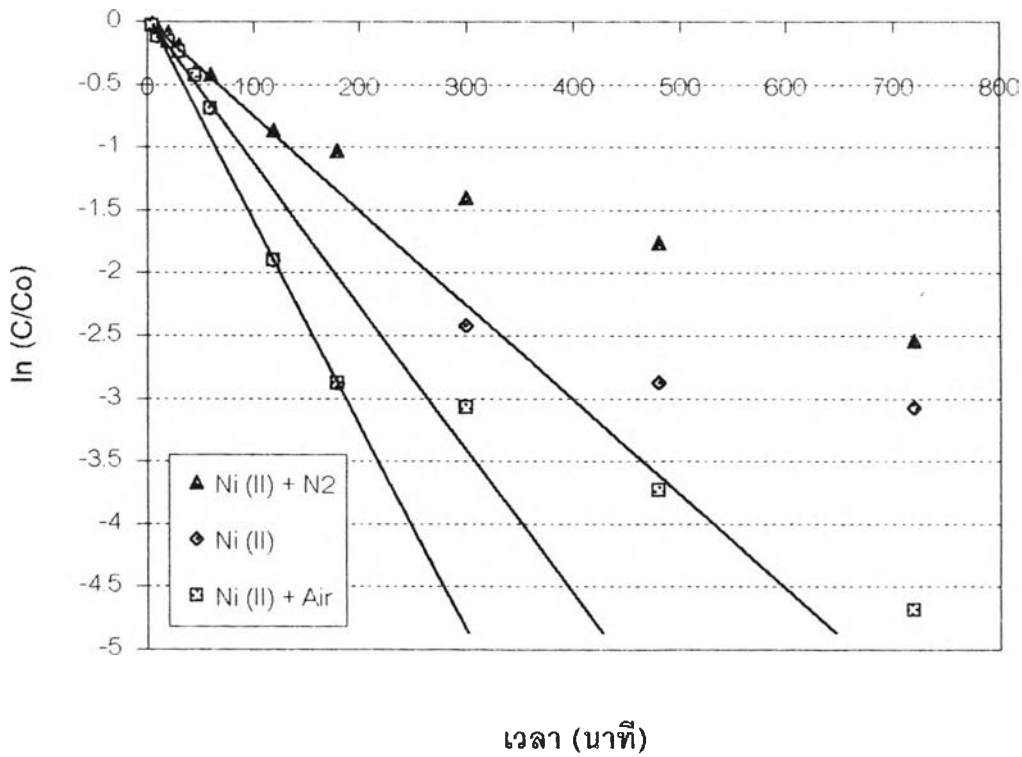


รูปที่ 4.17 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าออกซิเจนละลายมีผลต่ออัตราการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก โดยอัตราการกำจัดจะแปรผันตรงต่อปริมาณออกซิเจนละลาย ในสภาวะที่มีการเติมอากาศ ($NiSO_4+O_2$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 7.8 มก./ล. จะมีอัตราการกำจัดที่ดีที่สุด รองลงมาจะเป็นสภาวะที่ไม่มีการเติมอากาศ ($NiSO_4$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 2.7 มก./ล. และ สภาวะที่มีการเติมไนโตรเจน ($NiSO_4+N_2$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 0.4 มก./ล ตามลำดับ แต่เมื่อถึงเวลาที่ 720 นาที (12ชั่วโมง) ของซึ่งเป็นเวลาที่ใกล้จุดสมดุล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของทั้งสามสภาวะไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก

ดังนั้นในการทดลองการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก ถ้าในการทำปฏิกริยาที่มีระยะเวลาสัมผัสน้อยกว่า ระยะเวลาสมดุล จะทำให้ค่าของออกซิเจนละลายเป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

เมื่อพิจารณาในรูปแบบของปฏิกริยาอันดับหนึ่งจะได้ดังรูป 4.18 พบว่าในสภาวะที่มีการเติมอากาศ ($NiSO_4+O_2$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 7.8 มก./ล. จะมีค่าความชันของกราฟเส้นตรงสูงที่สุดคือ $-1.60x10^{-2}$ รองลงมาจะเป็นสภาวะที่ไม่มีการเติมอากาศ ($NiSO_4$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 2.7 มก./ล. จะมีค่าความชันเท่ากับ $-1.12 x10^{-2}$ และ สภาวะที่มีการเติมไนโตรเจน ($NiSO_4+N_2$) ที่มีค่าออกซิเจนละลายเท่ากับ 0.4 มก./ล จะมีค่าความชันเท่ากับ $-7.47 x10^{-3}$ จากค่าความชันที่ได้แสดงให้เห็นถึงอัตราเร็วในการทำปฏิกริยา ถ้าค่าความชันมากอัตราเร็วก็จะมากตามไปด้วย และสามารถเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าค่าความชันที่น้อย



รูปที่ 4.18 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในรูปแบบปฏิกริยาอันดับหนึ่ง

4.3.5 ผลของอิออนประจุลบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

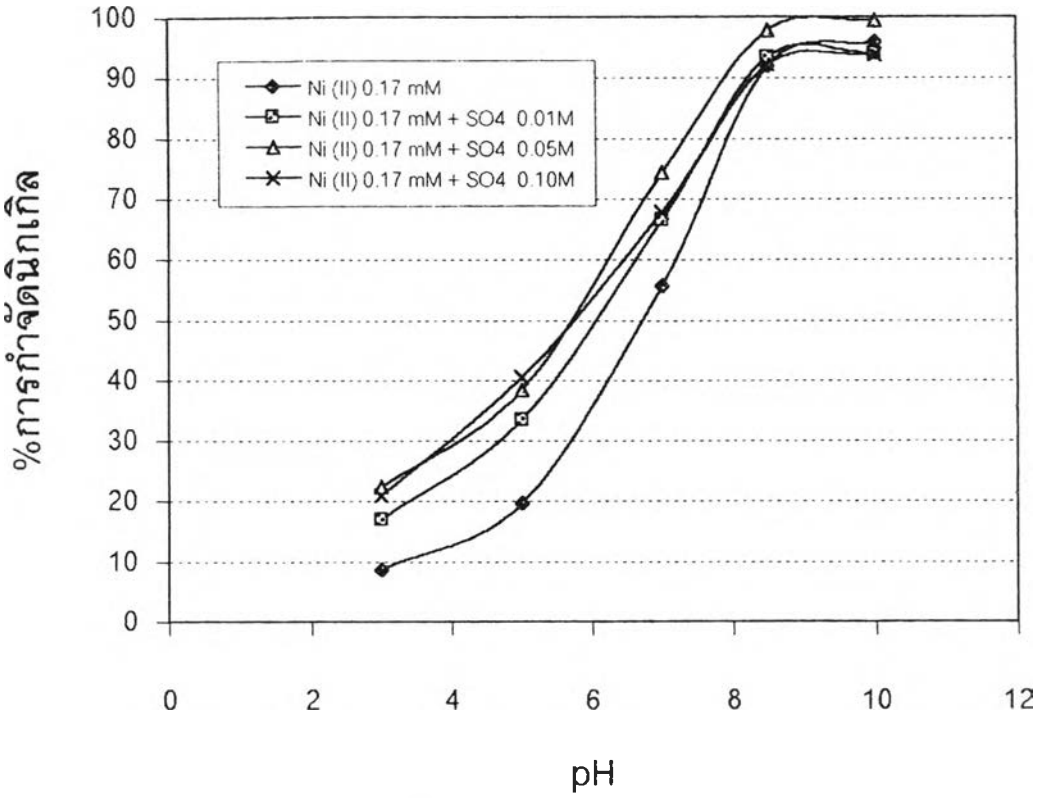
ในสารละลายที่ใช้ในการทดลองการกำจัดนิกเกิลโดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก นอกจากจะมีอิออนของนิกเกิลแล้วยังมีอิออนลบอื่นๆด้วย เช่นในการทดลองมีการใช้นิกเกิลซัลเฟต ก็จะทำให้มีอิออนของซัลเฟตในระบบด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบว่าอิออนของซัลเฟต และอิออนลบอื่นๆจะมีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบผลของอิออนลบในการทดลองแบบแบตช์ โดยใช้ซัลเฟตอิออน และคลอไรด์อิออนเป็นตัวแปรในการทดลอบ

ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ ในการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.12 และผลของซัลเฟตอิออน และคลอไรด์อิออนที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

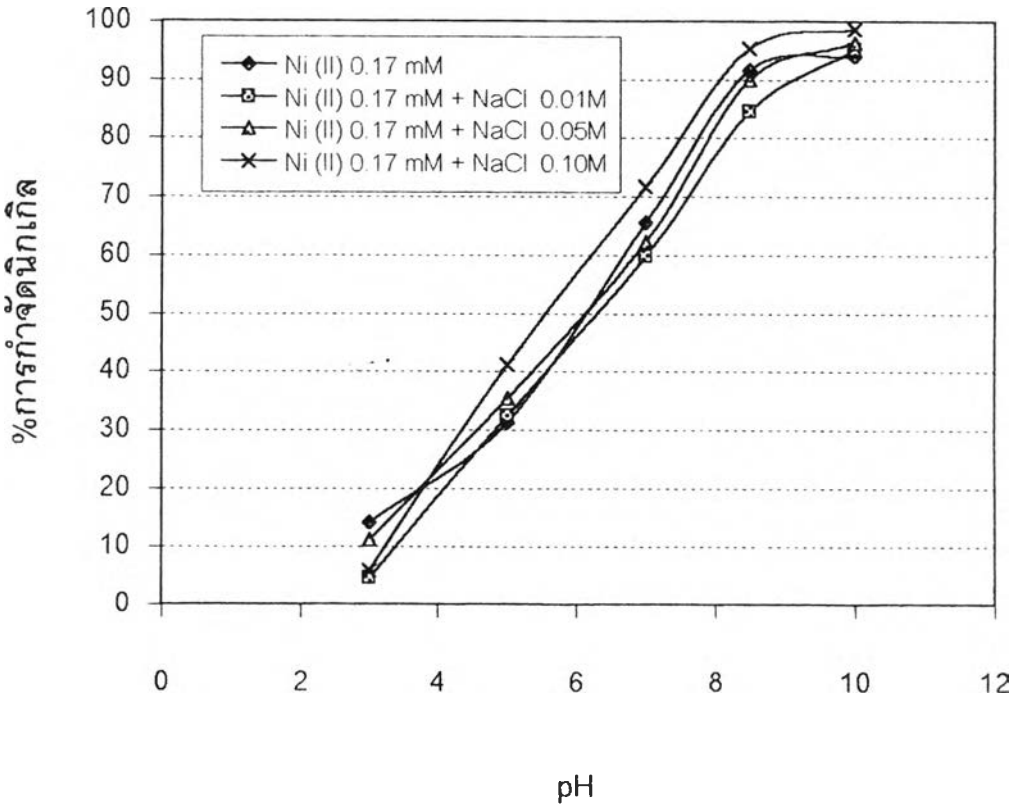
ตารางที่ 4.12 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.5

ตัวแปร	ค่าที่ใช้
[SO_4^{2-}] (M)	0.01 - 0.1
[Cl^-] (M)	0.01 - 0.1
[Ni^{2+}] (mM)	0.17
pH	3 - 10
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	24

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าซัลเฟตอิออน และคลอไรด์อิออน มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดย Benjamin และBloom (1981 อ้างถึงใน Khaodhiar, 1997) ได้ศึกษาผลการดูดติดผิวอย่างแข็งแรงของอิออนลบบน amorphous iron oxyhydroxide พบว่าอิออนลบสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิวขึ้นเล็กน้อย หรือไม่มีผลต่อการดูดติดผิวของโลหะ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การแข่งขันการดูดติดผิวระหว่างอิออนลบและอิออนบวกบนพื้นผิวมีน้อยมาก และได้ให้ทรรศนะว่าการดูดติดผิวของอิออนลบ จะแยกออกจากพื้นที่การดูดติดผิวของอิออนบวกทั้งทางฟิสิกซ์ และทางไฟฟ้าสถิตย์



รูปที่ 4.19 ผลของซัลเฟตอิออน ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.20 ผลของคลอไรด์อิออนที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

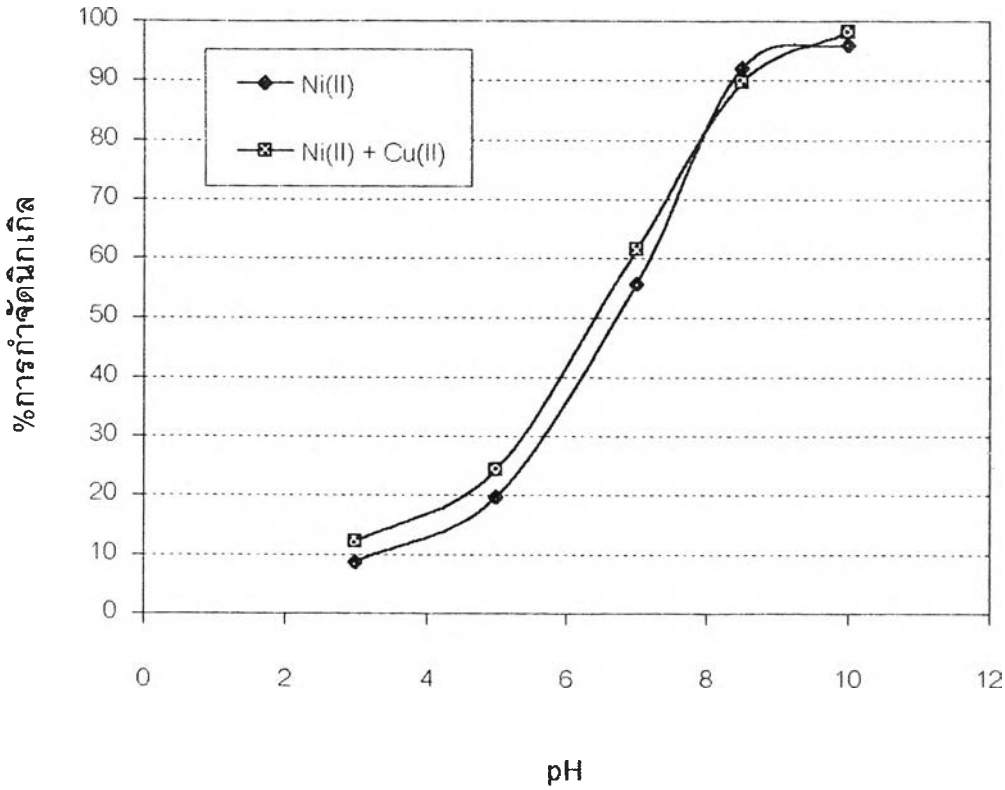
4.3.6 ผลของอิออนประจุบวกที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล

โดยปรกตินำ้เสียที่พบจากโรงงานอุตสาหกรรมการชุบโลหะ มักไม่ได้มีอิออนของโลหะหนักเพียงชนิดเดียว แต่จะมีหลายๆชนิดปะปนกันอยู่ ดังที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ ข.1 ดังนั้นการทดลองนี้จึงได้ทำการทดสอบผลของอิออนโลหะหนักชนิดอื่นๆ ว่าจะมีผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลใช้เศษเหล็ก ในการทดลองแบบแบตช์

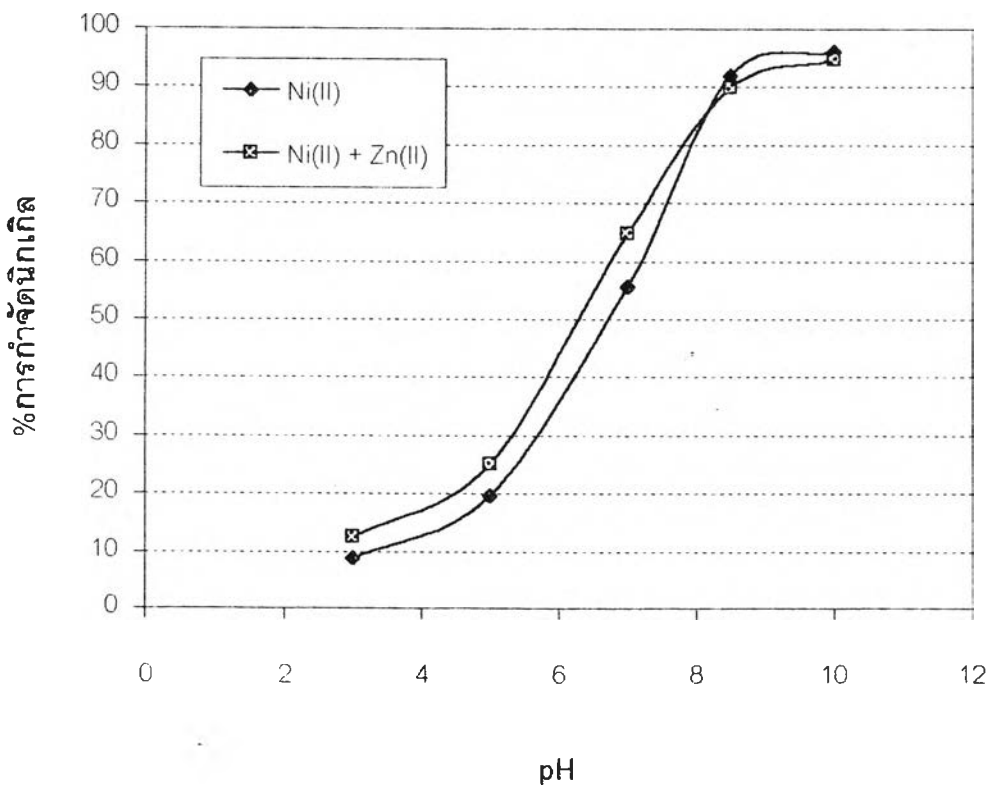
ค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลอง ได้แสดงไว้ที่ ตาราง 4.13 และผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแสดงไว้ในรูปที่ 4.21-4.25

ตารางที่ 4.13 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.6

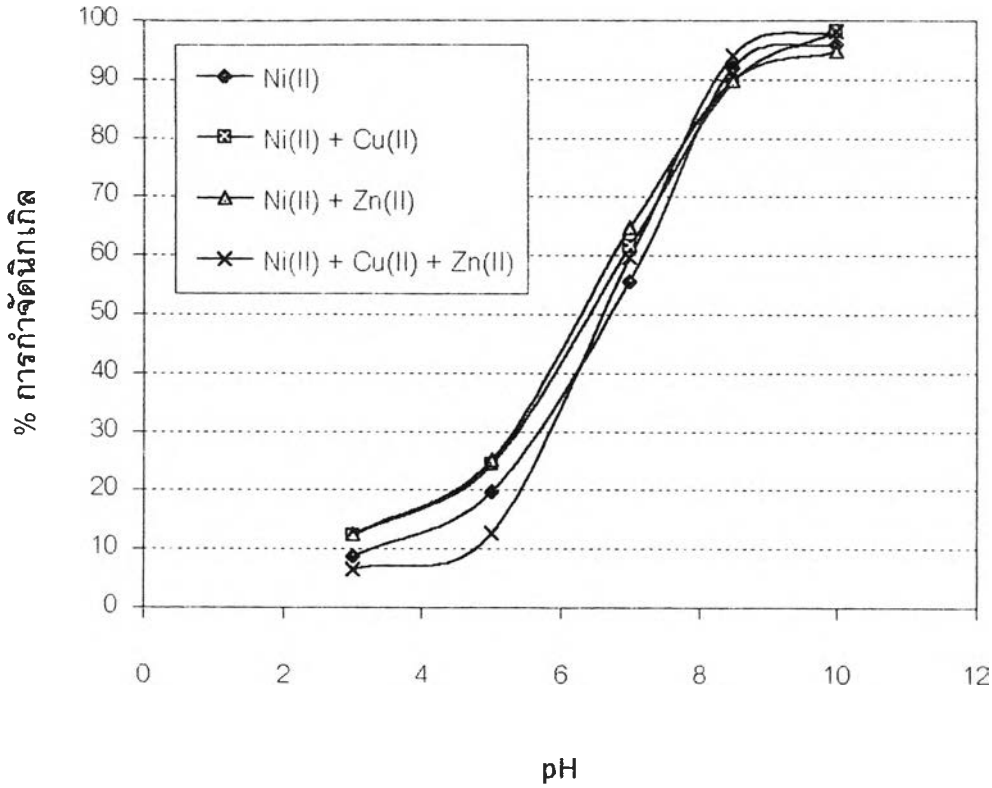
ตัวแปร	ค่าที่ใช้
[Ni^{2+}] (mM)	0.1
[Cu^{2+}] (mM)	0.1
[Zn^{2+}] (mM)	0.1
pH	3 - 10
เศษเหล็กต่อน้ำเสีย (กรัม/ลิตร)	10
ระยะเวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	24
สารละลายอิเล็กโตรไลท์ $NaNO_3$ (mM)	0.01



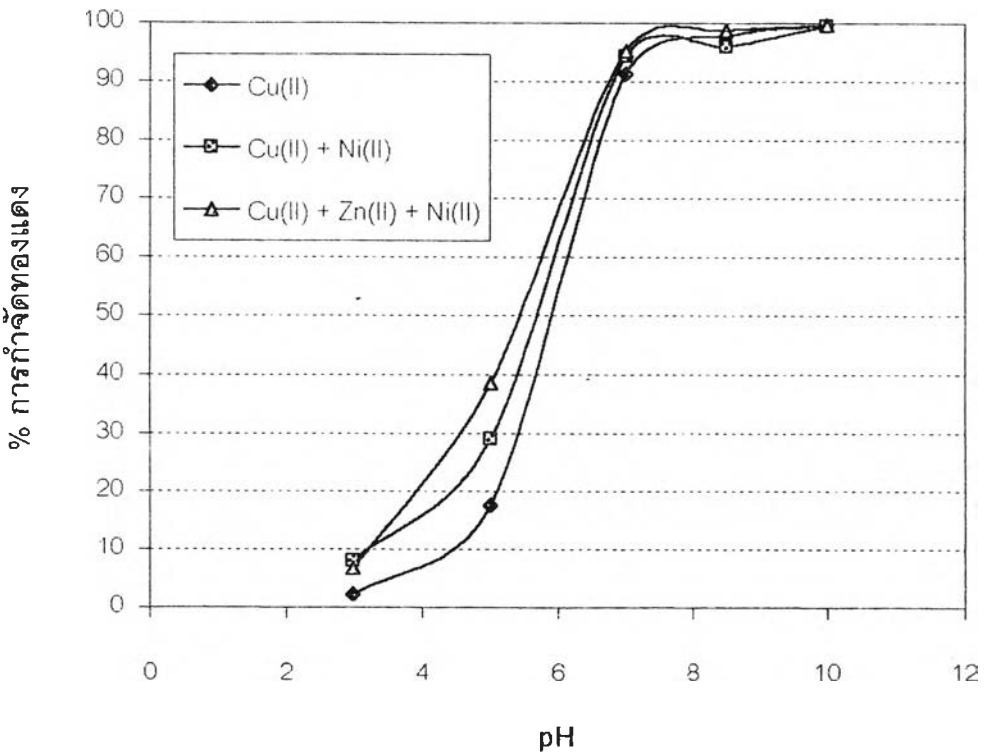
รูปที่ 4.21 ผลของอิออนทองแดงที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



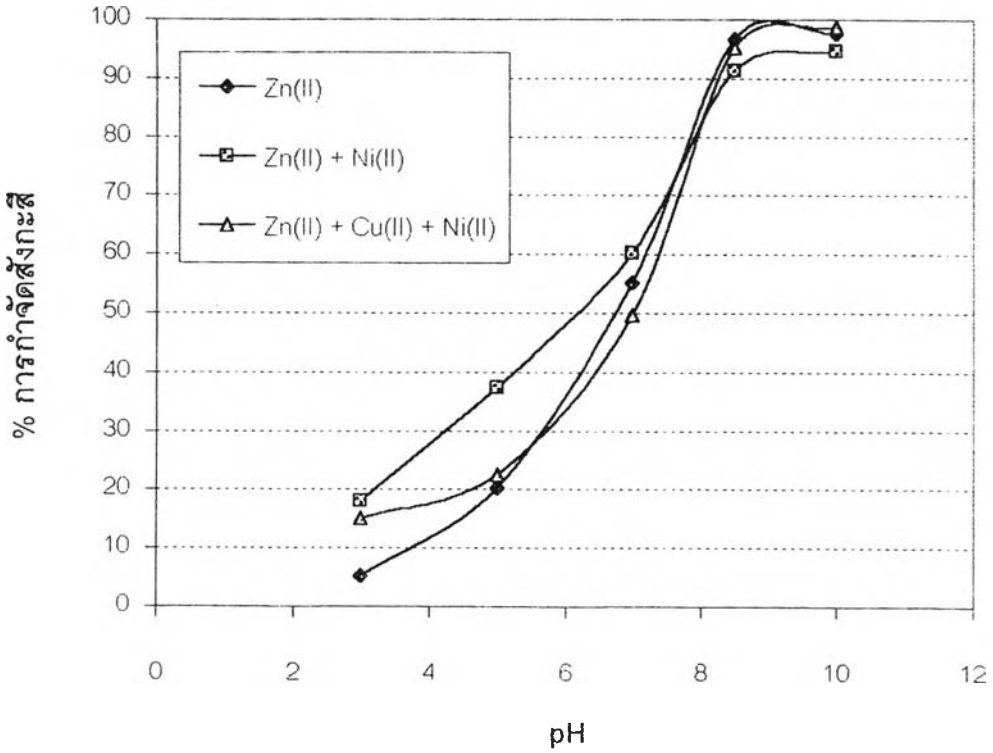
รูปที่ 4.22 ผลของอิออนสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.23 ผลของอิออนทองแดงและสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล



รูปที่ 4.24 ผลของอิออนนิกเกิลและสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง



รูปที่ 4.25 ผลของอิออนนิกเกิลและทองแดงที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าการที่มีอิออนของทองแดงอยู่ในระบบร่วมกับอิออนของนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าการที่มีอิออนของสังกะสีอยู่ในระบบร่วมกับอิออนของนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าการที่มีอิออนของทองแดง สังกะสี และนิกเกิลอยู่รวมกันในระบบมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาทั้ง 3 รูป จะเห็นได้ว่าการมีอยู่ของมีอิออนของทองแดง สังกะสี ในระบบแทบจะไม่มีผลอย่างไรต่อการดูดติดผิวของนิกเกิลเลย นอกจากนี้ Benjamin และ Leckie (1981 อ้างถึงใน James และ Douglas, 1990) ชี้ให้เห็นว่าการแข่งขันกันระหว่างอิออนของโลหะค่อนข้างจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของอิออนนั้นๆ และได้กล่าวอีกว่าหมู่ฟังชันก์บนพื้นผิวไฮดรัสออกไซด์มีผลต่อการยึดจับกับอิออนโลหะได้อย่างแข็งแรง มากกว่าผลของการแข่งขันกันระหว่างอิออนของโลหะสำหรับพื้นผิวที่มีพลังงานสูงและมีความหนาแน่นในการดูดติดผิวต่ำ

จากรูปที่ 4.24 เมื่อพิจารณาในส่วนของอิออนของทองแดงที่อยู่ในระบบร่วมกับอิออนของนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงโดยใช้เศษเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และถ้ามีทั้งอิออนของทองแดง สังกะสี และนิกเกิลอยู่ร่วมกันในระบบก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด

ทองแดงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยเช่นกัน ในรูปที่ 4.25 กรณีที่มีอิออนของสังกะสีที่อยู่ในระบบร่วมกับอิออนของนิกเกิลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีโดยใช้เศษเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กลับกันถ้ามีทั้งอิออนของสังกะสี ทองแดง และนิกเกิลอยู่ร่วมกันในระบบก็จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีลดลงเล็กน้อย

เมื่อมองในภาพรวมพอจะกล่าวได้ว่าการแข่งขันการดูดติดผิวของอิออนทั้งสามชนิดคือ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสีนั้นมีผลต่อกันน้อยมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้กระทำที่ความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ ทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดผิวอย่างมากมายเกินพอสำหรับอิออนทั้ง 3 ชนิด