บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

5.1.1 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนจากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนโดยไม่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3 ก. แสดงดังตารางที่ 5.1 พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าประมาณ 10.05 และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้เหลือต่ำกว่า 0.03 มก.ทองแดง/ล. ภายในเวลา 15 นาที ดังนั้นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

5.1.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนจากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ผลการทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนโดยไม่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 2, 10 และ 20 ก. แสดงดังตารางที่ 5.2 พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าประมาณ 10.05 และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้เพียง 7 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 10 ก. โดยแปรค่าพีเอชเป็น 3, 5, 7 และ 9 แสดงดังตารางที่ 5.3 พบว่าที่ค่าพีเอช 3 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าพีเอช 5, 7, และ 9 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้เพียง 7 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองเมื่อแปรค่าปริมาณทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่าปริมาณทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนที่ค่าพีเอชสูงๆ แต่เมื่อแปรค่าพีเอชพบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นค่อนข้างเป็นกรด

ตารางที่ 5.1 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนโดยไม่ปรับค่าพีเอช

Initial Copper-EDTA Concentration 20 mg Cu/L, 3 g Resin, Non Adjusted pH			
Time (minute)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal
0	10.05	20.05	
15	11.30	<0.03	>99.85
60	11.33	<0.03	>99.85
180	11.35	<0.03	>99.85

ตารางที่ 5.2 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ปริมาณต่างๆ โดยไม่ปรับค่าพีเอช

Initial Copper-EDTA Concentration 20 mg Cu/L, Non Adjusted pH,								
Time (minute)	2 g IOCS				10 g IOCS			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	10.05	20.05			10.05	20.02		
15	7.97	18.47	7.88	4.51	9.07	18.31	8.54	14.63
60	8.03	18.51	7.68	4.87	9.11	18.29	8.64	14.97
180	8.11	18.45	7.98	5.02	9.12	18.32	8.49	15.87
Time (minute)	20 g IOCS							
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)				
0	10.03	20.03						
15	9.08	18.29	8.69	22.23				
60	9.13	18.29	8.69	23.10				
180	9.10	18.31	8.59	23.44				

ตารางที่ 5.3 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

Initial Copper-EDTA Concentration 20 mg Cu/L, 10 g IOCS								
Time (minute)	pH 3				pH 5			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	3.03	19.97			4.99	19.95		
15	5.06	7.47	62.59	5.81	7.55	18.22	8.67	9.57
60	5.99	7.33	63.29	7.78	7.78	18.24	8.57	10.95
180	6.89	7.09	64.50	9.09	7.79	18.24	8.57	11.92
Time (minute)	pH 7				pH 9			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	7.02	19.96			9.04	20.01		
15	8.79	18.26	8.52	12.44	9.02	18.28	8.64	14.11
60	8.81	18.24	8.62	13.27	8.99	18.27	8.70	14.58
180	8.80	18.25	8.56	14.02	8.97	18.29	8.60	15.30

ถึงแม้ว่าที่ค่าพีเอชเป็นกรดทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จะสามารถกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้ดีขึ้นแต่ข้อจำกัดของวิธีนี้คือความเข้มข้นของเหล็กที่ละลายออกจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ เนื่องจาก EDTA อิสระซึ่งอยู่ในน้ำเสียเป็นสาเหตุสำคัญของการละลายของเหล็กจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เพราะว่า EDTA สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับโลหะได้ดี ดังนั้น EDTA อิสระจึงเกิดสารประกอบเชิงซ้อนร่วมกับเหล็กบนผิวทรายละลายในน้ำที่ผ่านการบำบัดซึ่งไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ และยังไม่สามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้ ดังนั้นวิธีการนี้จึงไม่เหมาะสมในการใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนเพราะว่านอกจากประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำแล้วยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดเหล็กเชิงซ้อนเพิ่มอีกด้วย

5.1.3 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียชุบโลหะทางไฟฟ้าโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ผลการทดลองการกำจัดทองแดงโดยไม่ปรับพีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 2, 10 และ 20 ก. แสดงดังตารางที่ 5.4 พบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าประมาณ 3.7 และทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 99.85 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองการกำจัดทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 10 ก. โดยแปรค่าพีเอชเป็น 3, 4, 5 และ 7 แสดงดังตารางที่ 5.5 พบว่าที่ค่าพีเอช 3 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงได้ประมาณร้อยละ 70 ในขณะที่ค่าพีเอช 4, 5, และ7 ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.85

ดังนั้นทรายเคลือบเหล็กออกไซด์จึงเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แบบคอลัมน์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

5.1.4 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น

จากผลการทดลองเบื้องต้นในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมเป็นตัวแทนของน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีและน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีความเหมาะสมในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงถึงร้อยละ 99.85 ส่วนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงถึงร้อยละ 99.85 โดยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กำจัด

ตารางที่ 5.4 การทดลองการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ปริมาณต่างๆ โดยไม่ปรับค่าพีเอช

Initial Copper Concentration 20 mg Cu/L, Non Adjusted pH,								
Time (minute)	2 g IOCS				10 g IOCS			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	3.75	19.98			3.77	19.99		
15	3.94	2.72	86.39	<0.03	4.27	<0.03	>99.85	<0.03
60	4.17	0.12	99.40	<0.03	4.61	<0.03	>99.85	<0.03
180	4.31	<0.03	>99.85	<0.03	4.98	<0.03	>99.85	<0.03
Time (minute)	20 g IOCS							
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)				
0	3.76	19.98						
15	5.02	<0.03	>99.85	<0.03				
60	5.45	<0.03	>99.85	<0.03				
180	5.93	<0.03	>99.85	<0.03				

ตารางที่ 5.5 การทดลองการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ

Initial Copper Concentration 20 mg Cu/L, 10 g IOCS								
Time (minute)	pH 3				pH 4			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	2.98	20.04			4.02	19.99		
15	3.27	8.37	58.23	<0.03	4.40	<0.03	>99.85	<0.03
60	3.59	6.14	69.36	<0.03	5.63	<0.03	>99.85	<0.03
180	3.72	5.96	70.26	<0.03	5.86	<0.03	>99.85	<0.03
Time (minute)	pH 5				pH 7			
	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)	pH	[Cu] (mg Cu/L)	% Cu Removal	[Fe] (mg Fe/L)
0	5.04	19.95			6.99	19.98		
15	5.94	<0.03	>99.85	<0.03	6.87	<0.03	>99.85	<0.03
60	6.59	<0.03	>99.85	<0.03	6.85	<0.03	>99.85	<0.03
180	6.83	<0.03	>99.85	<0.03	6.82	<0.03	>99.85	<0.03

ทองแดงเชิงซ้อนแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพกำจัดทองแดงเชิงซ้อนได้ถึงร้อยละ 64.50 ที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3 แต่พบว่ามีเหล็กปนเปื้อนมากับน้ำหลังการบำบัด

ดังนั้นการศึกษาและดำเนินการทดลองต่อไปคือ การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียจะการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

5.2 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

5.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน Cu-EDTA ความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 โดยไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนปริมาตร 153 มล. ด้วยอัตราการไหล 20 BV/hr

ผลของความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังรูปที่ 5.1 ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดให้ผ่านมาตรฐานความเข้มข้นทองแดงออกไม่เกิน 2 มก.ทองแดง/ล. มีค่าประมาณ 288 BV และปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 5691 มก.ทองแดง/ล.เรซิน เมื่อเรซินเริ่มหมดสภาพค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นทองแดงในน้ำเข้าคือ 20 มก.ทองแดง/ล.

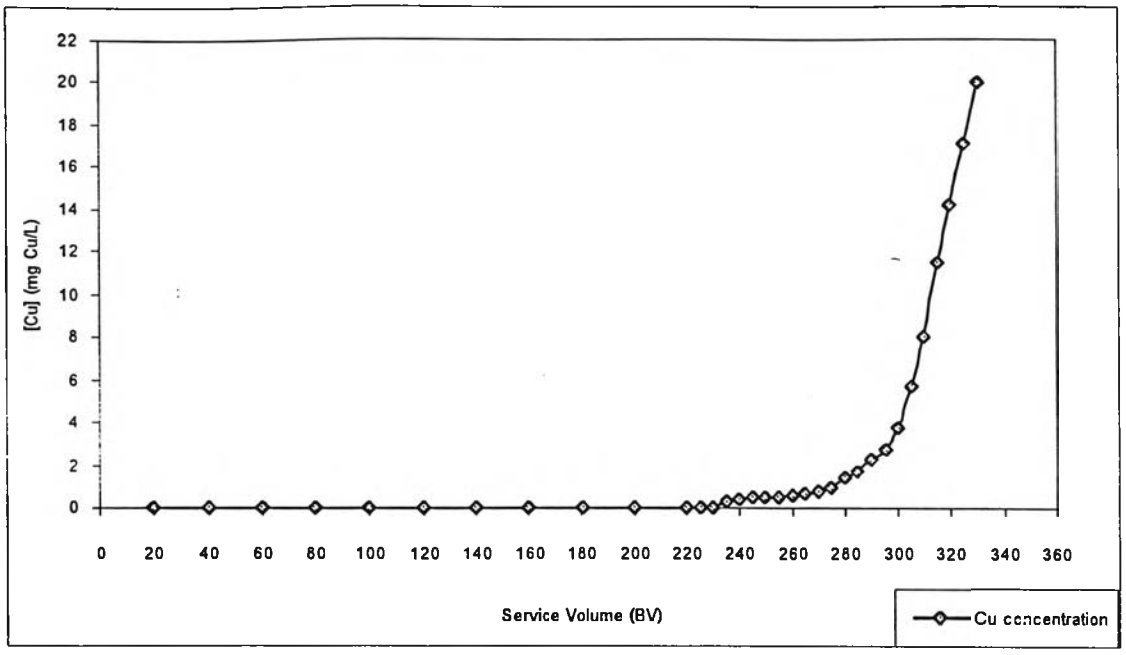
ผลของค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังรูปที่ 5.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าประมาณ 10 เมื่อทำการบำบัดและวัดค่าพีเอชในน้ำออกพบว่าในช่วงแรกที่เรซินยังไม่หมดสภาพพีเอชในน้ำออกจะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 11.7 เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนของเรซินกับCu-EDTAไอออน และ EDTAไอออนดังสมการที่ 5.1 ถึง 5.2 ทำให้พีเอชในน้ำออกมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชเริ่มต้น หลังจากนั้นเมื่อเรซินเริ่มหมดสภาพปฏิกิริยาข้างต้นจะเกิดช้าลงทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออนออกมาน้อยลงทำให้พีเอชเริ่มลดลง

$$4ROH + EDTA^{4-} \Rightarrow R_4EDTA + 4OH^- \quad (5.1)$$

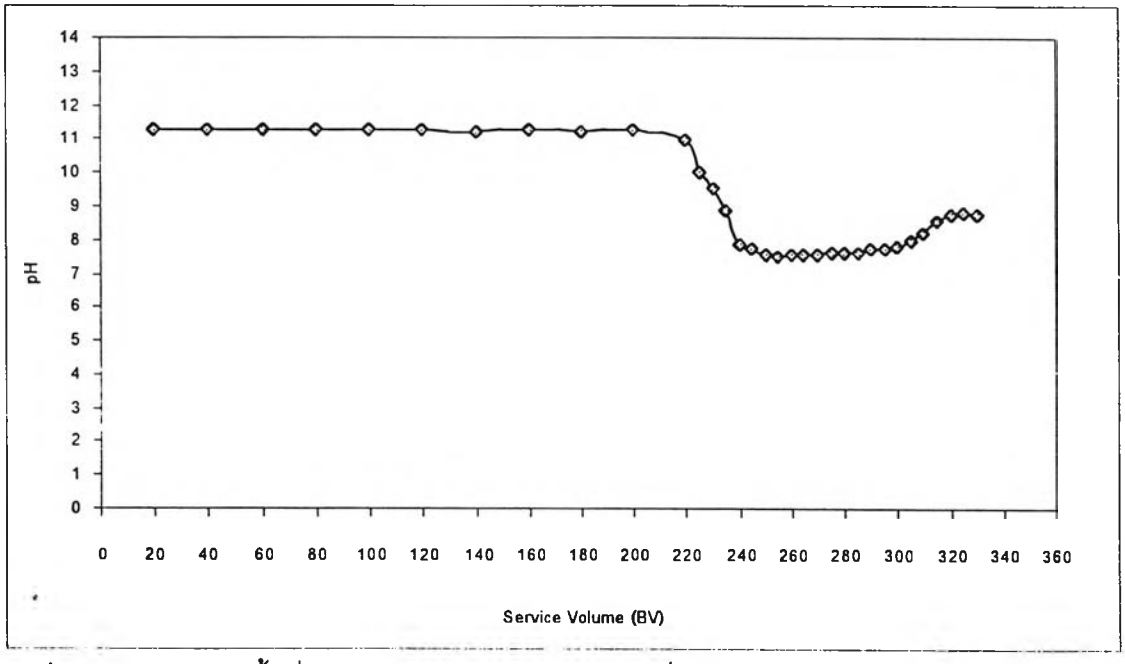
$$2ROH + Cu\,EDTA^{2-} \Rightarrow R_2Cu\,EDTA + 2OH^- \quad (5.2)$$

5.2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การทดลองบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน Cu-EDTA ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. โดยใช้อัตราการไหล 20 BV/hr ทำการบำบัดจนได้น้ำที่ผ่านการบำบัด 330 BV จากนั้นทำการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราไหล 4.5 BV/hr โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันคือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3, 4, 5 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 5.1 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน



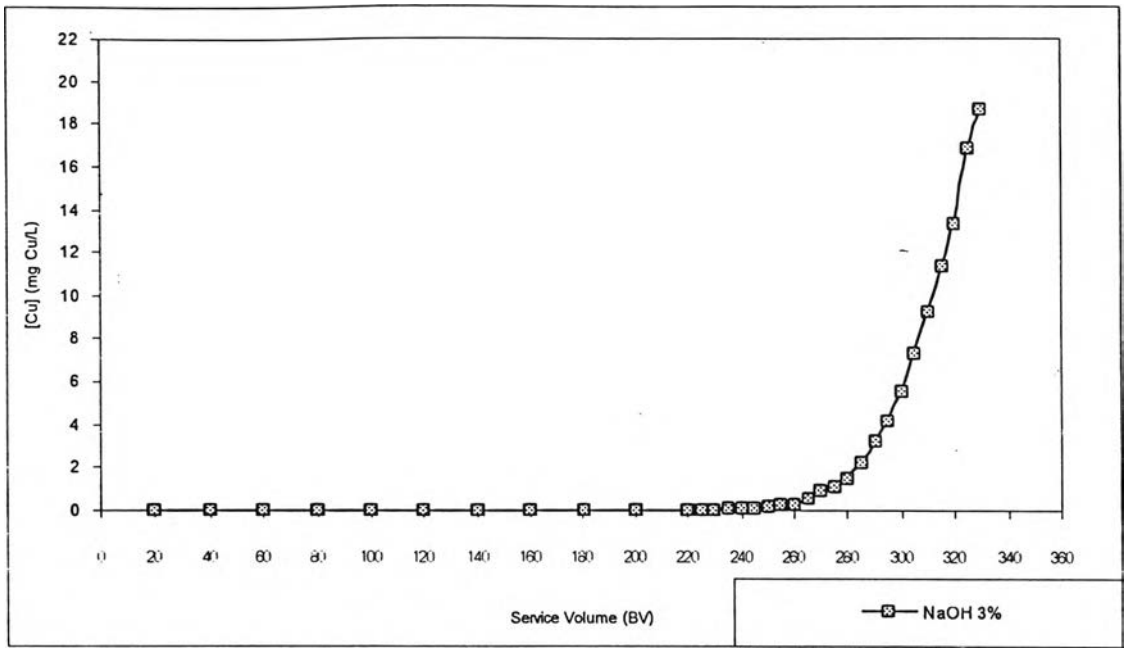
รูปที่ 5.2 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหล 20 BV/hr ก่อนที่จะมีการรีเจนเนอเรชันด้วยความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ก. ถึง 5.3 ง. พบว่าการกำจัดทองแดงมีลักษณะใกล้เคียงกันได้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ใกล้เคียงกันสรุปได้ดังตารางที่ 5.6

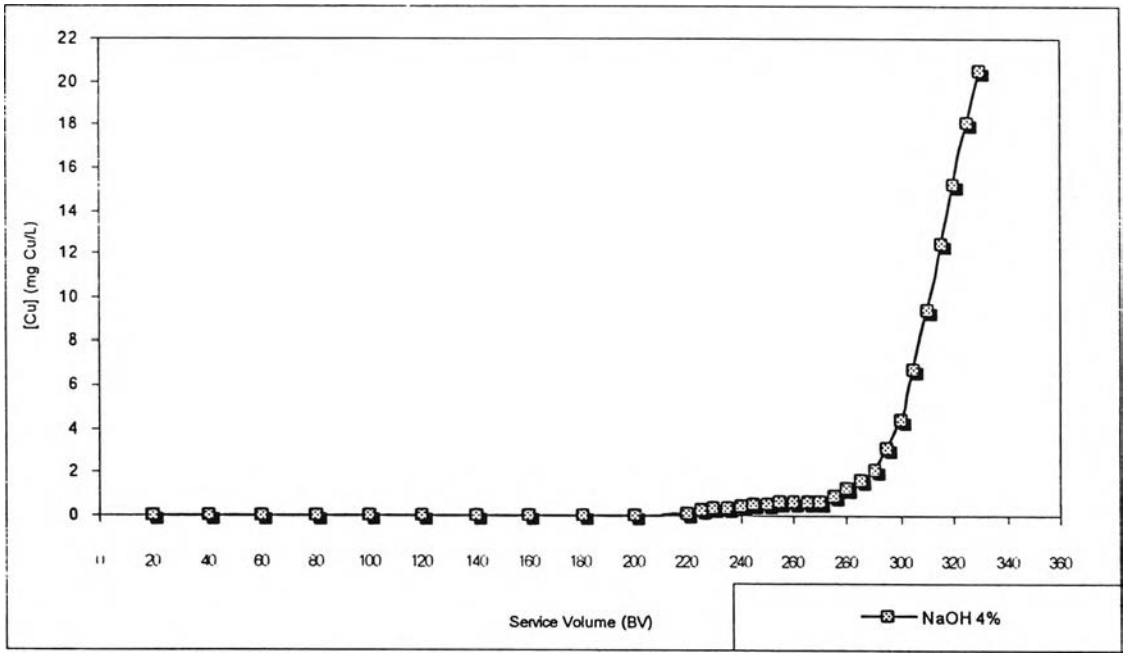
ความเข้มข้นทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินที่หมดสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3, 4, 5 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr แสดงดังรูปที่ 5.4 ก. ถึง 5.4 ง. และ รูปที่ 5.5 พบว่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 83.92 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จากเริ่มต้นถึง 0.45 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 85.64 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จากเริ่มต้นถึง 0.45 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 88.30 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จากเริ่มต้นถึง 0.30 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 99.09 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จากเริ่มต้นถึง 0.45 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ กับร้อยละการนำกลับทองแดงดังรูปที่ 5.6 พบว่า เมื่อพิจารณาการนำกลับทองแดงประมาณร้อยละ 0 ถึง 50 การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารรีเจนเนอเรชันจะมีความคุ้มค่าที่สุดเพราะมีค่าปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาการกนำกลับทองแดงร้อยละ 50 ขึ้นไป การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นสารรีเจนเนอเรชันจะมีความคุ้มค่าที่สุดเพราะมีค่าปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป มากที่สุด

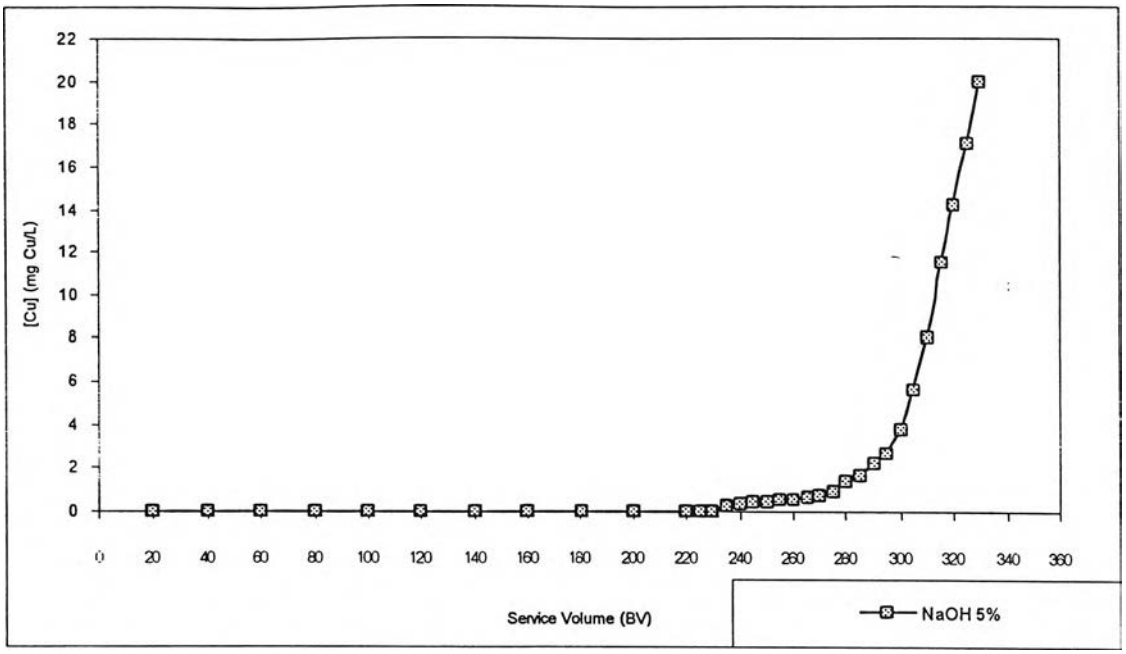
เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากการรีเจนเนอเรชันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ค่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากการรีเจนเนอเรชันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 พบว่า ทุกๆความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์พีเอชในน้ำออกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่ประมาณ 12 เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปประมาณ 0.75 BV



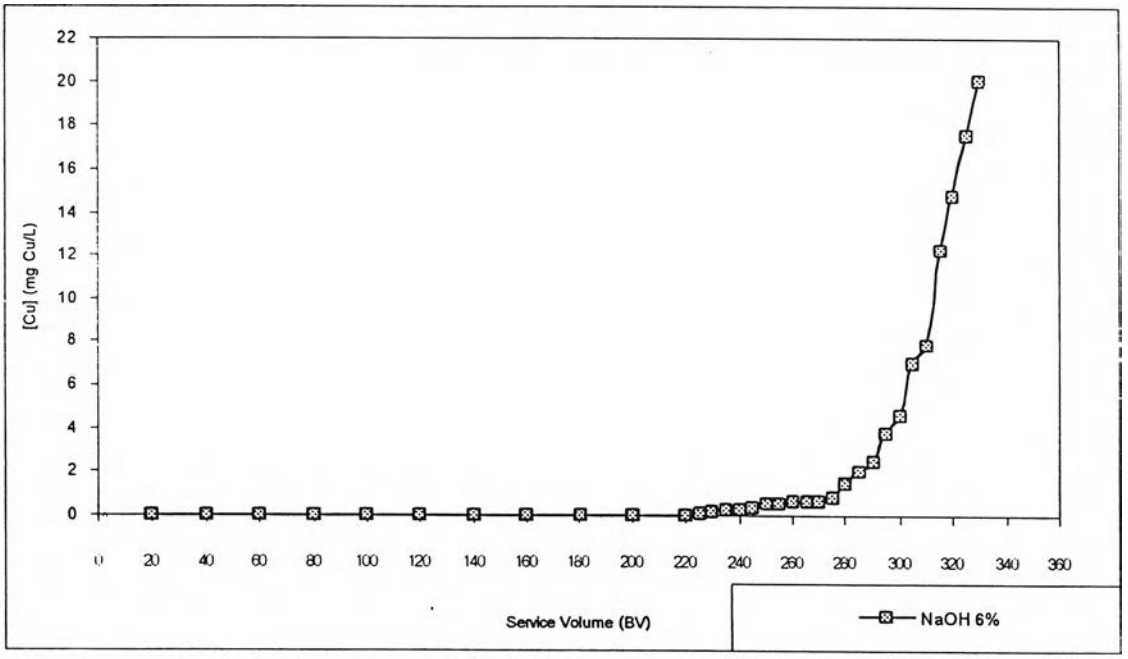
รูปที่ 5.3 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 3%



รูปที่ 5.3 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 4%



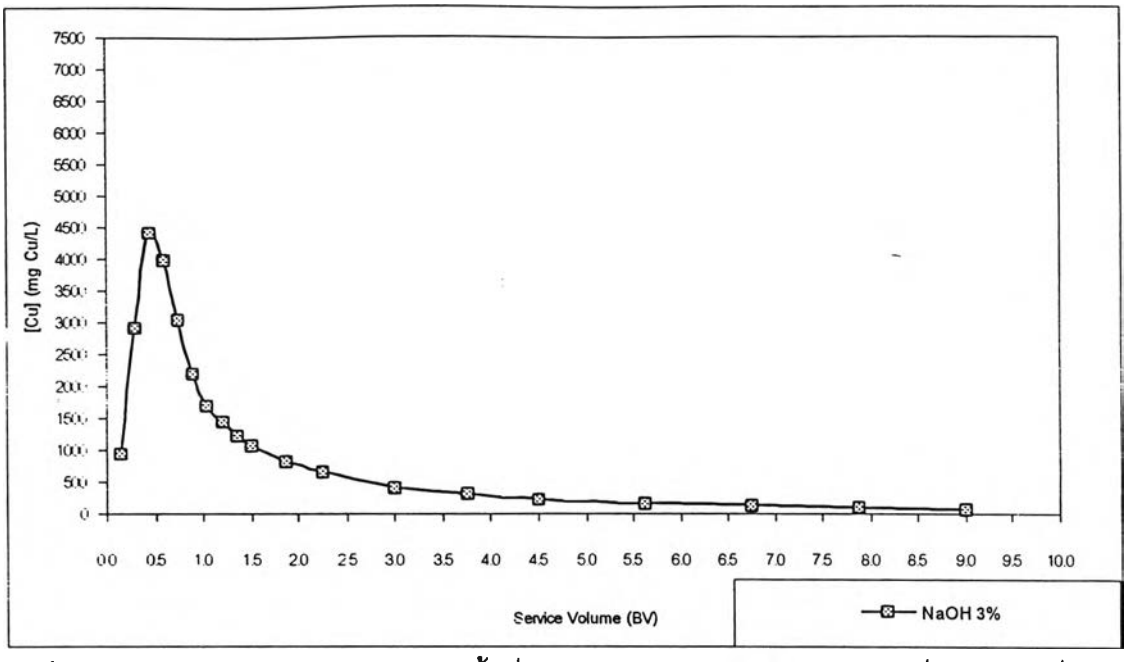
รูปที่ 5.3 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 5%



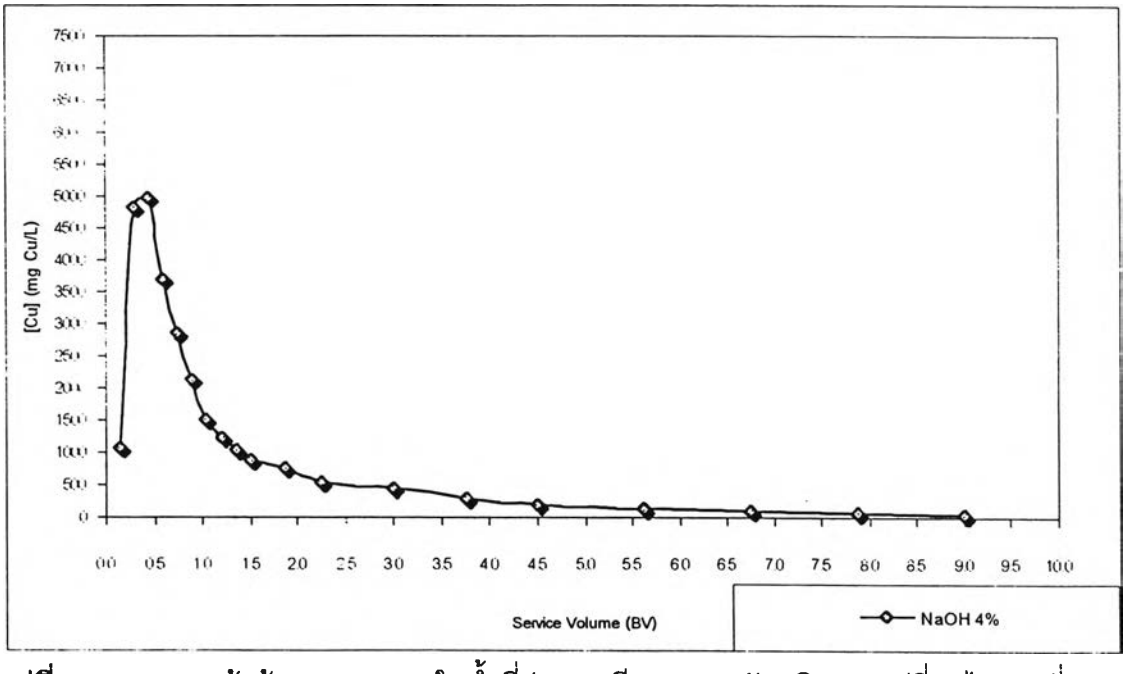
รูปที่ 5.3 ง. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 6%

ตารางที่ 5.6 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ

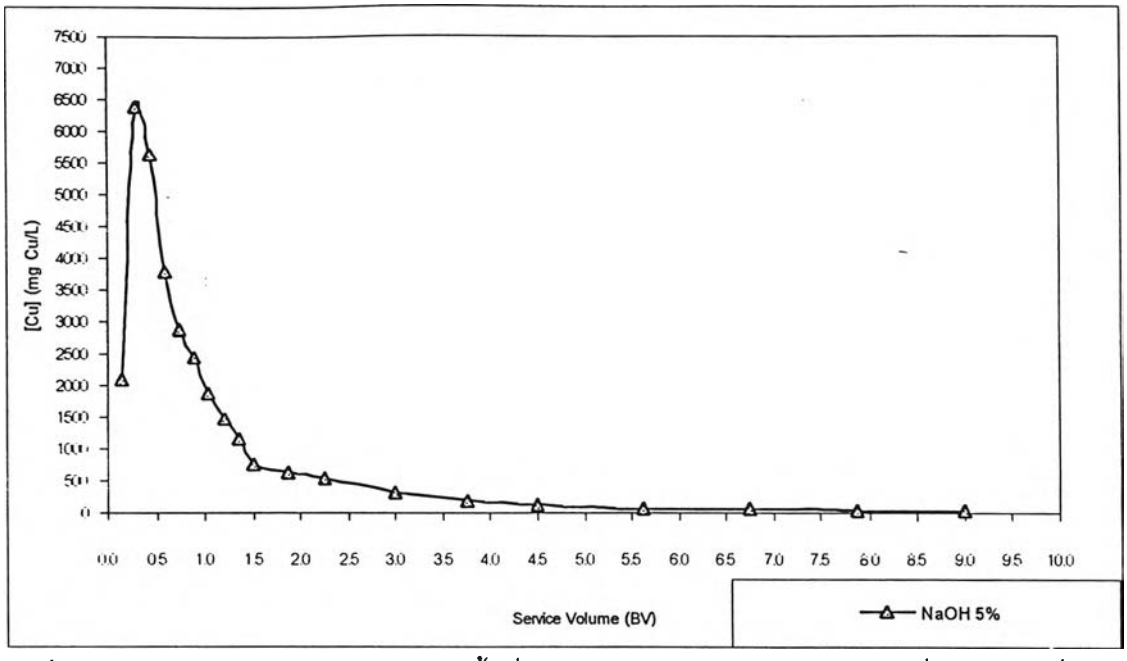
Inlet Copper 20 mg Cu/L, Non adjusted pH, Service Flow Rate 20 BV/hr		
Regenerant Concentration	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on Resin (mg Cu/L resin)
NaOH 3 % by weight	283	5650
NaOH 4 % by weight	287	5619
NaOH 5 % by weight	288	5691
NaOH 6 % by weight	285	5585



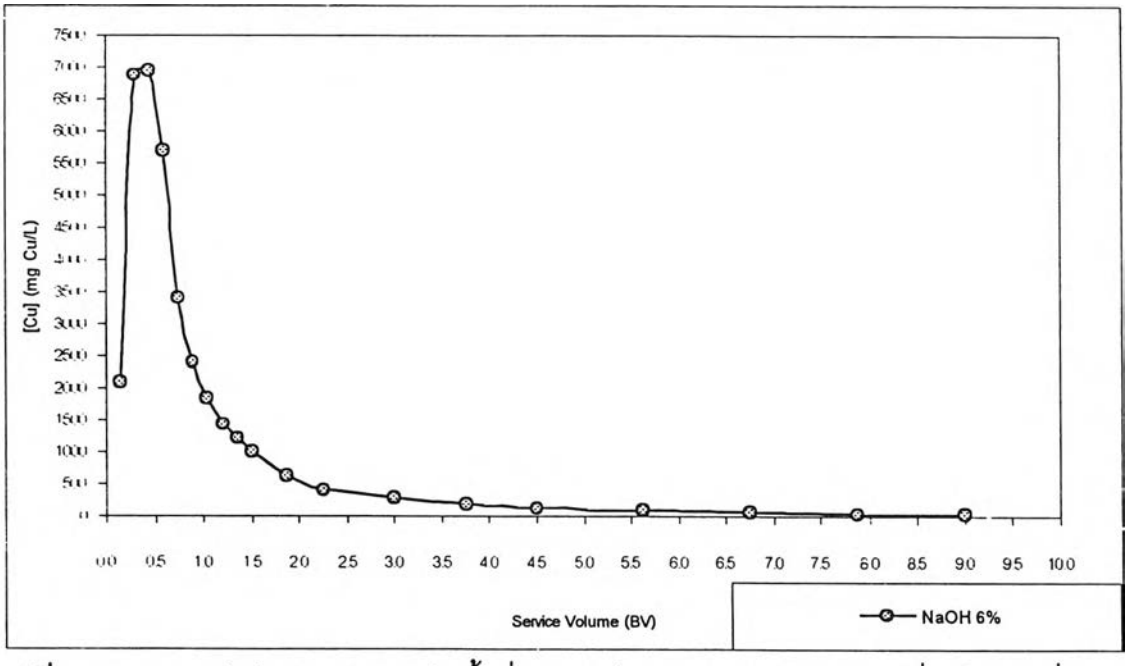
รูปที่ 5.4 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 3%



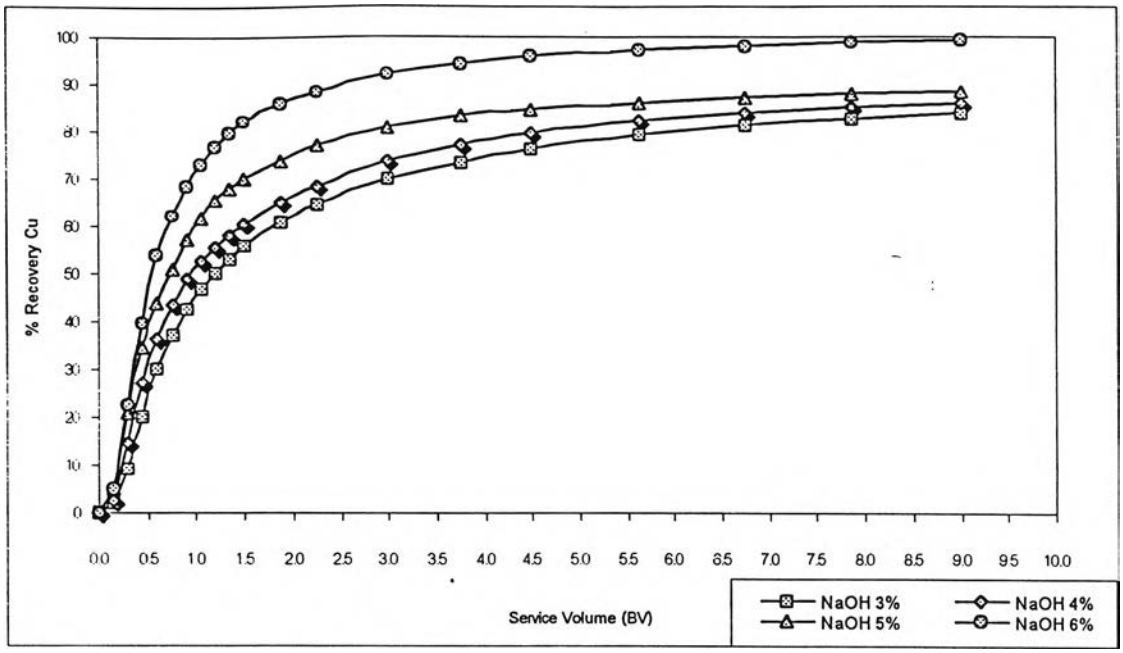
รูปที่ 5.4 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 4%



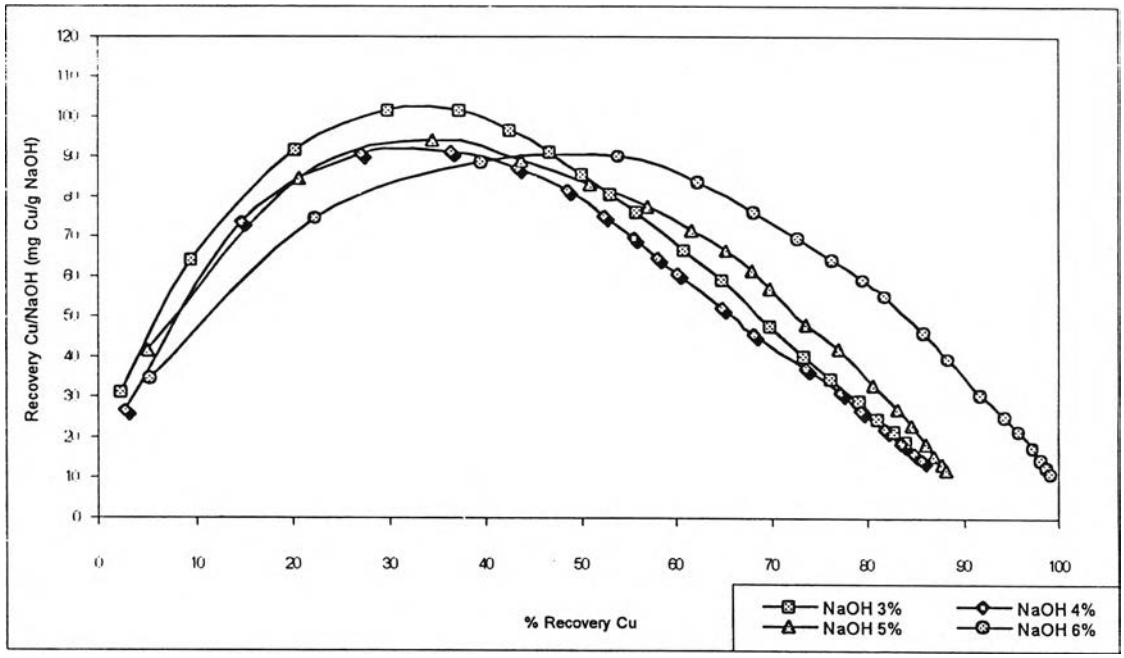
รูปที่ 5.4 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 5%



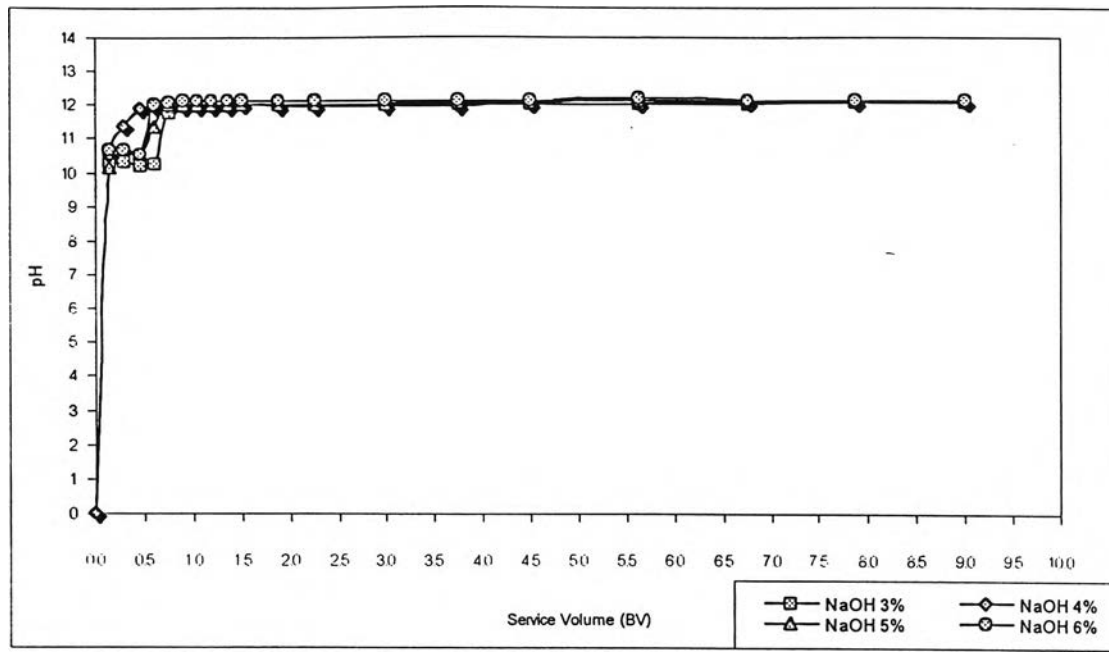
รูปที่ 5.4 ง. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 6%



รูปที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 5.6 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณ NaOH ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 5.7 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ

5.2.3 การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

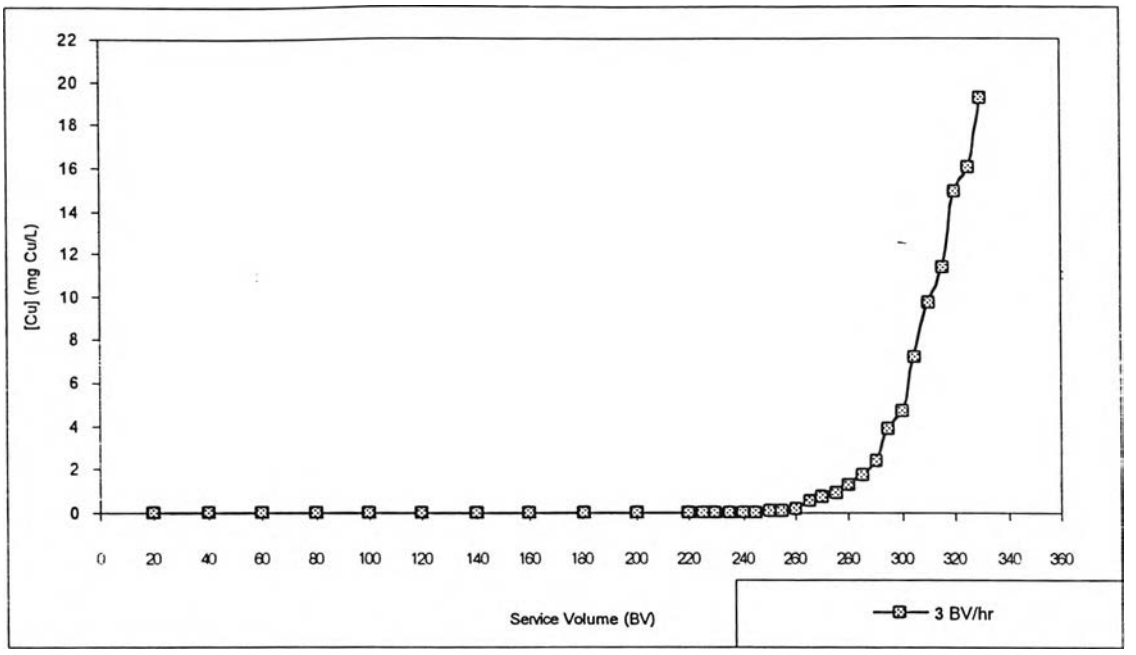
การทดลองทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน Cu-EDTA ที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 10 มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. โดยใช้อัตราการไหล 20 BV/hr ทำการบำบัดจนได้น้ำที่ผ่านการบำบัด 330 BV จากนั้นทำการรีเจนเนอเรชันด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา และแปรค่าอัตราไหลของการรีเจนเนอเรชันเป็น 3, 4.5 และ 6 BV/hr

ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหล 20 BV/hr ก่อนที่จะมีการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.8 ก. ถึง 5.8 ค. พบว่าการกำจัดทองแดงมีลักษณะใกล้เคียงกันได้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ใกล้เคียงกันสรุปได้ดังตารางที่ 5.7

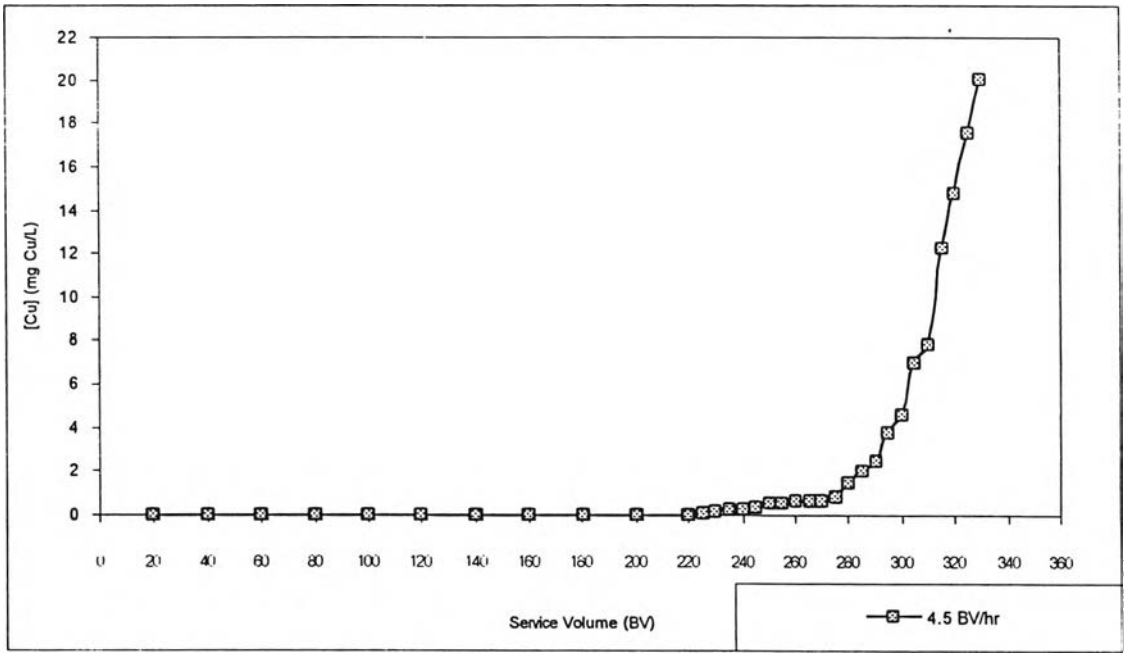
ความเข้มข้นทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันที่หมดสภาพด้วยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อัตราการรีเจนเนอเรชัน 3, 4.5 และ 6 BV/hr แสดงดังรูปที่ 5.9 ก. ถึง 5.9 ค.และ รูปที่ 5.10 พบว่าอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr นำกลับทองแดงได้ร้อยละ 68.93 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปจากเริ่มต้นถึง 0.60 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่ เมื่อใช้โซเดียม ไฮดรอกไซด์ ไป 4.5 BV อัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr นำกลับทองแดงได้ร้อยละ 99.09 ภายในเวลา 2 ชั่วโมงการนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปจากเริ่มต้นถึง 0.45 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV อัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr นำกลับทองแดงได้ร้อยละ 95.69 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงจะออกมาสูงเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปจากเริ่มต้นถึง 0.40 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้กับร้อยละการนำกลับทองแดงดังรูปที่ 5.11 พบว่าเมื่อพิจารณาการนำกลับทองแดงประมาณร้อยละ 0 ถึง 40 การใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr จะมีความคุ้มค่าที่สุดเพราะมีค่าปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาการนำกลับทองแดงร้อยละ 40 ขึ้นไปการใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr จะมีความคุ้มค่าที่สุดเพราะมีค่าปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไปมากที่สุด

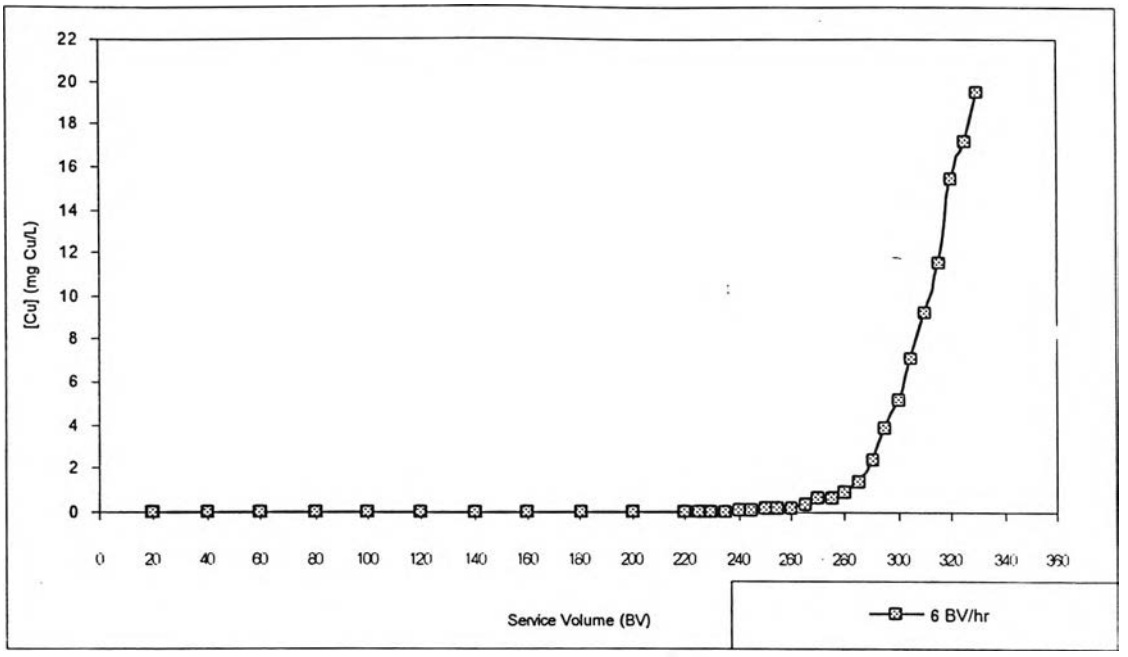
ในทางปฏิบัติมักนิยมทำรีเจนเนอเรชันเพื่อเรียกอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกลับคืนมาบางส่วน เพราะว่าถ้าเรียกอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนกลับคืนมาทั้งหมดจะต้องสิ้น



รูปที่ 5.8 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr



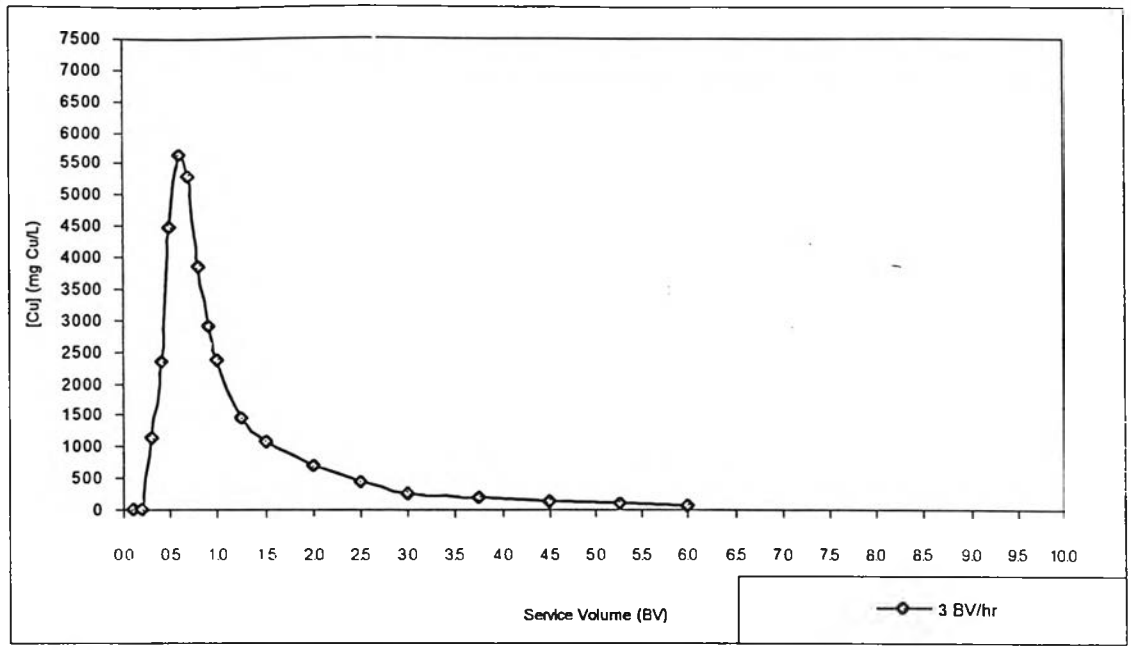
รูปที่ 5.8 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr



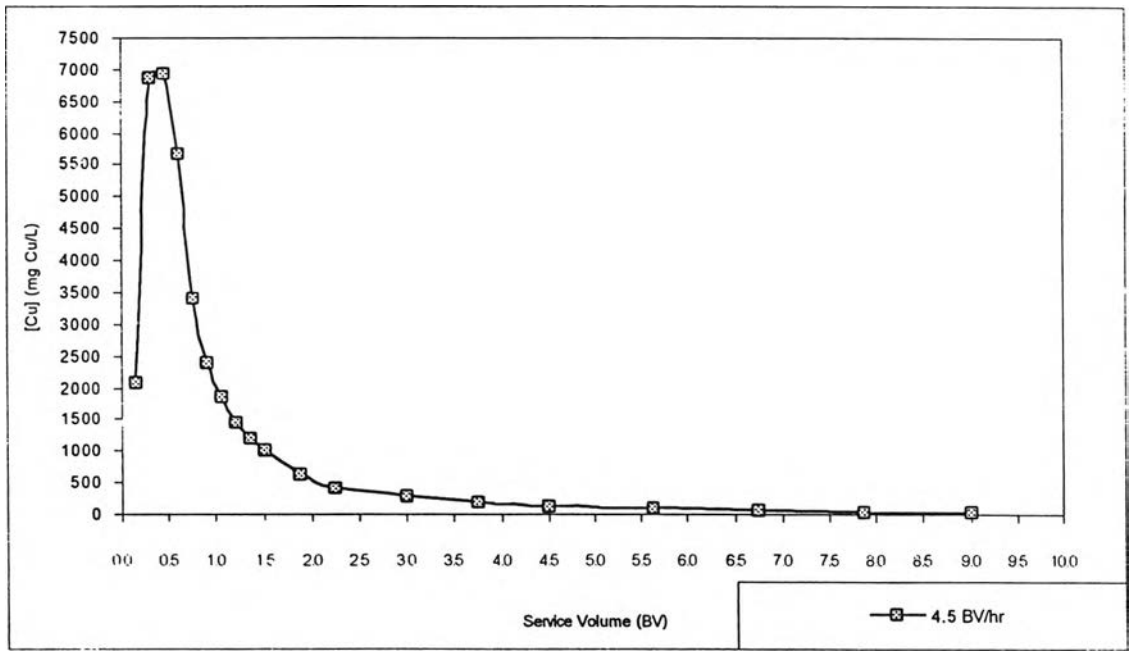
รูปที่ 5.8 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr

ตารางที่ 5.7 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ

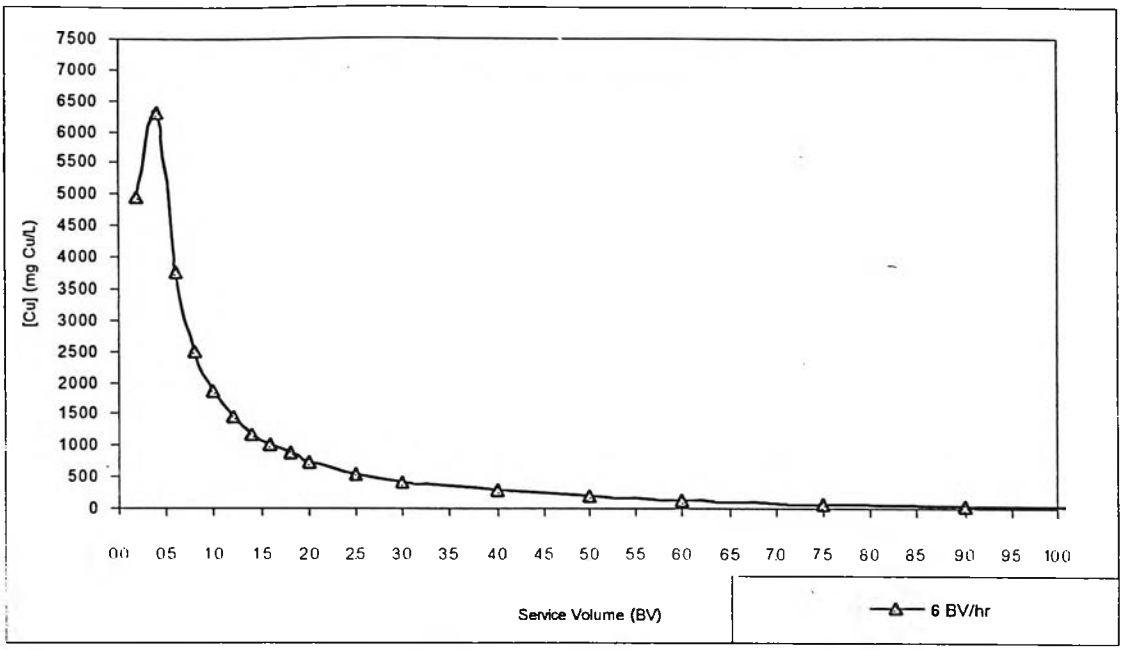
Inlet Copper 20 mg Cu/L, Non adjusted pH, Service Flow Rate 20 BV/hr		
Regeneration Flow Rate (BV/hr)	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on Resin (mg Cu/L resin)
3	287	5650
4.5	285	5585
6	288	5708



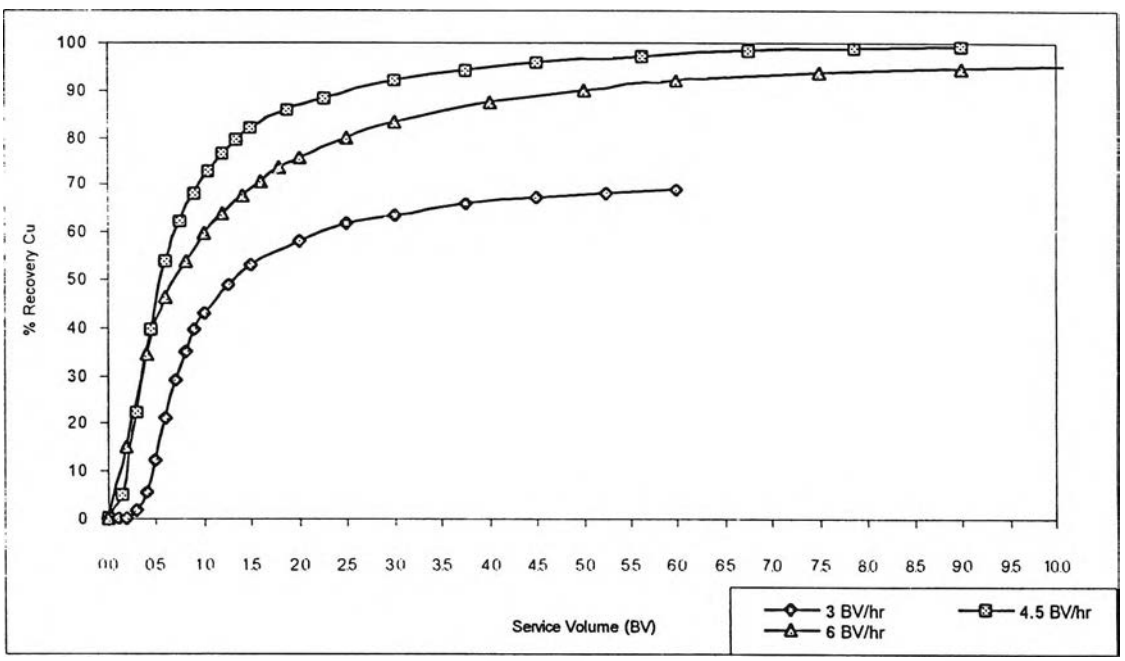
รูปที่ 5.9 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr



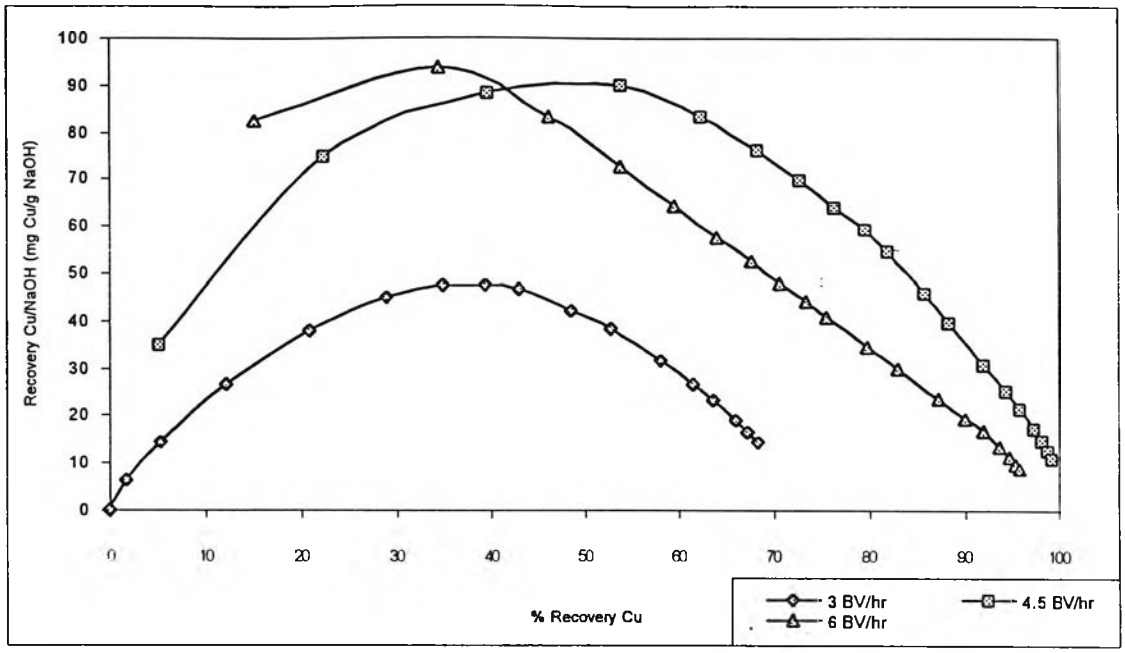
รูปที่ 5.9 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr



รูปที่ 5.9 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr



รูปที่ 5.10 เปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ



รูปที่ 5.11 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณ NaOH ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ

เปลืองสารรีเจนเนอแรนต์และพลังงานมากจนอาจไม่คุ้มค่ากับผลตอบแทน ดังนั้นระยะเวลาในการทำรีเจนเนอเรชันเรซินมีค่าประมาณ 60 นาที ที่อัตราการรีเจนเนอเรชัน 2 ถึง 6 BV/hr (มั่นสิน, 2539) ดังนั้นเมื่อพิจารณาการนำกลับทองแดงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr ที่เวลา 1 ชั่วโมง จะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 4.5 BV จึงจะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 95.71

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.12 พบว่า ทุกๆอัตราการรีเจนเนอเรชัน พีเอชในน้ำออกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่ประมาณ 12 เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไปประมาณ 0.75 BV

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมด ระหว่างผลการคำนวณการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมดจากการทดลองกับค่าแนะนำของผู้ผลิต เป็นดังนี้ (การคำนวณโดยละเอียดดูที่ภาคผนวก ข.)

ในน้ำเสียทองแดงเชิงซ้อน ประกอบไปด้วย

$CuEDTA^{2-}$ = 111 มก./ล. (มี Cu = 20 มก.Cu/ล.)

$EDTA^{4-}$ = 180 มก./ล.

SO_4^{2-} = 30.2 มก./ล.

$COOH^-$ = 29.3 มก./ล.

OH^- = 1.7 มก./ล.

Na^+ = 87 มก./ล.

H^+ = 1×10^{-7} มก./ล.

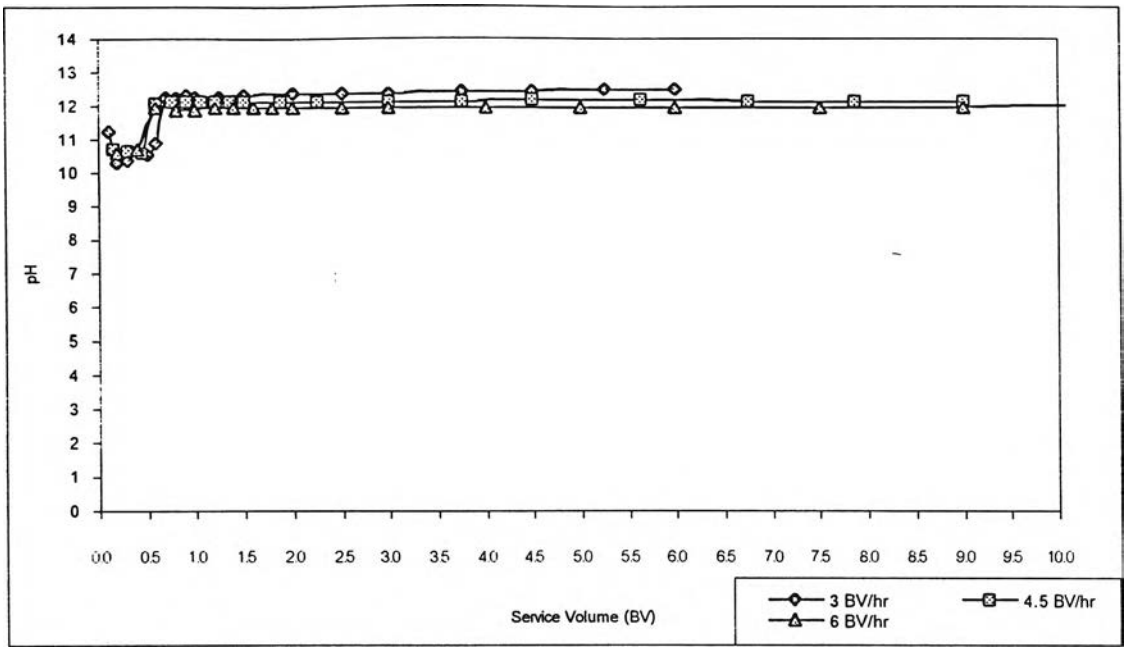
เรซิน 0.153 ลิตร บำบัดน้ำเสียได้ 44 ลิตร ดังนั้นเรซินปริมาตร 1 ลิตร จะสามารถแลกเปลี่ยนประจุลบกับไอออนของน้ำเสียได้ดังนี้

$CuEDTA^{2-}$ = 31922 มก./ล.เรซิน

$EDTA^{4-}$ = 51765 มก./ล.เรซิน

SO_4^{2-} = 8685 มก./ล.เรซิน

$COOH^-$ = 8426 มก./ล.เรซิน



รูปที่ 5.12 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ

จำนวน eq/ล.เรซิน = $\frac{[\text{ปริมาณประจุลบที่ถูกแลกเปลี่ยน(ก./ล.เรซิน) X จำนวณประจุ(eq/mol)}]}{\text{มวลโมเลกุล(g/mol)}}$

ดังนั้น

$CuEDTA^{2-}$ = 31922 X 10^{-3} X 2 / 351.5 = 0.18 eq/ล.เรซิน

$EDTA^{4-}$ = 51765 X 10^{-3} X 4 / 288 = 0.72 eq/ล.เรซิน

SO_4^{2-} = 8685 X 10^{-3} X 2 / 96 = 0.18 eq/ล.เรซิน

$COOH^-$ = 8426 X 10^{-3} X 1 / 45 = 0.19 eq/ล.เรซิน

ดังนั้นค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมดของเรซิน

= 0.18 + 0.72 + 0.18 + 0.19 = 1.27 eq/ล.เรซิน

ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมดของเรซินจากการทดลองจริงเท่ากับ 1.27 eq/ล.เรซิน ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแนะนำของผู้ผลิตคือ 1.2 eq/ล.เรซิน

การกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน Cu-EDTA ที่มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยอัตราไหล 20 BV/hr ไม่ปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย พบว่าสามารถบำบัดน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐานความเข้มข้นของทองแดงไม่เกิน 2 มก. ทองแดง/ล. ประมาณ 288 BV ปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ประมาณ 5691 มก.ทองแดง/ล.เรซิน ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมดของเรซินเท่ากับ 1.23 eq/ล.เรซิน ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแนะนำของผู้ผลิต และสภาวะที่เหมาะสมในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพพบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการรีเจนเนอเรชันที่เหมาะสมคือ 4.5 BV/hr ใช้เวลาในการรีเจนเนอเรชันประมาณ 60 นาที จะสามารถนำกลับทองแดงได้ประมาณร้อยละ 95.71

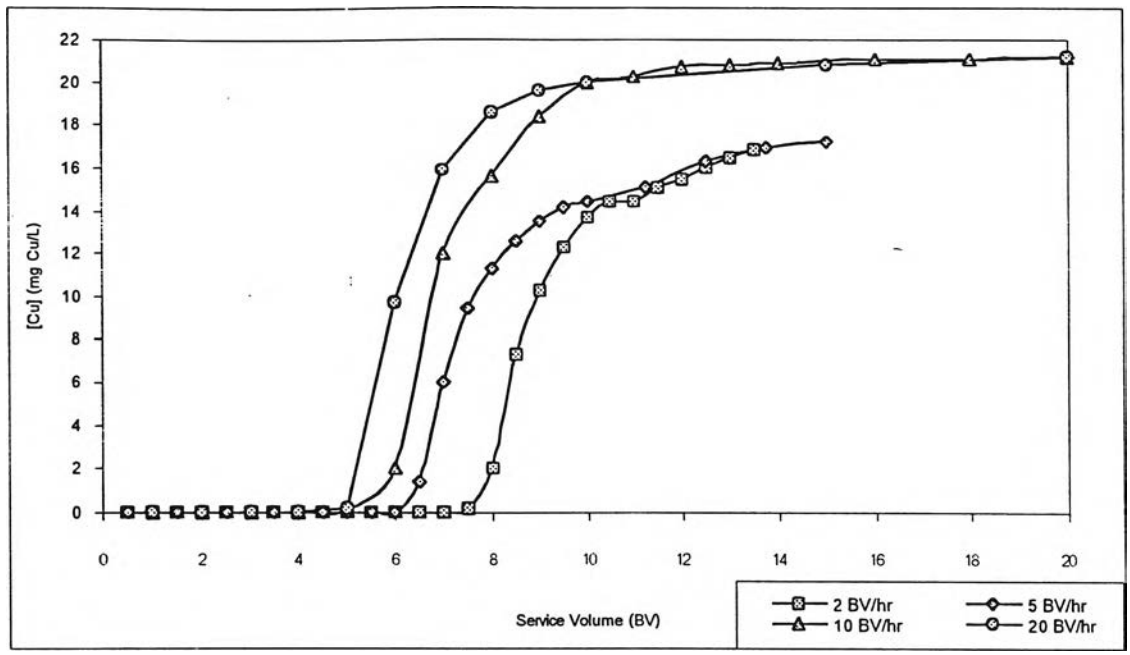
5.3 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

5.3.1 การศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุทรายเคลือบเหล็กออกไซด์โดยปรับอัตราไหลเป็น 2, 5, 10 และ 20 BV/hr

ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหลต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.13 พบว่าลักษณะการกำจัดทองแดงที่อัตราไหลต่างๆ มีความคล้ายคลึงกันคือ ในช่วงแรกจะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำออกต่ำใกล้เคียงศูนย์ และเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เริ่มหมดสภาพ ปริมาณทองแดงในน้ำออกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกราฟจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกใกล้เคียงกับค่าทองแดงในน้ำเข้า 20 มก.ทองแดง/ล. เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดให้ผ่านมาตรฐานความเข้มข้นทองแดงออกไม่เกิน 2 มก.ทองแดง/ล. แสดงดังตารางที่ 5.8 พบว่าที่อัตราการไหล 2 BV/hr ปริมาณน้ำที่บำบัดได้เท่ากับ 8.00 BV และปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้เท่ากับ 158 มก.ทองแดง/ล.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่อัตราไหลอื่นๆ เพราะว่าเมื่ออัตราไหลต่ำจะสามารถบำบัดน้ำเสียได้ปริมาณที่สูงขึ้นเนื่องจากที่อัตราไหลต่ำจะทำให้มีเวลากักเก็บน้ำเสียนานขึ้นทำให้ตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถสัมผัสน้ำเสียได้นานขึ้นและสามารถใช้พื้นที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ได้คุ้มค่าขึ้น ดังนั้นอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์คือ 2 BV/hr

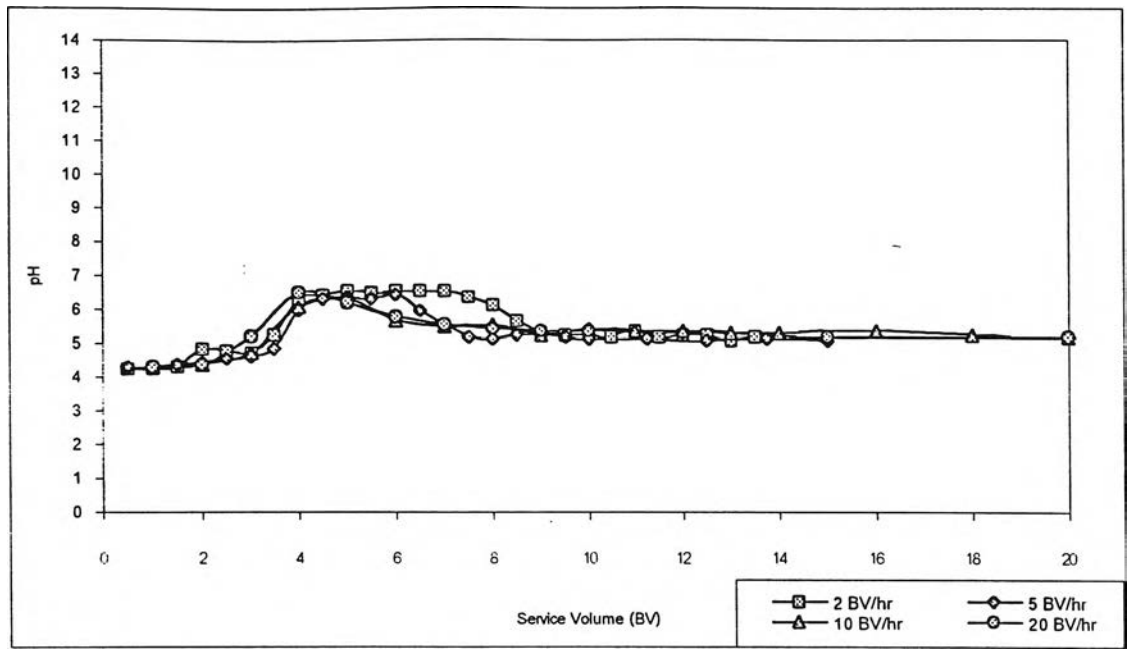
ค่าพีเอชที่ผ่านการบำบัดด้วยอัตราไหลต่างๆ ค่าพีเอชในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหลต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.14 พบว่าที่ทุกอัตราไหลในช่วงแรกๆ พีเอชจะค่อยๆสูงขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 6.3 ถึง 6.5 เนื่องจากเหล็กที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นชนิด Geothite มี ZPC ประมาณ 6.1 ถึง 6.7 (Forstner และ Wittman, 1981) ดังนั้นเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเป็น 4 ทำให้ประจุที่พื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นบวก จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้มากกว่าไอออนบวก นั้นคือเกิดการแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ กับซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในน้ำเสียได้ดีทำให้พีเอชในน้ำออกมีค่าสูงขึ้น ส่วนการแลกเปลี่ยนประจุบวกคือไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์กับทองแดงไอออน (Cu^{2+}) ในน้ำเสียโดยทองแดงจะถูกดูดติดอยู่นอกชั้น Stern Layer จนเมื่อพีเอชในน้ำออกมีค่าประมาณ 6.3 ถึง 6.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ZPC ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนลบและการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีค่าใกล้เคียงกัน พีเอชจึงมีค่าค่อนข้างคงที่



รูปที่ 5.13 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหลต่างๆ

ตารางที่ 5.8 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหลต่างๆ

Inlet Copper 20 mg Cu/L, pH4		
Service Flow Rate (BV/hr)	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on IOCS (mg Cu/L IOCS)
2	8	158
5	6.57	130
10	6	118
20	5.19	103



รูปที่ 5.14 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหลต่างๆ

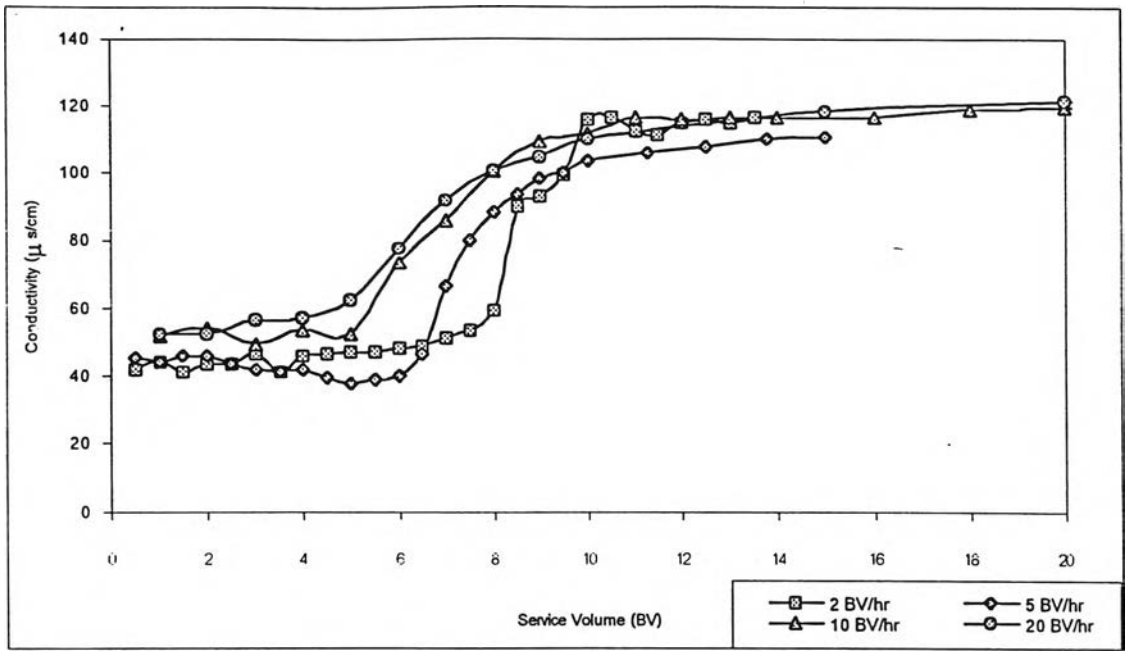
เมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เริ่มหมดสภาพ การแลกเปลี่ยน OH^- กับ SO_4^{2-} และH^+กับ Cu^{2+} เริ่มลดลงพีเอชจึงเริ่มตกลง แต่เนื่องจากน้ำเสียมีสภาวะเป็นกรดซึ่งทำให้ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นบวกการและการแลกเปลี่ยนระหว่าง OH^- กับ SO_4^{2-} ยังพอมีอยู่บ้างจึงทำให้พีเอชไม่ลดลงจนเป็น 4 เท่ากับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ

เมื่อพิจารณาสภาพนำไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยอัตราไหลต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 5.15 พบว่าในช่วงแรกค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำออกของทุกๆอัตราการไหลมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 40 ถึง 80 ไมโครซีเมนส์/ซม. จนเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เริ่มหมดสภาพ ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นและเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หมดสภาพ ค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำออกของทุกๆ อัตราการไหลจะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 100 ถึง 120 ไมโครซีเมนส์/ซม

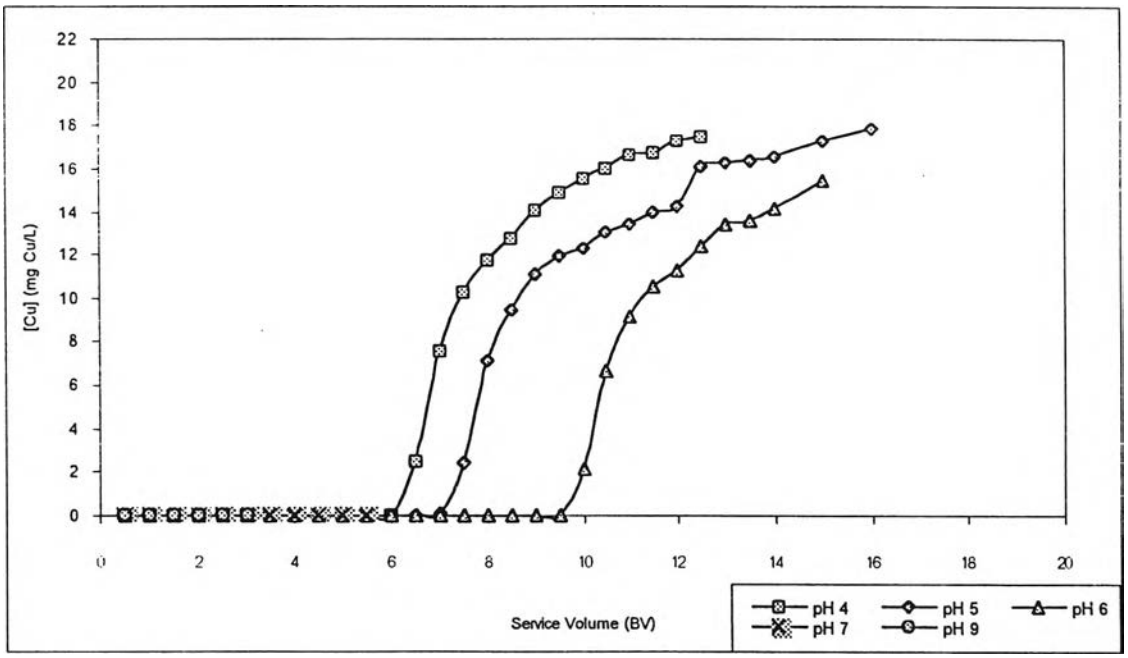
5.3.2 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหล 2 BV/hr ซึ่งเป็นอัตราไหลที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา โดยมีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4, 5, 6, 7 และ 9

ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่พีเอชเข้าต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 พบว่าลักษณะการกำจัดทองแดงที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆมีความคล้ายคลึงกันคือ ในช่วงแรกจะมีค่าความเข้มข้นของทองแดงในน้ำออกต่ำใกล้เคียงศูนย์ และเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เริ่มหมดสภาพปริมาณทองแดงในน้ำออกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกราฟจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกใกล้เคียงกับค่าทองแดงในน้ำเข้าคือ 20 มก.ทองแดง/ล. เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดให้ผ่านมาตรฐานความเข้มข้นทองแดงออกไม่เกิน 2 มก.ทองแดง/ล. แสดงได้ดังตารางที่ 5.9 พบว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 6 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้เท่ากับ 9.97 BV และปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ประมาณ 198 มก.ทองแดง/ล.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นอื่นๆ เพราะว่าเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้นจะมีการบำบัดน้ำเสียได้มากขึ้นเนื่องจากเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้นจะทำให้เกิดการตกตะกอนทางเคมีทำให้กลไกในการบำบัดน้ำเสียของตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ประกอบไปด้วยการดูดติดผิวและกลไกการกรอง แต่ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 7 และ 9 จะมีปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดน้อยกว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 6 เนื่องมาจากการตกตะกอนทางเคมีเกิดขึ้นสูงเกิดฟล้อคสีน้ำเงินอย่างเห็นได้ชัด และเคลือบติดอยู่ที่ชั้นบน



รูปที่ 5.15 ค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหลต่างๆ



รูปที่ 5.16 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

ตารางที่ 5.9 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

Inlet Copper 20 mg Cu/L, Service Flow Rate 2 BV/hr		
pH of Inlet Copper	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on IOCS (mg Cu/L IOCS)
4	6.41	127
5	7.43	148
6	9.97	198
7	5.5	110
9	3	60

ของตัวกลางทราย ทำให้เกิดการสูญเสียเฮด (Headloss) สูงมาก ดังนั้นค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ คือ 6

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆแสดงได้ดังรูป 5.17 พบว่าในการบำบัดช่วงแรกๆ น้ำออกจะมีค่าพีเอชต่ำกว่าน้ำเข้า เนื่องจากทรายมีสภาพเป็นกรดจึงทำให้มีการปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมาทำให้พีเอชในน้ำออกในช่วงแรกมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์

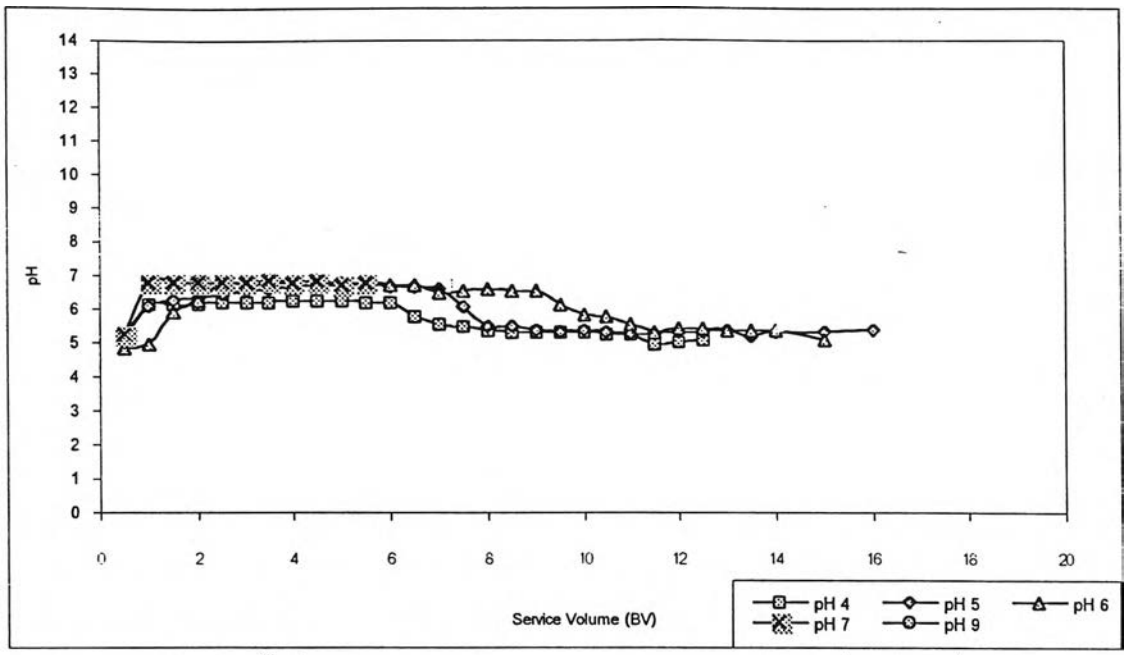
ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 และ 5 การบำบัดในช่วงแรกๆ พีเอชออกจะค่อยๆสูงขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วงประมาณ 6.3 ถึง 6.5 เนื่องจากเหล็กที่ผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นชนิด Geothite มี ZPC ประมาณ 6.1 ถึง 6.7 (Forstner และ Wittman, 1981) ดังนั้นเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 และ 5 ทำให้ประจุที่พื้นผิวของทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นบวก จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลบได้มากกว่าไอออนบวกดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 5.3.1 ทำให้พีเอชน้ำออกค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเมื่อค่าพีเอชในน้ำออกมีค่าประมาณ 6.3 ถึง 6.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ZPC ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนลบและการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมีค่าใกล้เคียงกันค่าพีเอชจึงมีค่าค่อนข้างคงที่ จากนั้นเมื่อทรายเริ่มหมดสภาพการแลกเปลี่ยนไอออนเริ่มลดลงทำให้ค่าพีเอชในน้ำออกค่อยๆลดลง

สำหรับที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 น้ำเสียสังเคราะห์บางส่วนจะเกิดการตกตะกอนทางเคมีทำให้การบำบัดเป็นทั้งการดูดติดผิวและแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี แต่ส่วนใหญ่จะเป็นกลไกการดูดติดผิวและแลกเปลี่ยนไอออนจึงทำให้พีเอชมีค่าสูงขึ้นจนมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 6.3 ถึง 6.5 เท่ากับค่า ZPC และเมื่อทรายเริ่มหมดสภาพ กลไกการตกตะกอนทางเคมีจึงเป็นตัวควบคุมค่าพีเอชน้ำออกดังสมการที่ 5.3 เป็นผลทำให้ค่าพีเอชมีค่าลดลงต่ำกว่า 6

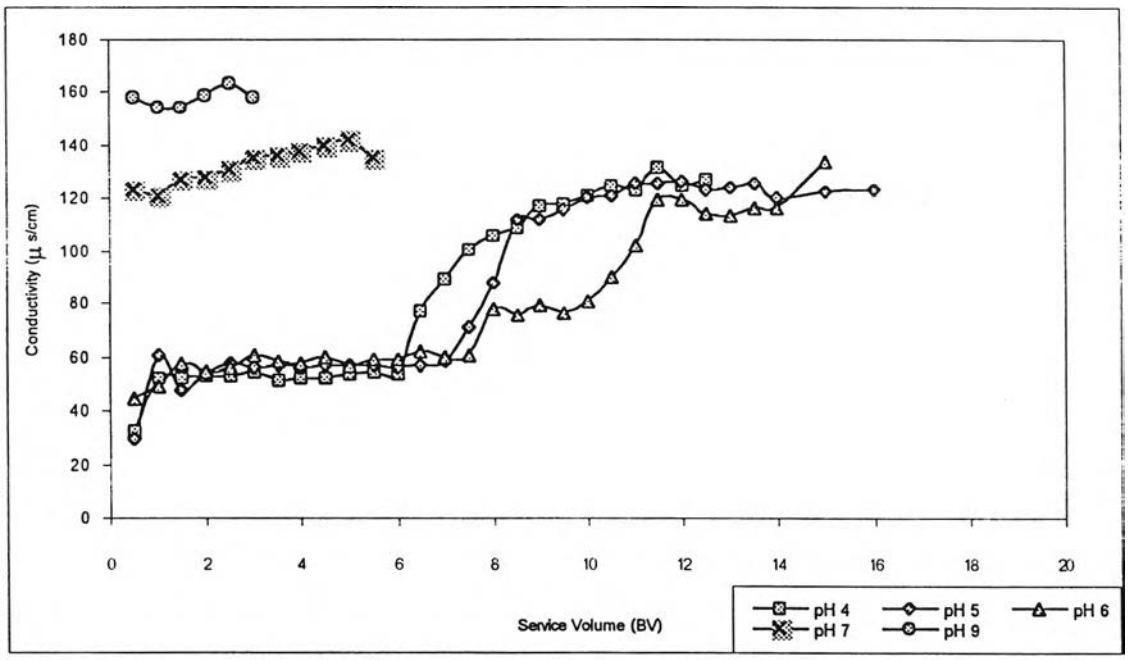
$$Cu^{2+} + 2\,OH^{-} \Longrightarrow Cu(OH)_2 \qquad (5.3)$$

สำหรับที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 7 และ 9 นั้นทำให้สภาวะเป็นด่างมีค่าพีเอชสูงกว่า ZPC ทำให้ประจุที่พื้นผิวทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เป็นลบ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมากกว่าการแลกเปลี่ยนไอออนลบทำให้เกิดการเพิ่มไฮโดรเจนไอออนและเกิดการตกตะกอนทางเคมีซึ่งมีการใช้ไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้พีเอชในน้ำออกไม่สูงเกินกว่าค่าพีเอชเริ่มต้น

เมื่อพิจารณาค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหลต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 พบว่าในช่วงแรกค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำออกของทุกๆอัตราการไหลมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 40 ถึง 80 ไมโครซีเมน/ซม. จนเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์เริ่มหมดสภาพ ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นและเมื่อทรายเคลือบเหล็กออกไซด์หมดสภาพค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำออกของทุกๆ อัตราการไหลจะมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 100 ถึง 120 ไมโครซีเมนส์/ซม



รูปที่ 5.17 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



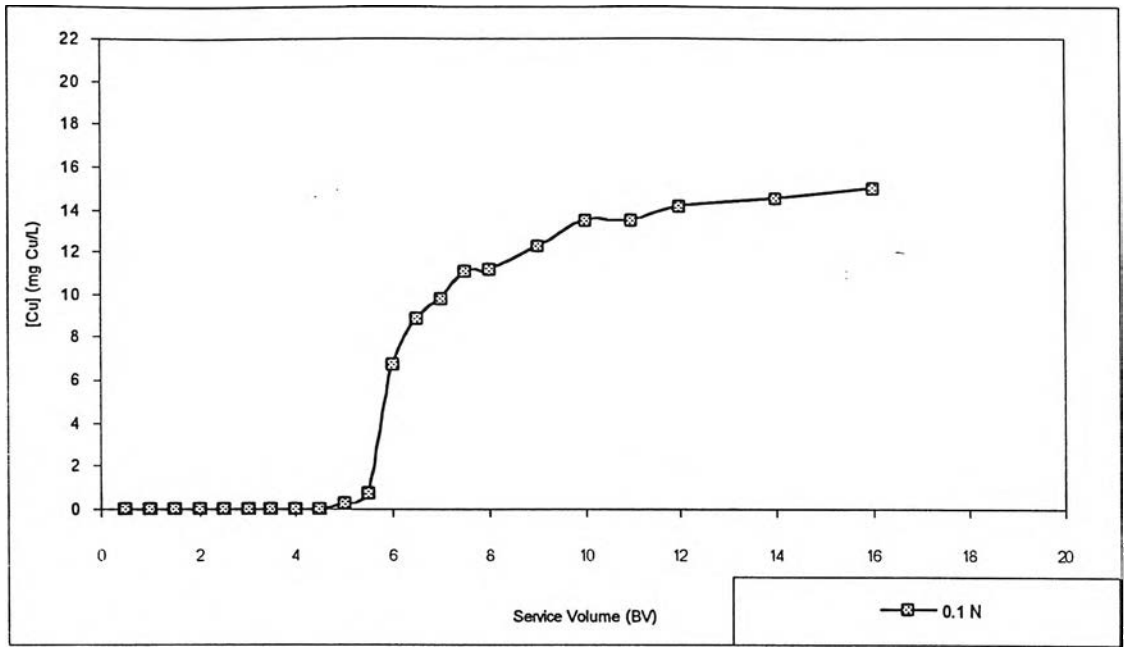
รูปที่ 5.18 ค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ

5.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารีเจนเนอแรนท์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

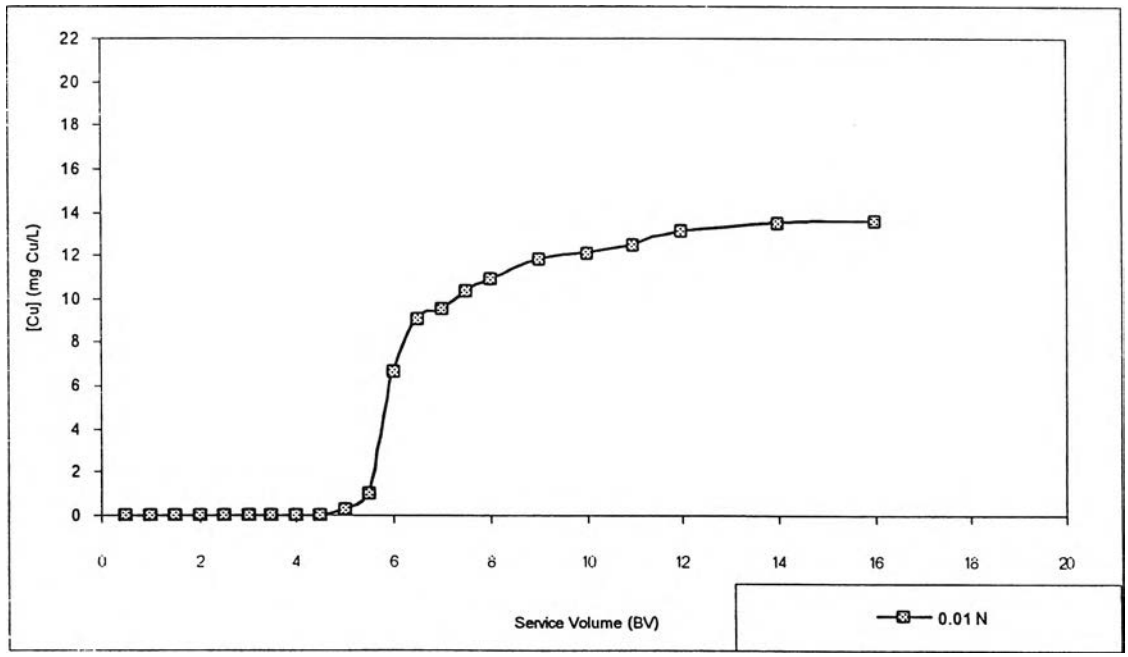
การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารีเจนเนอแรนท์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงได้ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 โดยใช้อัตราการไหล 2 BV/hr ซึ่งเป็นค่าพีเอชและอัตราไหลที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองที่ผ่านมา ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทำการบำบัดจนได้น้ำที่ผ่านการบำบัด 16 BV จากนั้นทำการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตรา 4.5 BV/hr โดยแปรค่าความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันกรดซัลฟุริคเป็น 0.1 นอร์มัล, 0.01 นอร์มัล และ 0.001 นอร์มัล ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหล 2 BV/hr ก่อนที่จะมีการรีเจนเนอเรชันด้วยความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.19 ก. ถึง 5.19 ค. พบว่าการกำจัดทองแดงมีลักษณะใกล้เคียงกันได้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ใกล้เคียงกันสรุปได้ดังตารางที่ 5.10

ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพแล้วด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr ด้วยกรดซัลฟุริคความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล, 0.01 นอร์มัล และ 0.001 นอร์มัล แสดงดังรูปที่ 5.20 ก. ถึง 5.20 ค. และ รูปที่ 5.21 พบว่าที่ความเข้มข้นกรด 0.1 นอร์มัล จะนำกลับทองแดงออกมาได้มากสุดคือร้อยละ 88.87 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงออกมาสูงในช่วงเริ่มต้นถึง 0.3 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นกรด 0.01 นอร์มัล จะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 86.67 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงออกมาสูงในช่วงเริ่มต้นถึง 0.75 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลง เมื่อใช้ความเข้มข้นกรด 0.001 นอร์มัล จะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 27.85 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง การนำกลับทองแดงส่วนใหญ่อยู่ในช่วงเริ่มต้นถึง 3.75 BV

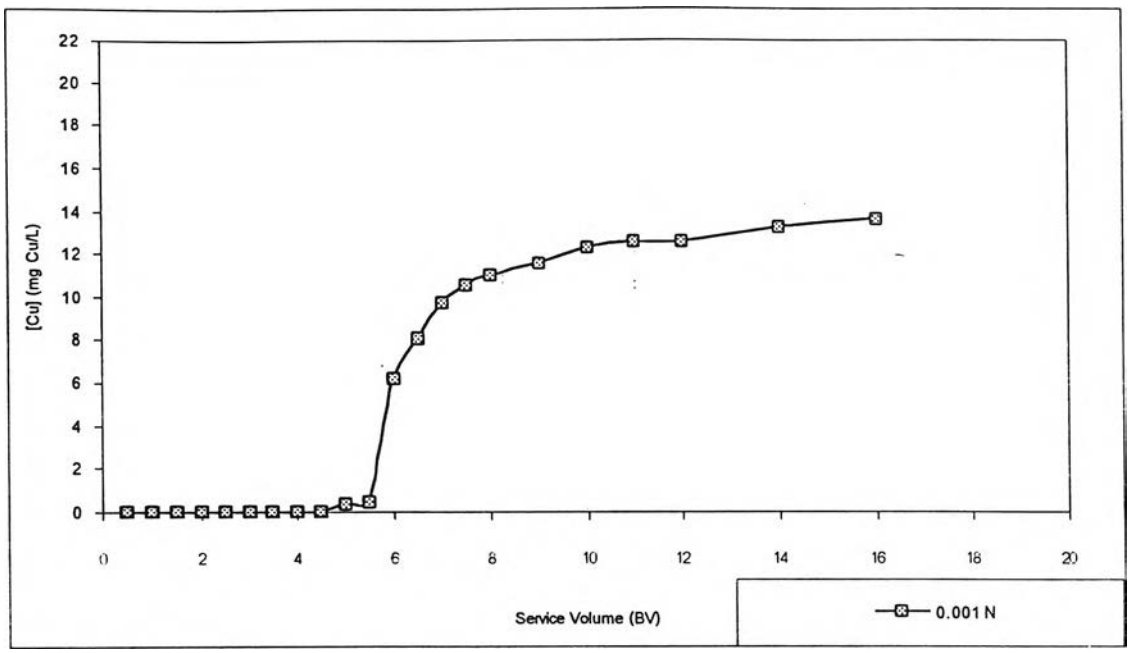
เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงพบว่าเมื่อใช้กรดความเข้มข้น 0.001 นอร์มัล จะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงต่ำมากเพียงร้อยละ 27.87 แต่ในขณะที่เมื่อใช้กรดความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และ 0.01 นอร์มัล จะมีเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงสูงถึงร้อยละ 88.87 และ 86.67 ตามลำดับ ดังนั้นการนำกลับทองแดงด้วยกรดความเข้มข้น 0.001 นอร์มัลจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปพิจารณา ในที่นี้จึงจะพิจารณาเฉพาะกรณีของการนำกลับทองแดงโดยใช้กรดความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และ 0.01 นอร์มัล



รูปที่ 5.19 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 N



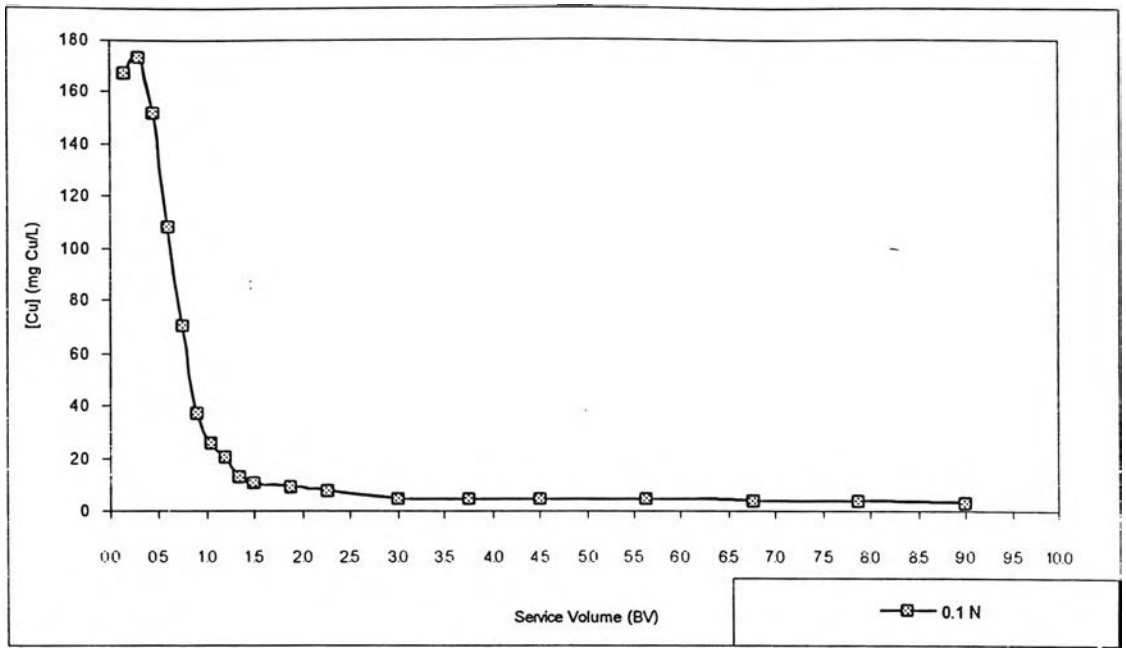
รูปที่ 5.19 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.01 N



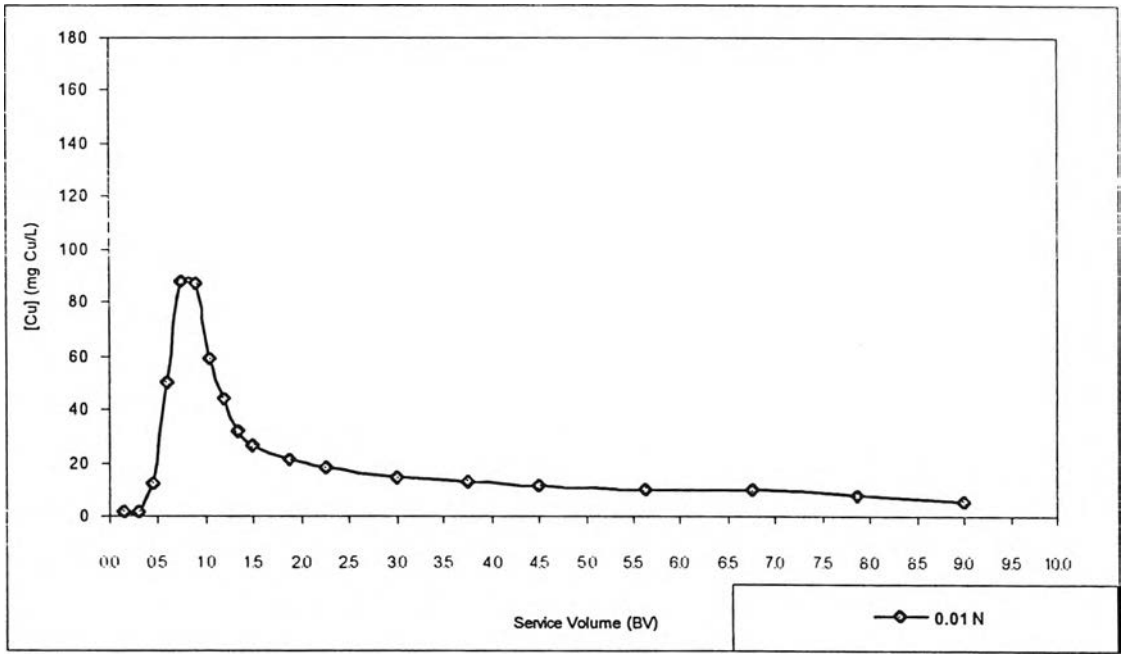
รูปที่ 5.19 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.001

ตารางที่ 5.10 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ

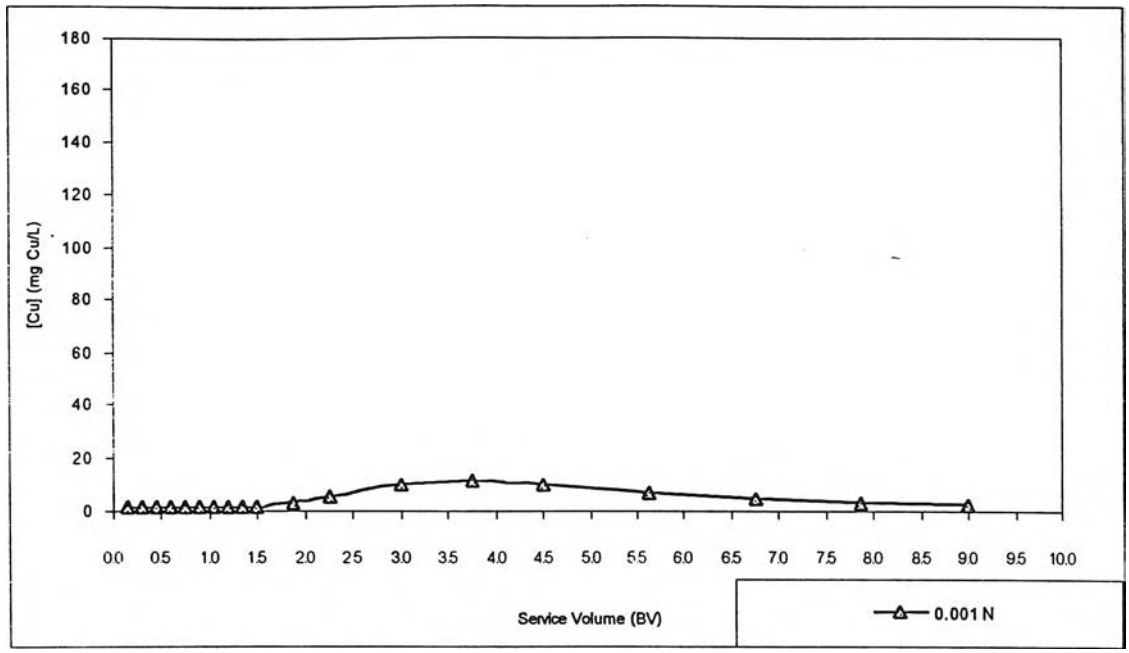
Inlet Copper 20 mg Cu/L, pH 6 , Service Flow Rate 2 BV/hr		
Regenerant Concentration	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on IOCS (mg Cu/L IOCS)
H_2SO_4 0.1 N	5.61	111
H_2SO_4 0.01 N	5.59	111
H_2SO_4 0.001 N	5.63	110



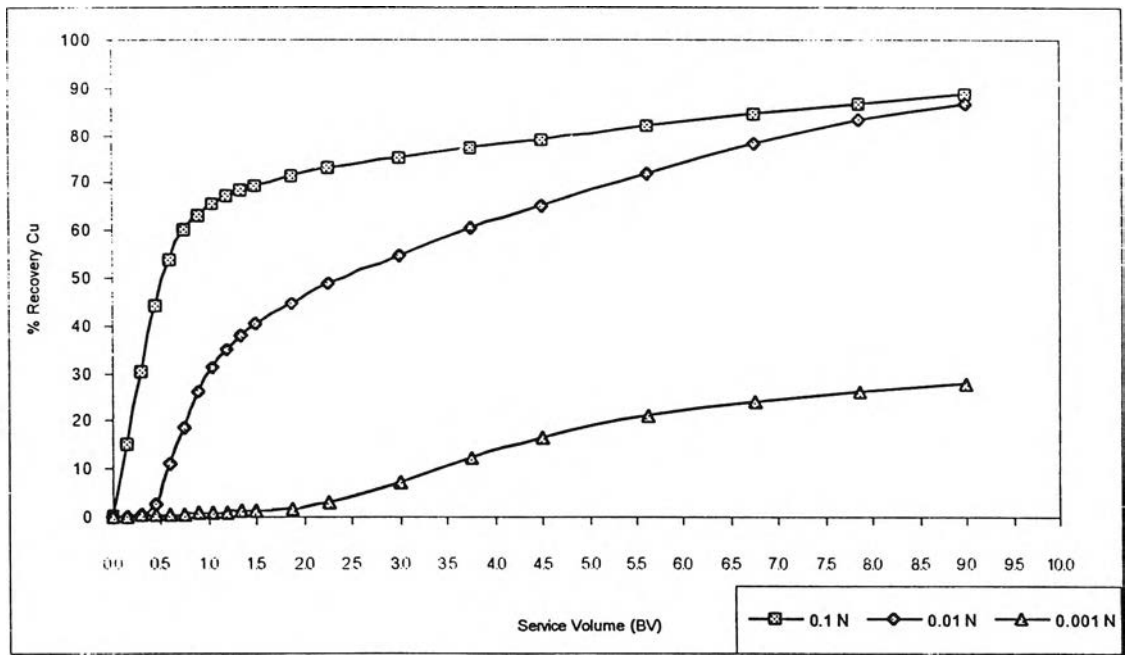
รูปที่ 5.20 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 N



รูปที่ 5.20 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.01 N



รูปที่ 5.20 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.001 N



รูปที่ 5.21 เปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ

เมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรดซัลฟุริคที่ใช้ไปกับเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงดังรูปที่ 5.22 พบว่าเมื่อรีเจนเนอเรชันด้วยกรดซัลฟุริค 0.01 นอร์มัล จะมีสัดส่วนปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรดซัลฟุริคที่ใช้ไปมากกว่าเมื่อทำการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดซัลฟุริค 0.1 นอร์มัล

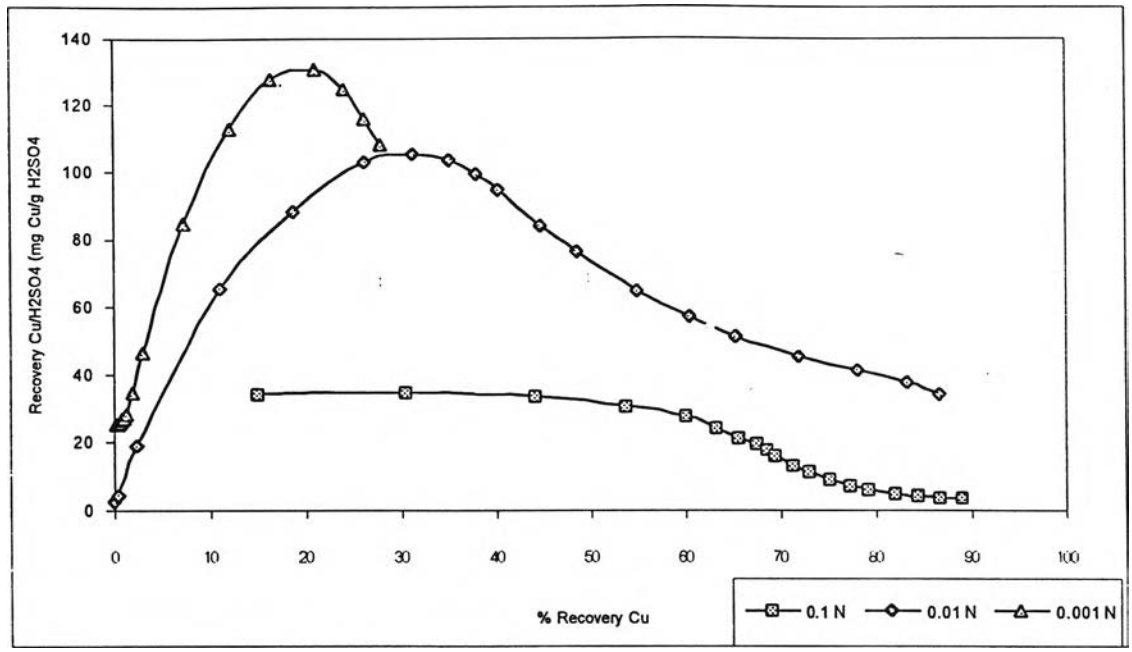
เมื่อพิจารณาความเข้มข้นเหล็กในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเจนเนอเรชันดังรูปที่ 5.23 พบว่าเมื่อใช้กรด 0.1 นอร์มัล ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเจนเนอเรชันมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มต้น แต่เมื่อใช้กรด 0.01 นอร์มัล เหล็กจะละลายออกมาที่การนำกลับทองแดงร้อยละ 48.59

ดังนั้นความเข้มข้นของกรดซัลฟุริคที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงคือ 0.01 นอร์มัล เนื่องจากมีสัดส่วนปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรดที่ใช้ไปสูงและสามารถนำกลับทองแดงได้มากถึงร้อยละ 48.59 โดยที่ไม่มีเหล็กที่เคลือบบนผิวทรายละลายออกมาปนเปื้อนกับทองแดง จึงใช้เวลาในการรีเจนเนอเรชันไม่เกิน 30 นาที เมื่อใช้กรดซัลฟุริคเข้มข้น 0.01 นอร์มัล ในการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr

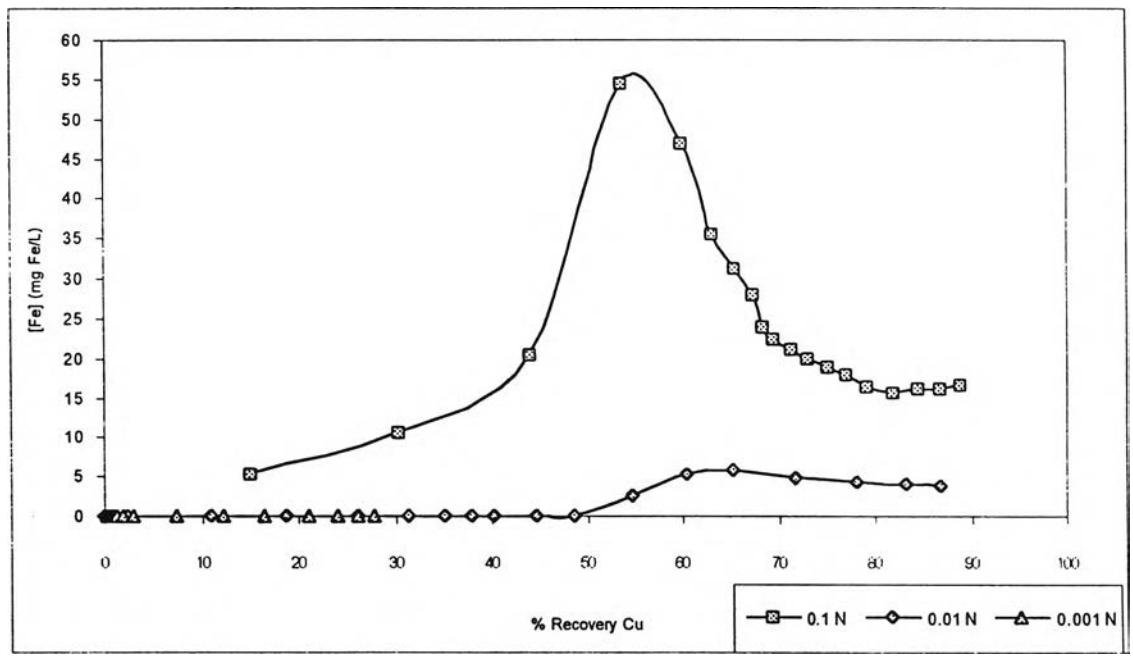
เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดซัลฟุริคความเข้มข้นต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.24 พบว่าที่ความเข้มข้นกรดซัลฟุริค 0.1 นอร์มัล ค่าพีเอชในน้ำออกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและมีค่าคงที่ประมาณ 1.2 เมื่อใช้กรดซัลฟุริคไปประมาณ 1.20 BV ความเข้มข้นกรดซัลฟุริค 0.01 นอร์มัล ค่าพีเอชในน้ำออกจะมีค่าค่อยๆลดลงและมีค่าคงที่ประมาณ 2.3 เมื่อใช้กรดซัลฟุริคไปประมาณ 6.75 BV ความเข้มข้นกรดซัลฟุริค 0.001 นอร์มัล ค่าพีเอชในน้ำออกจะมีค่าค่อยๆลดลงและมีค่าคงที่ประมาณ 4.8 เมื่อใช้กรดซัลฟุริคไปประมาณ 6.75 BV

5.3.4 การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

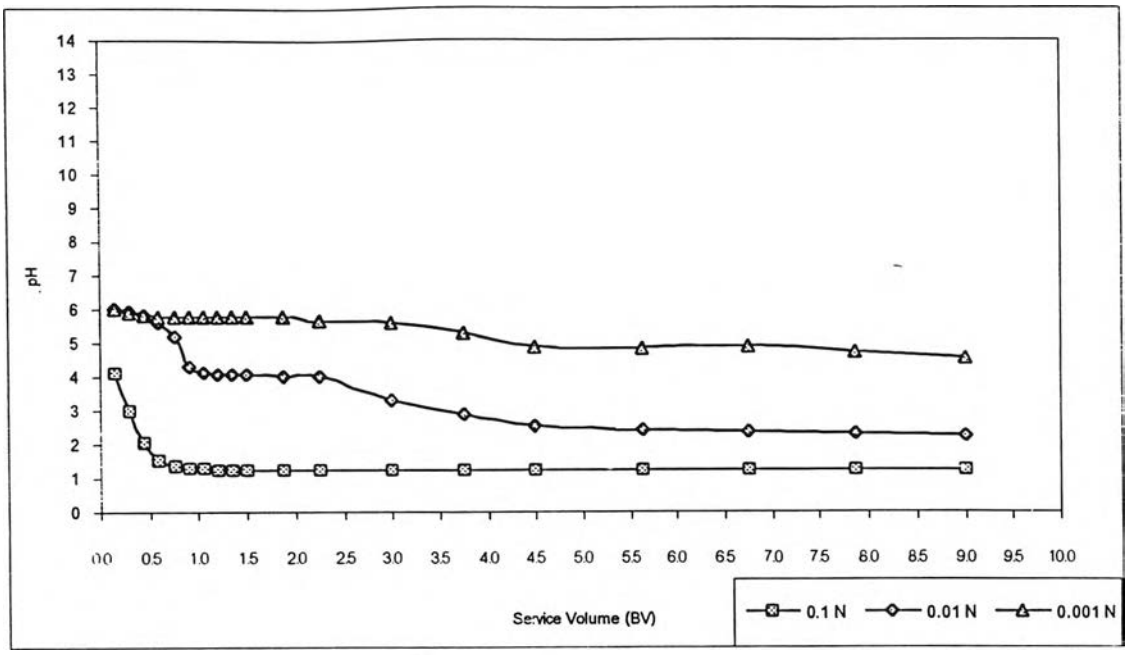
การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงได้ทำการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 โดยใช้อัตราการไหล 2 BV/hr ซึ่งเป็นค่าพีเอชและอัตราไหลที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองที่ผ่านมา ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทำการบำบัดจนได้น้ำที่ผ่านการบำบัด 18.00 BV จากนั้นทำการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดซัลฟุริคความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ผ่านมา และแปรค่าอัตราการรีเจนเนอเรชันเป็น 3, 4.5 และ 6 BV/hr



รูปที่ 5.22 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรด H_2SO_4 ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 5.23 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 5.24 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ

ค่าความเข้มข้นทองแดงในน้ำออกที่ผ่านการบำบัดที่อัตราไหล 2 BV/hr ก่อนที่จะมีการรีเจนเนอเรชันด้วยความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชันต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.25 ก. ถึง 5.25 ค. พบว่าการกำจัดทองแดงมีลักษณะใกล้เคียงกันได้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดและปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ใกล้เคียงกันสรุปได้ดังตาราง 5.11

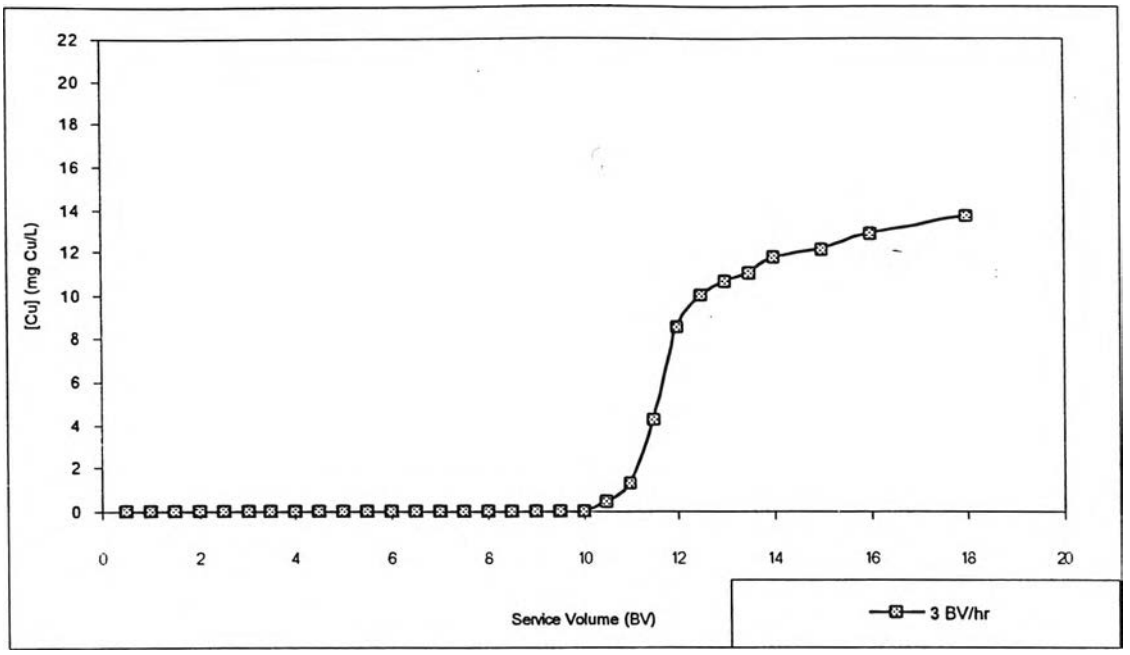
ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรดซัลฟุริคเข้มข้น 0.01 นอร์มัล ที่อัตราการรีเจนเนอเรชัน 3, 4.5 และ 6 BV/hr แสดงดังรูปที่ 5.26 ก. ถึง 5.26 ค. และ รูปที่ 5.27 พบว่าที่อัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr จะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 74.31 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง มีการนำกลับทองแดงออกมาสูงในช่วงเริ่มต้นถึง 2.00 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลง เมื่อใช้อัตราการรีเจนเนอเรชันเป็น 4.5 BV/hr จะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 88.72 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง มีการนำกลับทองแดงออกมาสูงในช่วงเริ่มต้นถึง 1.35 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลง และเมื่อใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr จะนำกลับทองแดงได้ร้อยละ 95.32 ภายในเวลา 2 ชั่วโมง มีการนำกลับทองแดงออกมาสูงในช่วงเริ่มต้นถึง 1.40 BV จากนั้นการนำกลับทองแดงจะลดลง

เมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรดซัลฟุริคที่ใช้ไปกับเปอร์เซ็นการนำกลับทองแดง แสดงดังรูปที่ 5.28 พบว่าที่การนำกลับทองแดงมากกว่าร้อยละ 35 การนำกลับทองแดงด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 และ 6 BV/hr มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมากกว่าการนำกลับทองแดงด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr

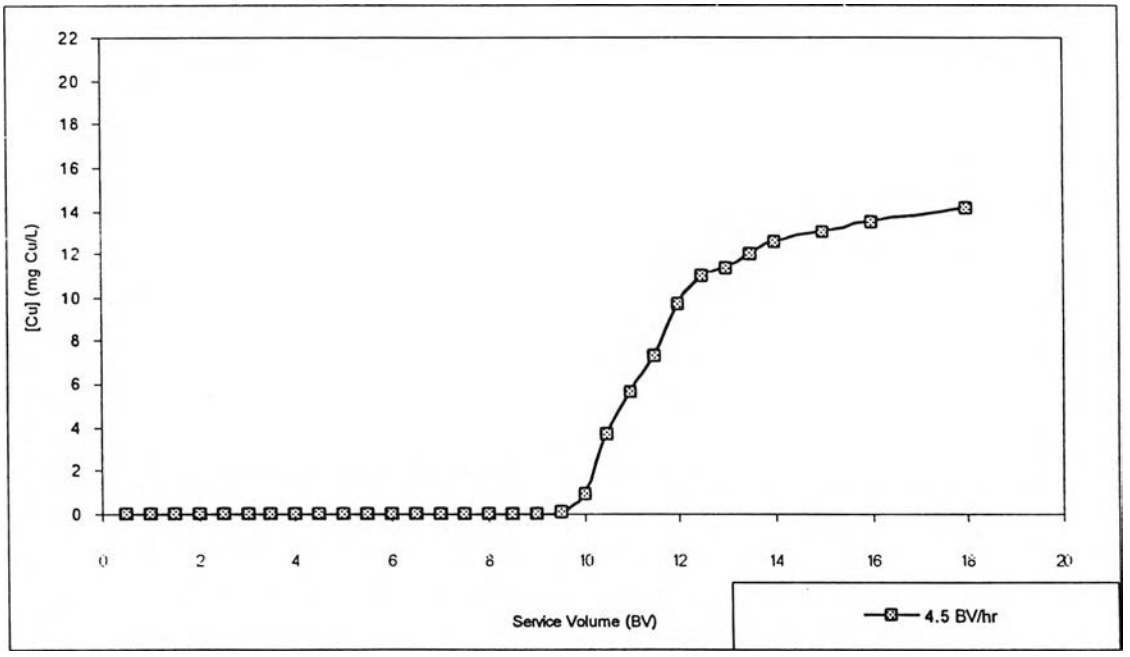
เมื่อพิจารณาความเข้มข้นเหล็กในน้ำที่ผ่านกระบวนการรีเจนเนอเรชันดังรูปที่ 5.29 พบว่าเมื่อใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr เหล็กจะละลายออกมาที่การนำกลับร้อยละ 42.79 เมื่อใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr เหล็กจะละลายออกมาที่การนำกลับร้อยละ 50.43 เมื่อใช้อัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr เหล็กจะละลายออกมาที่การนำกลับร้อยละ 41.23

ดังนั้นอัตราการรีเจนเนอเรชันที่เหมาะสมในการนำกลับทองแดงคือ 4.5 BV/hr เนื่องจากมีสัดส่วนปริมาณทองแดงที่นำกลับต่อปริมาณกรดซัลฟุริคที่ใช้ไปสูง และสามารถนำกลับทองแดงได้มากถึงร้อยละ 50.43 หรือประมาณ 120 มก.ทองแดง/ล.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยที่ไม่มีเหล็กที่เคลือบบนผิวทรายละลายออกมาปนเปื้อนกับทองแดงที่นำกลับจึงควรใช้เวลาในการรีเจนเนอเรชันไม่เกิน 30 นาที เมื่อใช้ความเข้มข้นกรดในการรีเจนเนอเรชัน 0.01 นอร์มัล

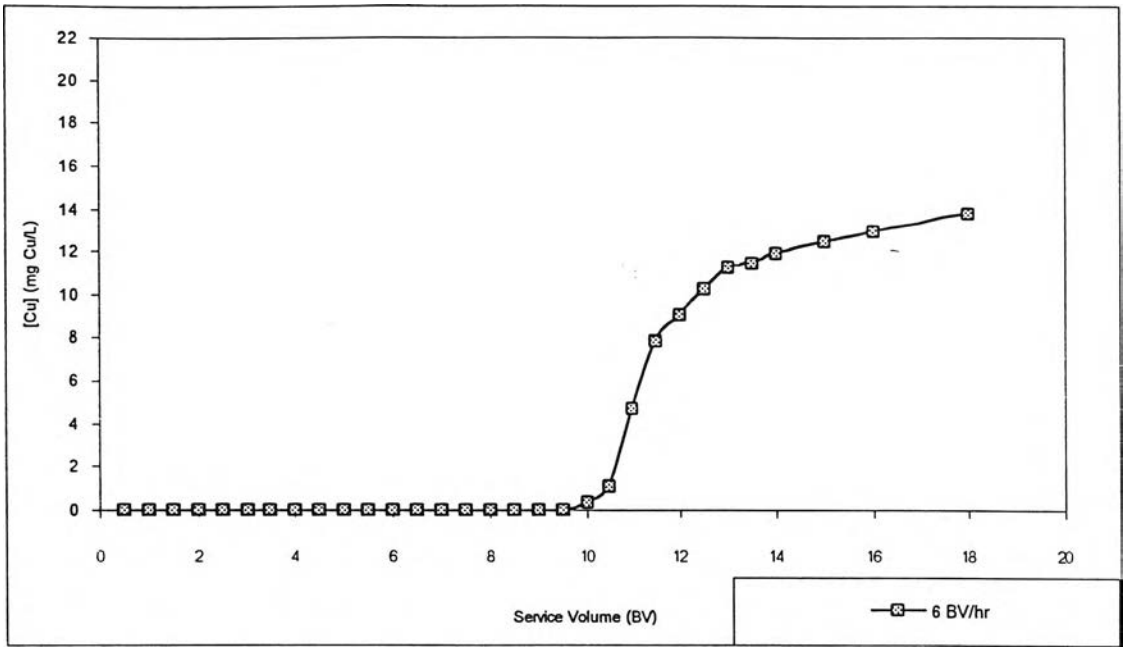
เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 5.30 พบว่าพีเอชในน้ำออกที่เกิดจากทุกๆอัตราการรีเจนเนอเรชันจะมีค่าลดลงและคงที่ประมาณ 2.2 เมื่อใช้กรดซัลฟุริคไปประมาณ 5.63 BV



รูปที่ 5.25 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr



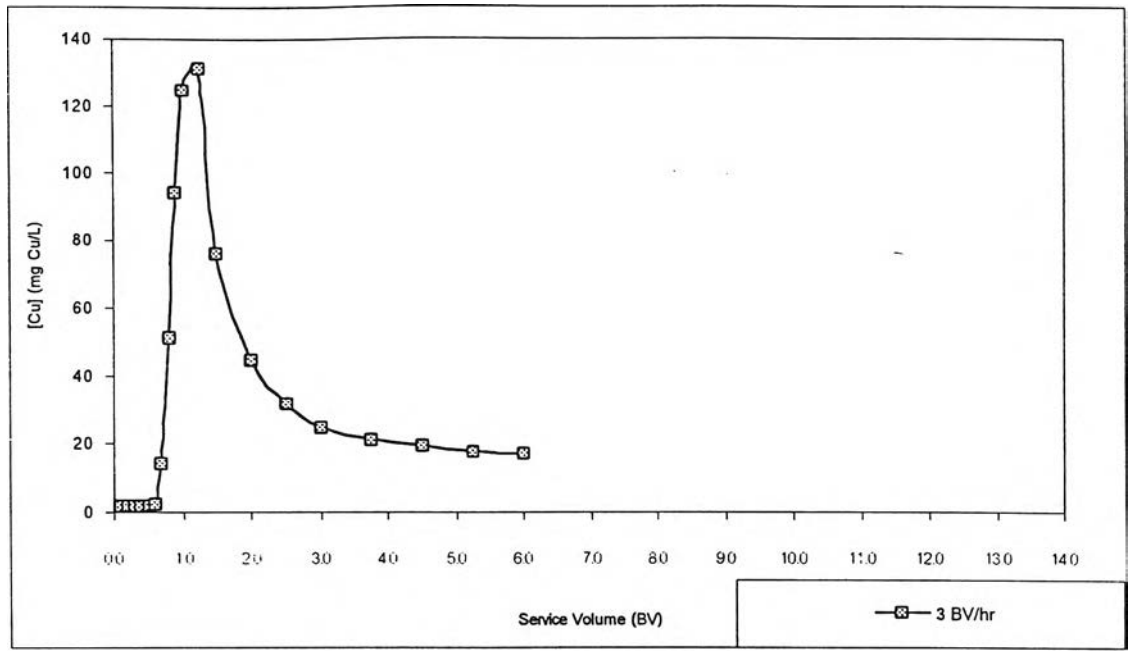
รูปที่ 5.25 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr



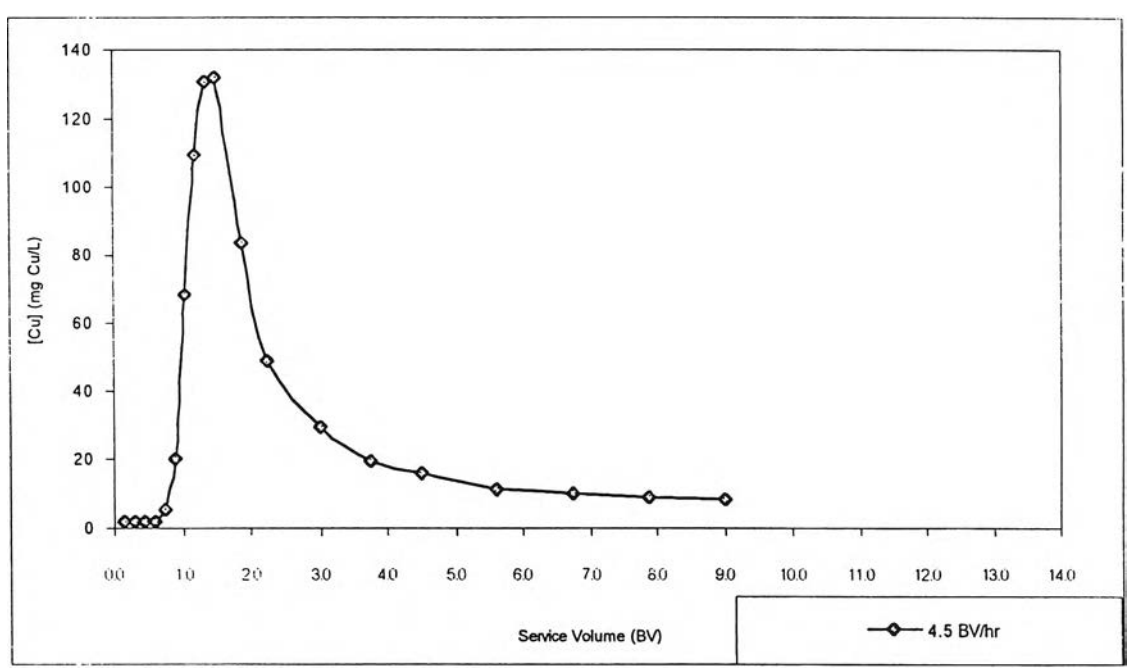
รูปที่ 5.25 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr

ตารางที่ 5.11 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ

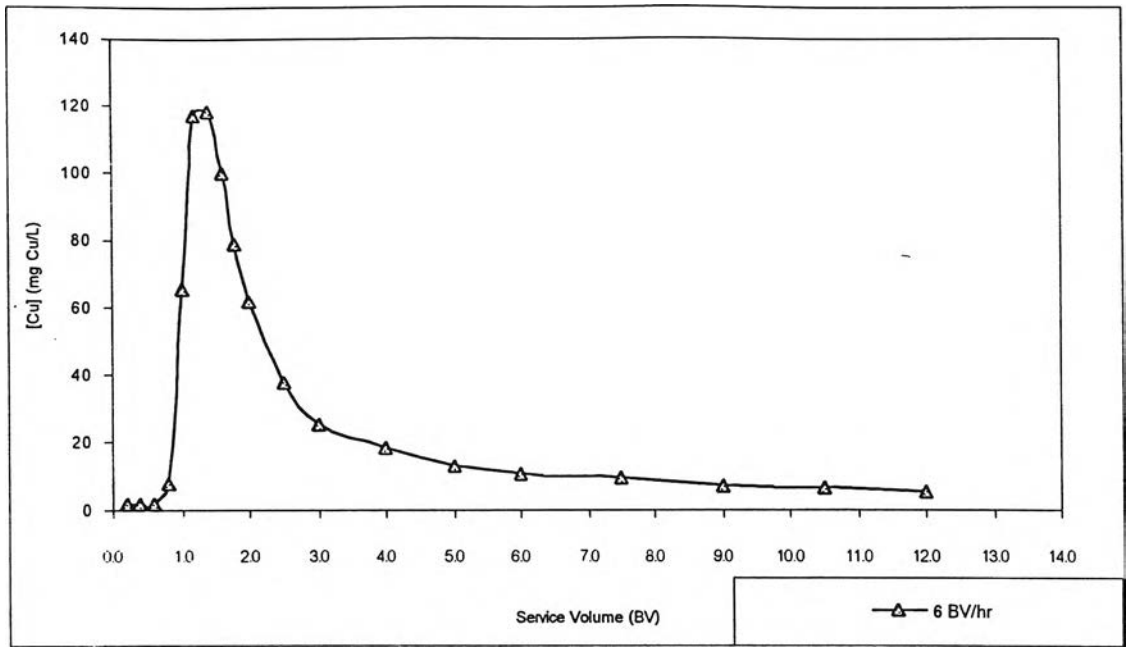
Inlet Copper 20 mg Cu/L, pH 6, Service Flow Rate 2 BV/hr		
Regeneration Flow Rate (BV/hr)	Service Volume (BV)	Cumulative Cu on IOCS (mg Cu/L IOCS)
3	11.12	219
4.5	10.19	197
6	10.62	204



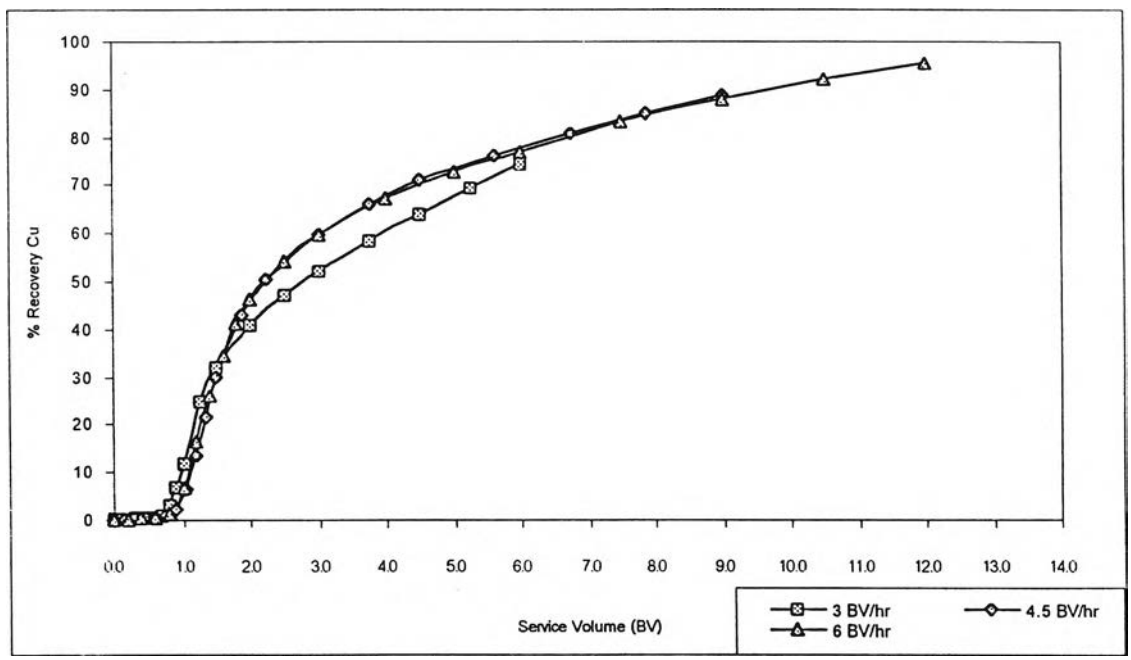
รูปที่ 5.26 ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr



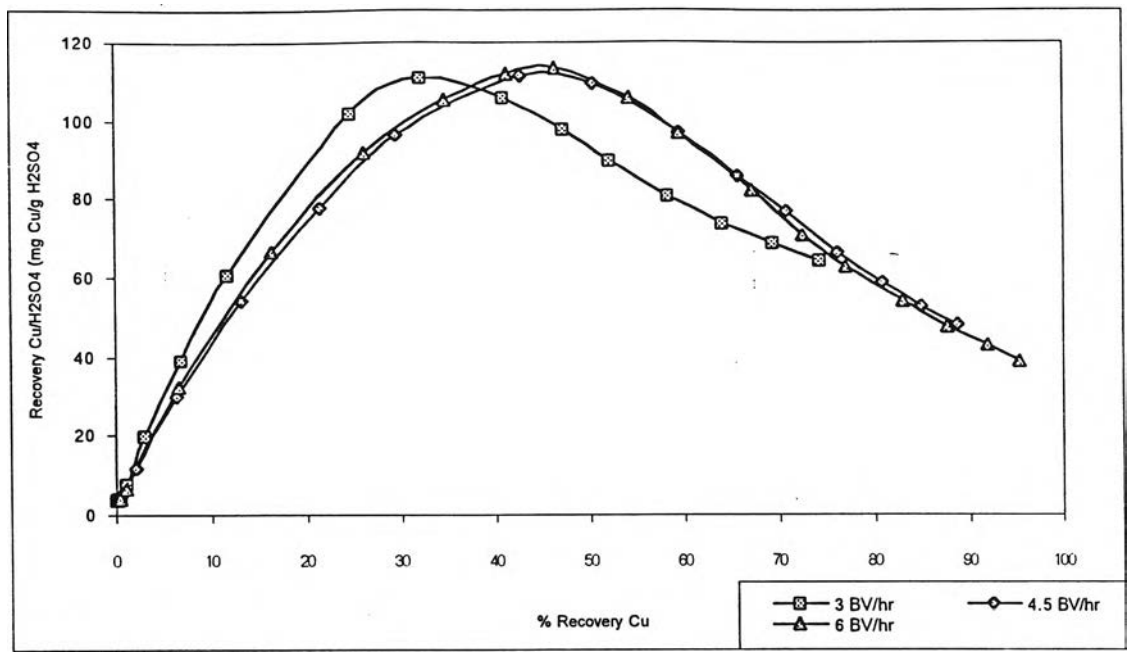
รูปที่ 5.26 ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr



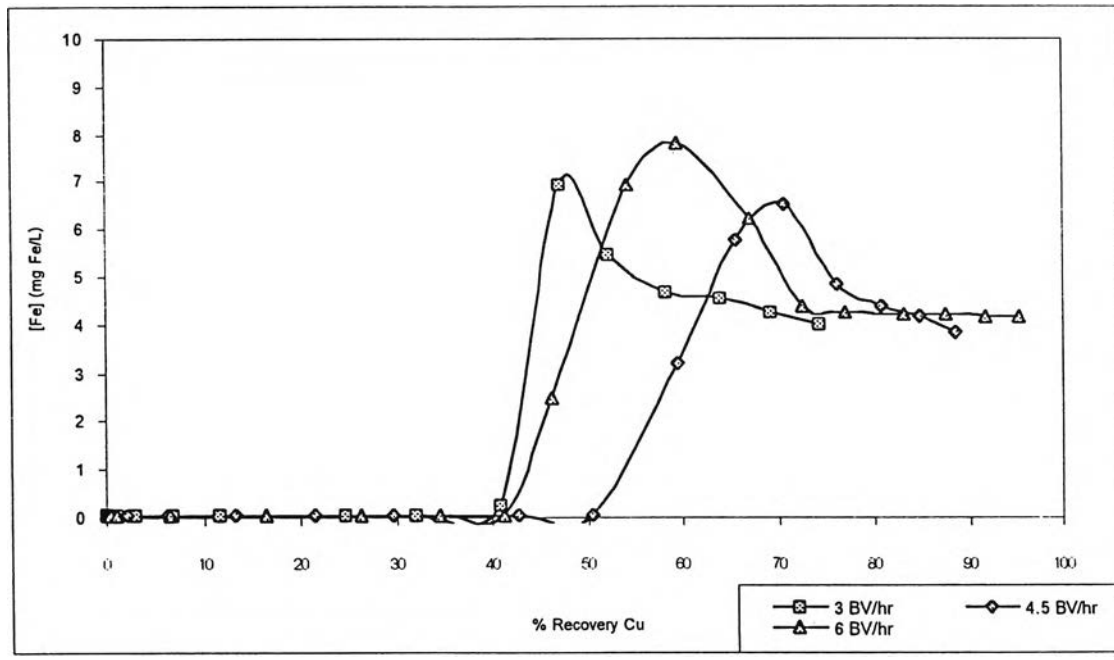
รูปที่ 5.26 ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr



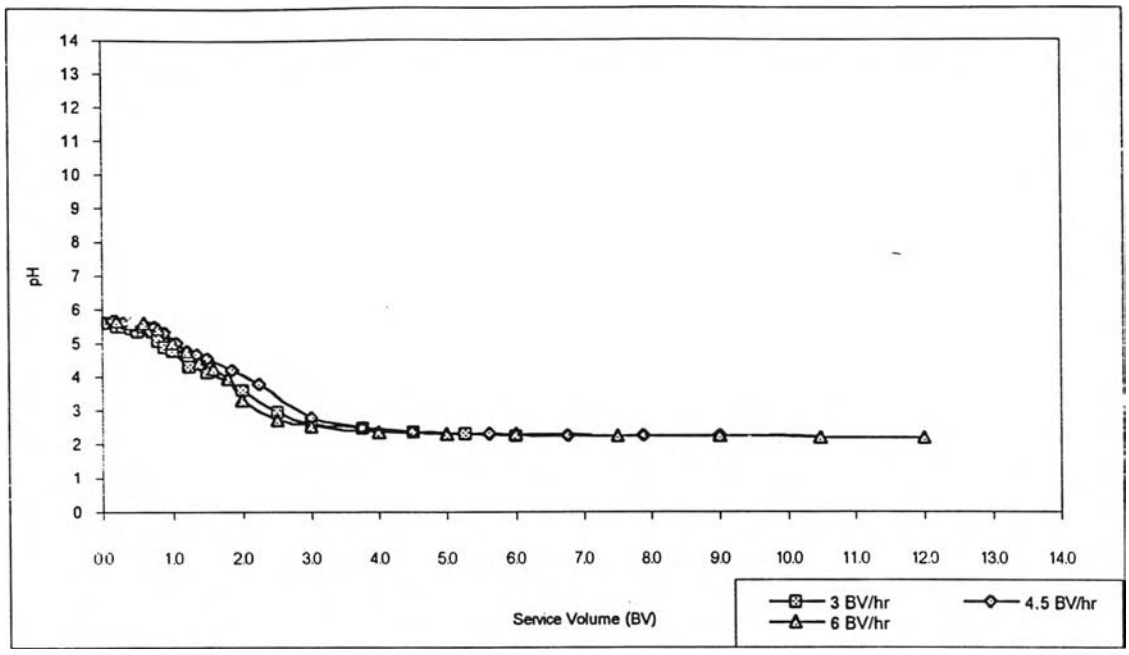
รูปที่ 5.27 เปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ



รูปที่ 5.28 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรด H_2SO_4 ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ



รูปที่ 5.29 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ



รูปที่ 5.30 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ

สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นทองแดง 20 มก.ทองแดง/ล. ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ พบว่าอัตราไหลที่เหมาะสมคือ 2 BV/hr ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมคือ 6 สามารถบำบัดน้ำเสียให้ผ่านมาตรฐานความเข้มข้นของทองแดงไม่เกิน 2 มก.ทองแดง/ล. ประมาณ 9.97 BV ปริมาณทองแดงที่แลกเปลี่ยนได้ประมาณ 198 มก.ทองแดง/ล.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ และสภาวะที่เหมาะสมในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่จากการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพพบว่า ความเข้มข้นของกรดซัลฟุริคที่เหมาะสมคือ 0.01 นอร์มัล อัตราการรีเจนเนอเรชันที่เหมาะสมคือ 4.5 BV/hr ใช้เวลาในการรีเจนเนอเรชันประมาณ 30 นาที จะสามารถนำกลับทองแดงได้ประมาณร้อยละ 50 หรือ 120 มก.ทองแดง/ล.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

5.4 การประมาณค่าใช้จ่าย

5.4.1 ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การคำนวณค่าใช้จ่าย คิดการบำบัดปริมาณน้ำเสีย 1 ลบ.ม.

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

= ค่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย – มูลค่าสารเคมีที่นำกลับได้

= (ค่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน + ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป) – (มูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้ + มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้)

1) ค่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนราคา 200 บาท/ล.เรซิน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 1 BV หรือ 0.153 ล. สามารถบำบัดน้ำเสียทองแดงเชิงซ้อนความเข้มข้น 20 มก.ทองแดง/ล. ได้ 288 BV หรือ 44.064×10^{-3} ลบ.ม.

ค่าเรซินในการบำบัดน้ำเสีย = $0.153 \times 200 / (44.064 \times 10^{-3})$ = 694 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

2) ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน

ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการนำกลับทองแดงด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการรีเจนเนอเรชันที่เหมาะสม 4.5 BV/hr ใช้เวลารีเจนเนอเรชัน 60 นาที

โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิด Commercial Grade ราคา 35 บาท/กก.

โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คิดเป็นราคา = 35 X 60 / 1000 = 2.1 บาท/ล.โซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ใช้นำกลับทองแดงคือ 4.5 BV หรือ 688.5 มล.

ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 688.5 มล. คิดเป็นราคา = 688.5 X 2.1 / 1000 = 1.4 บาท

ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียคิดเป็นราคา

= 1.4 / (44.064 X 10^{-3}) = 32 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

3) มูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้

เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบในการเตรียมน้ำยาชุบโลหะทองแดงทางเคมี ดังนั้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการนำกลับทองแดงจึงสามารถนำกลับมาใช้เป็นส่วนประกอบในน้ำยาชุบได้ ดังนั้นจึงเทียบมูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับให้มีมูลค่าเท่ากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมน้ำยาชุบ

มูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้ = 32 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

4) มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้

เรซินนำกลับทองแดงได้ 5757 มก.ทองแดง/ล.เรซิน

เรซิน 0.153 ล. นำกลับทองแดงได้ 0.153 X 5757 X 10^{-6}= 880.82 X 10^{-6}กก.ทองแดง

ทองแดงที่นำกลับได้ = 880.82 X 10^{-6} / (44.064 X 10^{-3}) = 2 X 10^{-2} กก.ทองแดง/ลบ.ม.น้ำเสีย

เมื่อนำทองแดงที่นำกลับได้ไปใช้ในกระบวนการชุบโลหะทางเคมีซึ่งโดยปกติต้องเตรียมจาก $CuSO_4.5H_2O$ ดังนั้นจึงเทียบมูลค่าทองแดงที่นำกลับได้ให้มีมูลค่าเท่ากับ $CuSO_4.5H_2O$

ทองแดง 2 X 10^{-2} กก. เตรียมจาก $CuSO_4.5H_2O$ = 2 X 10^{-2} X 249.68 / 63.546

= 7.8 X 10^{-2} กก.

$CuSO_4.5H_2O$ ชนิด Commercial Grade ราคา 60 บาท/กก.

ดังนั้นมูลค่าทองแดงที่นำกลับได้ = 7.8 X 10^{-2} X 60 = 4.7 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

= (ค่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน + ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป) – (มูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้ + มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้)

= 694 + 32 – 32 – 4.7 = 689 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

เนื่องจากเรซินมีอายุการใช้งานประมาณ 2 ปี ดังนั้นการคำนวณค่าใช้จ่ายคิดต่อการบำบัดน้ำเสียใน 1 ปี

สมมติโรงงานทำงาน 6 วันต่อสัปดาห์

ดังนั้นคิดเป็นจำนวนรอบการบำบัด = 52 X 6 X 24 / 24 = 312 รอบ / ปี

1) ค่าเสื่อมสภาพของเรซิน = 694 / 2 = 347 บาท/ปี

2) ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 32 X 312 = 9984 บาท/ปี

3) มูลค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้ = 9984 บาท/ปี

4) มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้ = 4.7 X 312 = 1466 บาท/ปี

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

= 347 + 9984 – 9984 – 1466 = - 1119 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

ดังนั้นผลการดำเนินงานบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม./รอบ ในระยะเวลา 1 ปี โดยมีการนำกลับทองแดงและด่างจะได้ผลตอบแทนประมาณ 1119 บาท/ปี

ทองแดงและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่นำกลับได้หากจะนำกลับมาใช้เป็นน้ำยาชุบใหม่อีกครั้งจะต้องมีการปรับปรุงความเข้มข้นและคุณสมบัติให้เหมือนน้ำยาชุบเสียก่อน

5.4.2 ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

การคำนวณค่าใช้จ่าย คิดการบำบัดปริมาณน้ำเสีย 1 ลบ.ม.

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

= ค่าสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย – มูลค่าสารเคมีที่นำกลับได้

= (ค่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ + ค่ากรดซัลฟุริคที่ใช้ไป) – (มูลค่ากรดซัลฟุริคที่นำกลับได้ + มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้)

1) ค่าเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กก.

ทรายละเอียดราคา ลบ.ม. ละ 300 บาท คิดเป็น 180 บาท/ตัน

เฟอร์ริคไนเตรท ($Fe(NO_3)_3.9H_2O$) ชนิด Lab Grade ราคา 500 บาท/กก.

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กก. ใช้เฟอร์ริคไนเตรท 0.1 กก. คิดเป็นราคา

= 0.1 X 500 = 50 บาท

ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 กก. คิดเป็นราคา

= (180 / 1000) + 50 = 50.20 บาท/กก.ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 1 BV หรือ 0.153 ล. หรือ = 243 X 10^{-3} กก.สามารถกำจัดน้ำเสียทองแดงความเข้มข้น 20 มก.ทองแดง/ล. ได้ 9.97 BV หรือ 1.525 X 10^{-3} ลบ.ม.

ค่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียคิดเป็นราคา

= 243 X 10^{-3} X 50.20 / (1.525 X 10^{-3}) = 7996 บาท/ลบ.ม.น้ำเสีย

จากการคำนวณพบว่าค่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียมีราคาสูงมากโดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เป็นค่าเฟอริคไนเตรทซึ่งใช้ในขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ เนื่องจากเฟอริคไนเตรทชนิด Commercial Grade หาได้ยากในประเทศดังนั้นการใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียจึงยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง

ตารางที่ 5.12 สรุปค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์

	เรซินแลกเปลี่ยนไอออน	ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
อัตราการไหลในการบำบัดน้ำเสีย (BV/hr)	20	2
โลหะหนักในน้ำเสีย	ทองแดงเชิงซ้อน	ทองแดง
พีเอช	ไม่ต้องปรับ (ประมาณ 10)	6
ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสีย (hr)	14.4	5
ความสามารถในการบำบัดน้ำเสีย (m^3/L_{media})	0.29	0.01
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนทองแดง (mgCu/ L_{media})	5691	198
ค่าตัวกลางสำหรับบำบัดน้ำเสีย (baht/m^3)	694	7996
อัตราการรีเจนเนอเรชัน (BV/hr)	4.5	4.5
สารรีเจนเนอแรนท์	NaOH 6%	H_2SO_4 0.01 N
ระยะเวลาในการรีเจนเนอเรชัน (hr)	60	30
ปริมาณสารรีเจนเนอเรชัน (BV)	4.5	2.25
ค่าสารรีเจนเนอแรนท์ (baht/m^3)	32	-
มูลค่าสารรีเจนเนอแรนท์ที่นำกลับได้ (baht/m^3)	32	-
ร้อยละการนำกลับทองแดง	95.71	50
มูลค่าทองแดงที่นำกลับได้ (baht/m^3)	4.7	-
ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย (baht)	-1119	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย "-" หมายถึง ไม่ได้คำนวณเนื่องจากความไม่คุ้มค่าในการบำบัดน้ำเสีย

จากการคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียซึ่งเป็นเพียงส่วนหนึ่งของค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียทั้งหมดเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วค่าใช้จ่ายทั้งหมดจะต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายดังนี้

- ค่าแรงงาน
- ค่าบำรุงรักษา
- ค่าโสหุ้ย
- ค่าเสื่อมราคา
- ภาษีและค่าประกันภัย
- ค่าสารเคมี
- ค่ากำจัดกากของเสียที่เกิดจากการบำบัด
- ค่าสาธารณูปโภค

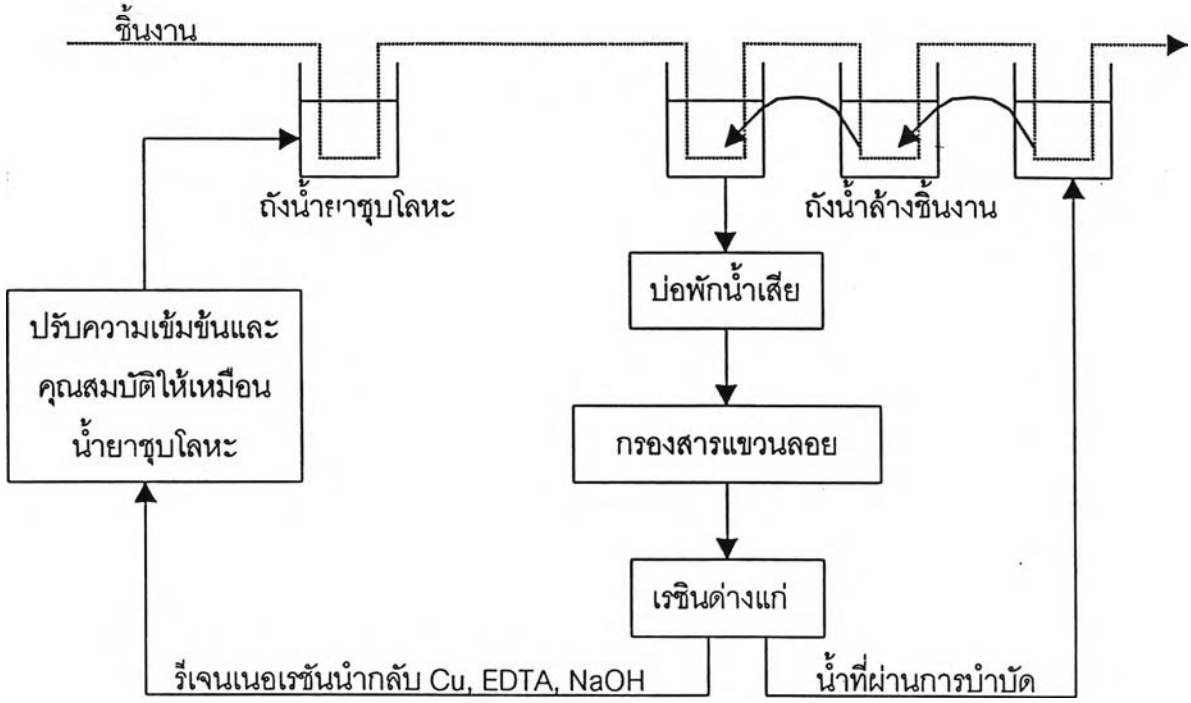
ดังนั้นหากจะนำระบบเรซินแลกเปลี่ยนไอออนไปใช้จริงต้องนำค่าใช้จ่ายต่างๆเหล่านี้มาพิจารณาร่วมด้วย

ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนจากการชุบโลหะทางเคมีด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนพบว่า ผลการดำเนินงานบำบัดน้ำเสีย 1 ลบ.ม.ต่อรอบ ในระยะเวลา 1 ปี จะได้ผลตอบแทน 1119 บาท/ปี โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เป็นค่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดทองแดงจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่าต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงมากในขั้นตอนการเตรียมทรายเคลือบเหล็กออกไซด์โดยค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่เป็นค่าเฟอริคไนเตรท ดังนั้นการใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียจึงยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง

5.5 การประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม

น้ำเสียจากขั้นตอนการล้างชิ้นงานในกระบวนการชุบทองแดงโดยวิธีทางเคมีของการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยสารประกอบทองแดงเชิงซ้อน(Cu-EDTA) ซึ่งจะเป็นปัญหาในการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและเป็นสาเหตุหลักของการสิ้นเปลืองสารเคมีในกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ดังนั้นการใช้เรซินประจุลบ (Anion Resin) กำจัดทองแดงเชิงซ้อนจากขั้นตอนการล้างชิ้นงานในกระบวนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าแทนวิธีการตกตะกอนทางเคมีซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้และยังสามารถนำกลับน้ำ และสารเคมีกลับไปใช้ในกระบวนการได้อีก

รูปที่ 5.31 แสดงการประยุกต์ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า โดยน้ำเสียที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัดจะมาจากขั้นตอนการล้างชิ้นงานถังแรกซึ่งจะมีความเข้มข้นสูงสุด โดยควบคุมให้มีความเข้มข้นประมาณ 20 มก.ทองแดง/ล. ถูกส่งมาเก็บในบ่อพักน้ำเสีย จากนั้นจะถูกส่งไปกรองแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนด้วยอัตราไหล 20 BV/hr น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจะถูกส่งกลับไปยังถังน้ำล้างเพื่อใช้เป็นน้ำล้างชิ้นงาน เมื่อเรซินเริ่มหมดสภาพหรือน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของทองแดงประมาณ 2 มก./ล. จะทำการรีเจนเนอเรชันเพื่อฟื้นอำนาจเรซิน โดยเริ่มจากการล้างย้อนด้วยอัตรา 40 BV/hr นานประมาณ 20 นาที ซึ่งน้ำล้างย้อนนี้จะถูกส่งกลับไปยังถังน้ำล้างเพื่อใช้เป็นน้ำล้างชิ้นงานต่อไป ภายหลังจากการล้างย้อนจะทำการรีเจนเนอเรชันเรซินด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนัก อัตราไหล 4.5 BV/hr นานประมาณ 60 นาที โดยน้ำจากกระบวนการรีเจนเนอเรชันนี้จะประกอบไปด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ทองแดง และ EDTA ที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งจะถูกส่งไปปรับความเข้มข้นและคุณสมบัติให้เหมือนกับน้ำยาชุบเพื่อใช้งานต่อไป ภายหลังจากกระบวนการรีเจนเนอเรชันจะต้องล้างตัวกลางเพื่อล้างสารเคมีออกจากตัวกลางเรซินโดยแบ่งเป็นล้างช้าด้วยอัตรา 4.5 BV/hr นาน 20 นาที และล้างเร็วด้วยอัตรา 20 BV/hr นาน 20 นาทีตามลำดับ โดยน้ำจากการล้างเร็วและล้างช้านี้จะถูกนำกลับไปใช้เป็นน้ำล้างชิ้นงานอีกเช่นกัน เรซินเมื่อหมดอายุการใช้งานจะกลายเป็นของเสียอันตรายซึ่งจะต้องมีการจัดการที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 5.31 การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบำบัดน้ำเสียจากการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า