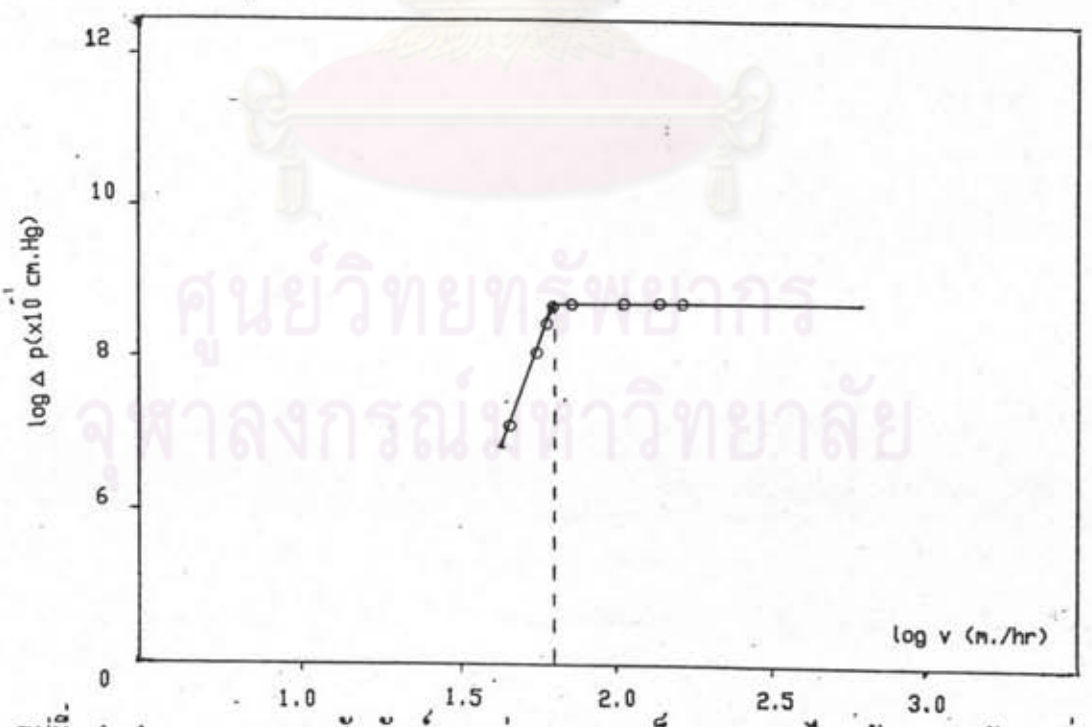
บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 การทดลองหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล

เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหล ขณะไหลผ่านหอทดลองที่บรรจุ ทรายขนาด 0.8 - 1.2 mm ที่ความสูง 1.0 , 1.5 , 2.0 m กับค่าความดันลด

4.1.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหลที่ความสูงเบด 1.0 เมตร ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ทรายเคลื่อนที่เมื่อค่าความดันลดลง แสดงในรูปที่ 4.1

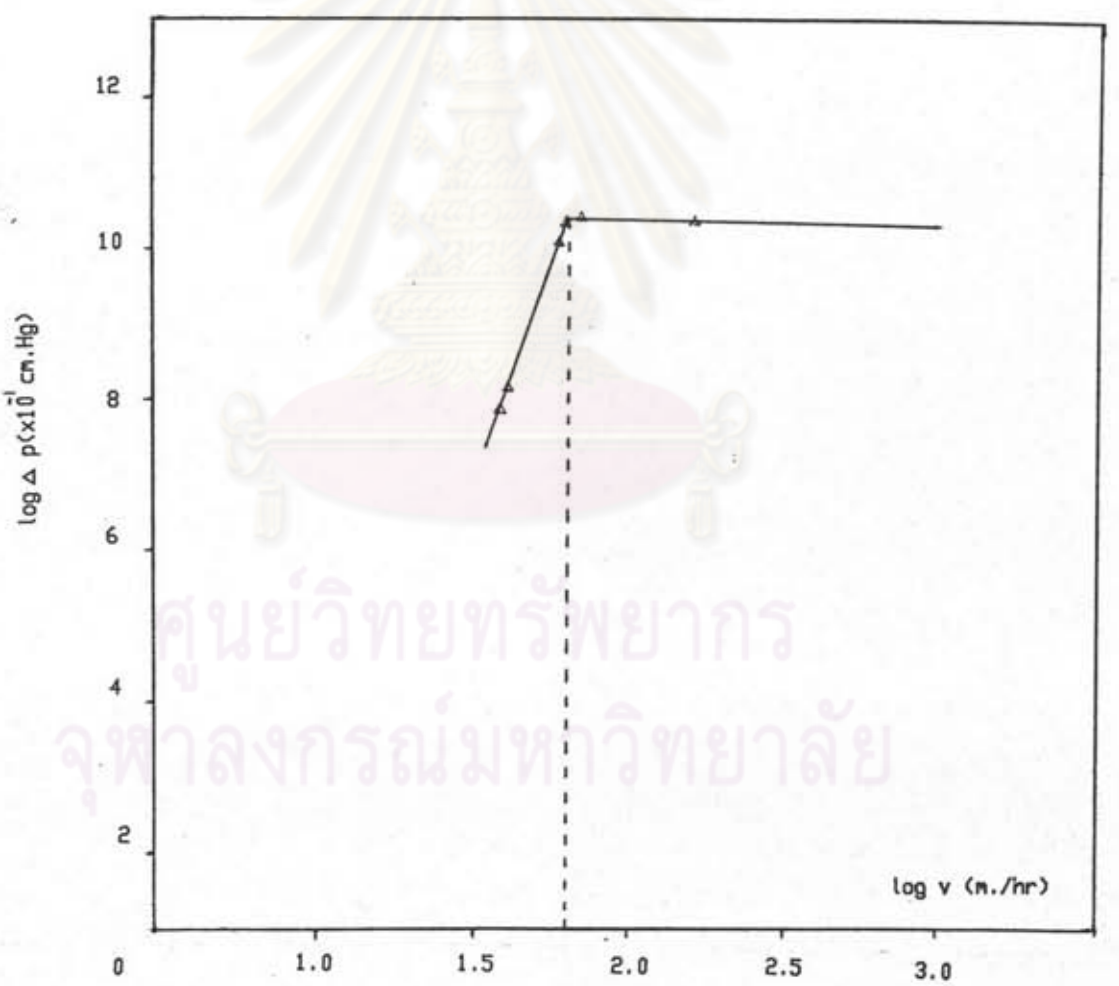


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับความดันลดที่เบด 1 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.1 ความเร็วต่ำสุดคือ 63.60 ม./ชม. แต่ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหลได้ดีที่สุดใช้ความเร็วเป็น 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่หาได้จากการทดลอง ดังนั้น ความเร็วต่ำสุดที่ความสูงของเบด 1 ม. คือ 95.4 ม./ชม. ความดันลด เท่ากับ 7.6 ซม.ปรอท (103 ซม.น้ำ)

4.1.2 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหลที่ความสูง 1.5 เมตร แสดงในรูปที่ 4.2

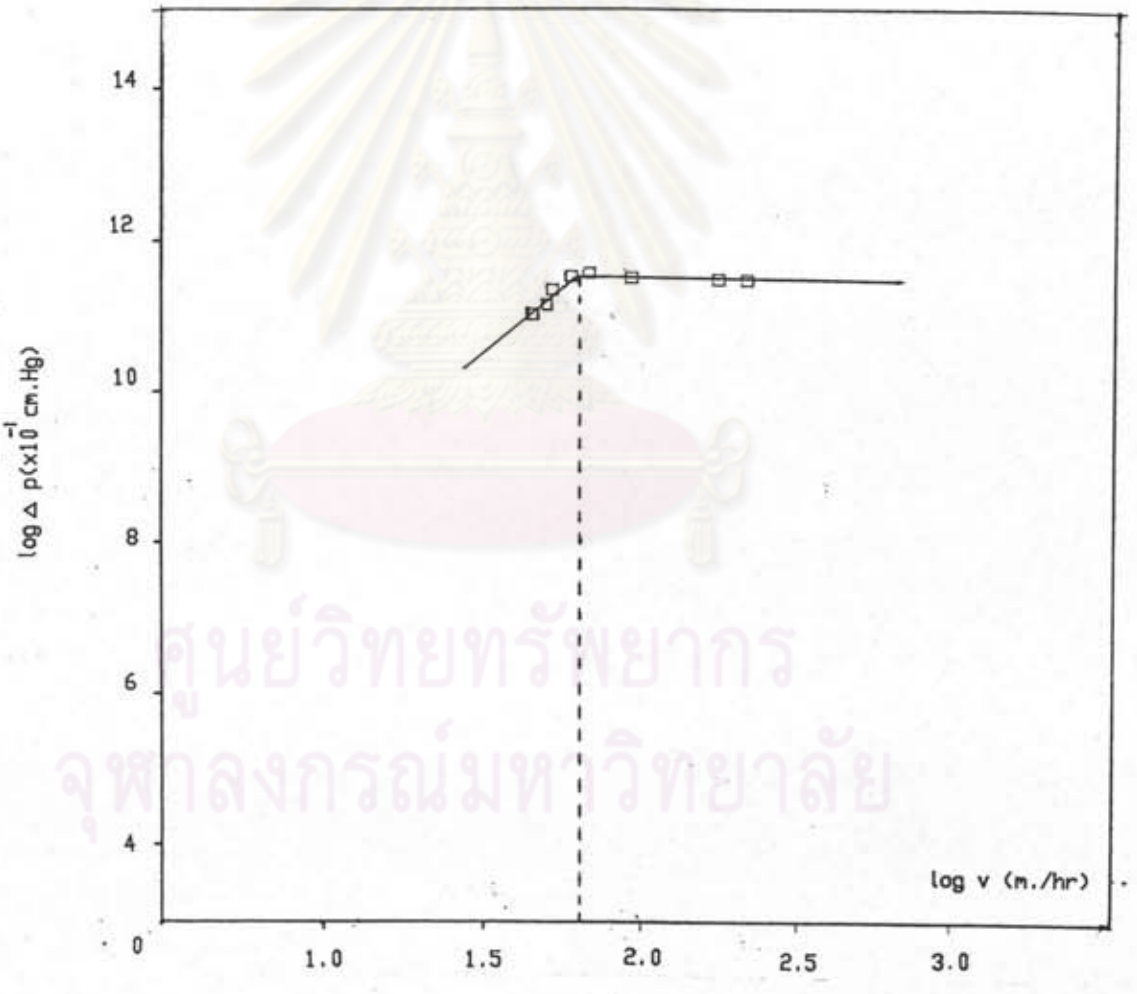


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับความดันลดที่เบด 1.5 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.2 ค่าความเร็วต่ำสุดเมื่อความดันลดเริ่มคงที่ คือ 63.095 ม./ชม. ดังนั้นความเร็วต่ำสุดที่ความสูง 1.5 เมตร คือ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่หาได้จากการทดลองซึ่งเท่ากับ 95 ม./ชม. ความดันลดเท่ากับ 10.6 ซม.ปรอท (143.63 ซม.น้ำ)

4.1.3 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหลที่ความสูง 2.0 เมตร แสดงในรูปที่ 4.3



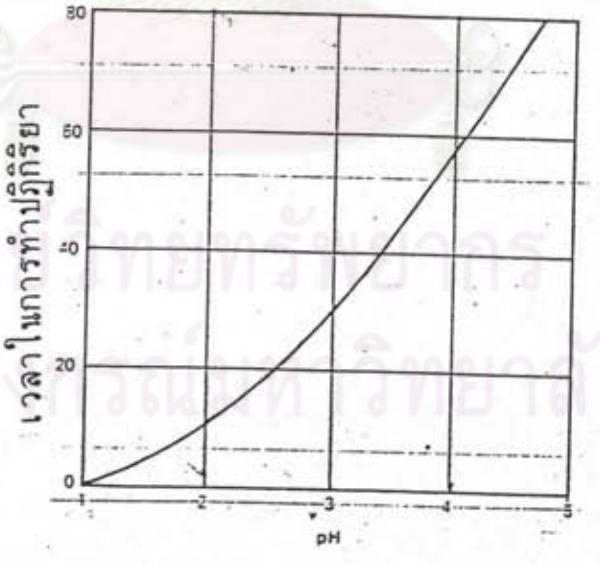
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการไหลกับความดันลดที่เบด 2.0 เมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่4.3 ค่าความเร็วต่ำสุดเมื่อความดันลดเริ่มคงที่คือ 63.095 ม./ชม ดังนั้นความเร็วต่ำสุดที่ใช้ที่ความสูง 2 เมตร คือ 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล ซึ่งเท่ากับ 95 ม./ชม. ความดันลดเท่ากับ 14.4 ซม.ปรอท (195.12 ซม.น้ำ)

4.2 <u>การทดลองรีดิวซ์โครเมียม(VI) เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นโครเมียม (III)</u>

จากการทดลองการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับด้วยกันนั้น จะต้องมีการปรับพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับพีเอช 2 - 3 ด้วยกรดซัลฟูลริค ใช้เวลาในการทำปฏิกริยาเป็นเวลา 20 - 30 นาที ดังรูปที่ 4.4 จากนั้นจึงเติมโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ให้มีจำนวนมากกว่าทฤษฎีถึง 2 เท่า ตามตารางที่ 3.2 ผลการทดลองการรีดิวซ์โครเมียม (VI) ที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับ ที่เบดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4เวลาในการทำปฏิกริยารีดักชั่นของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น

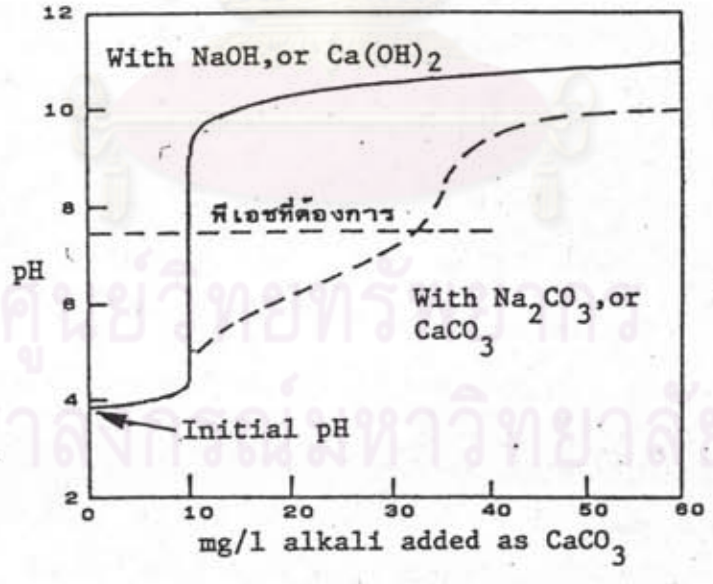
ตารางที่ 4.1 Cr(VI) ที่เหลือหลังจากการรีดิวซ์ด้วยโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ที่พีเอช 2 - 3 ก่อนผ่านความสูงของเบด

ความเข้มข้นโครเมียม มก./ล	ความลูงของเบด (ม.)	พีเอช 8.5	พีเอช 9.0	พีเอช 9.5
		Cr(VI) มก./ล		
5	1.0	0.045	0.025	0.030
	1.5	0.040	0.040	0.050
	2.0	0.030	0.050	0.050
10	1.0	0.050	0.020	0.020
	1.5	0.050	0.040	0.050
	2.0	0.035	0.030	0.020
50	1.0	0.025	0.050	0.040
	1.5	0.050	0.030	0.040
	2.0	0.025	0.030	0.020
100	1.0	0.050	0.040	0.040
	1.5	0.050	0.025	0.035
	2.0	0.050	0.040	0.030
200	1.0	0.050	0.030	0.050
	1.5	0.050	0.050	0.050
	2.0	0.050	0.040	0.025

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การทดลองการกำจัดโครเมียมโดยการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

การทดลองระยะนี้จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารในการปรับพีเอช และทำให้เกิดตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ จับบนผิวเม็ดทรายในหอทดลองที่มีความสูงของเบดต่างๆ กัน การปรับพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีการปรับพีเอชอยู่ 2 ขั้นด้วยกัน เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นด่างแก่ ไม่ได้เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งทำให้การควบคุมพีเอชทำได้ยากมาก จากลักษณะกราฟการไตเตรท ในรูปที่ 4.5 การใช้ด่างอ่อน เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) , โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ทั้งยังเป็นสารบัฟเฟอร์ด้วย จะปรับพีเอชเป็นด่างได้ง่ายกว่า เพราะควบคุมพีเอชได้



รูปที่ 4.5 กราฟการไตเตรทของโซดาแอชหรือหินปูน สามารถปรับพีเอชเป็นด่างได้ง่ายกว่าโซดาไฟหรือปูนขาว

เพื่อความสะดวกในการปรับพีเอชในการทดลองนี้ จึงมีการปรับพีเอชทีละขั้นโดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ

1) ขั้นแรกจะปรับพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีพีเอช 2 - 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้เพิ่มพีเอช 2 - 3 หน่วย คืออยู่ระหว่างพีเอช 5 - 6 เสียก่อน

2) จากน้ำเสียในขั้นตอนที่ 1 จะสูบน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วเข้าสู่หอทดลองเพื่อปรับพีเอชเป็น 8.5 , 9.0 , 9.5 ตามลำดับ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการตกผลึกของโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ ที่ภาวะอิ่มตัวยวดยิ่งบนผิวเม็ดทรายต่อไป

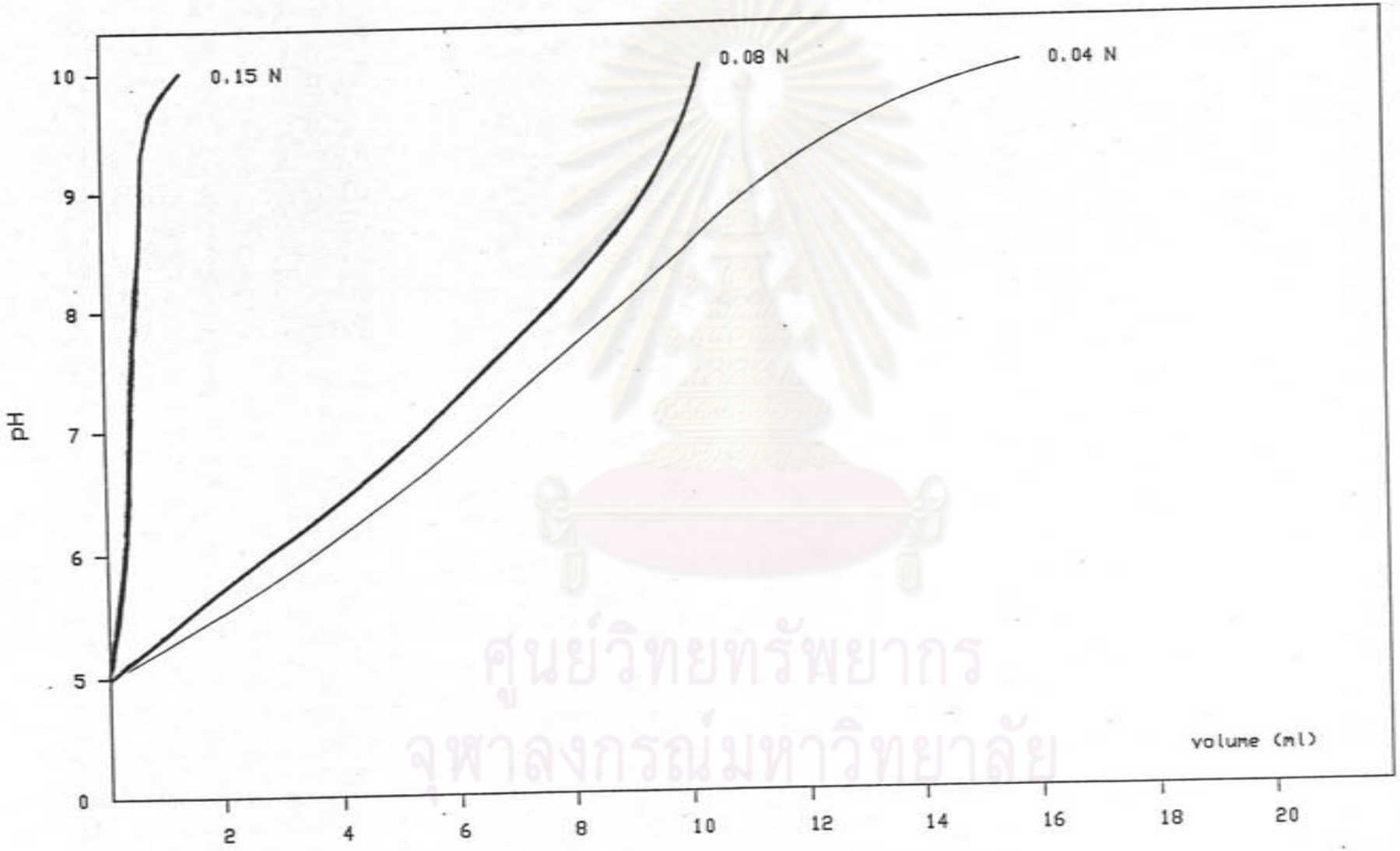
4.3.1 <u>ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทดลอง</u>

เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นด่างแก่ การปรับพีเอชจึงควบคุมได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารละลายเจือจางมาใช้เพื่อให้ปรับพีเอชได้ง่ายขึ้น สำหรับในการทดลองศึกษาปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความเข้มข้นโครเมียมระดับต่างๆแสดงในรูป titration curve เปรียบเทียบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ระดับ จะเห็นว่า

1) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 N titration curve ในช่วงพีเอช 8 -9.5 นั้น กราฟจะมีความชันมาก ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกันน้อยมาก ในการที่จะปรับพีเอช จึงทำให้ยากต่อการควบคุมระบบ

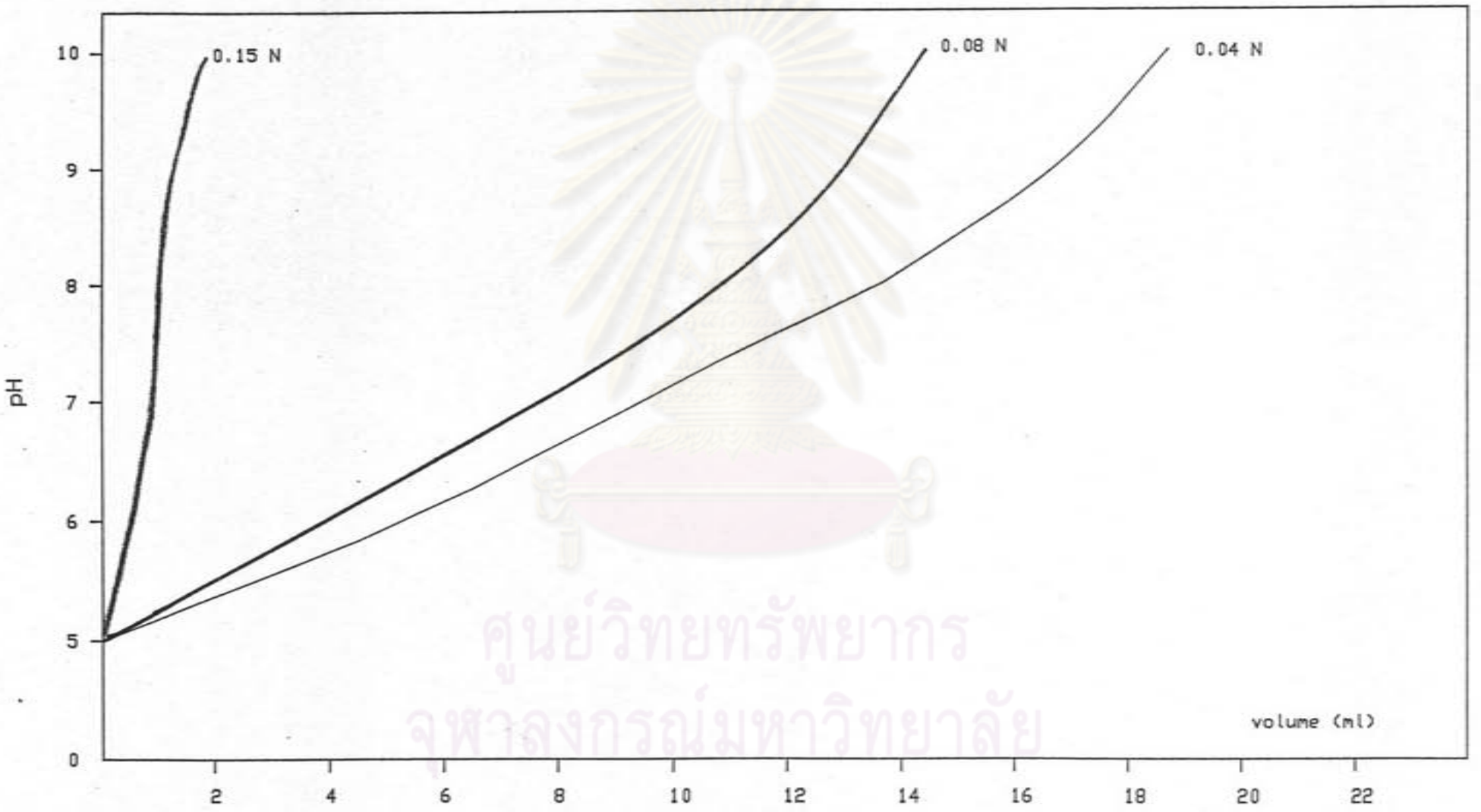
2) ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.08 N titration curve ในช่วงพีเอช 8.5 - 9.5 นั้น ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แตกต่างกันน้อย การปรับพีเอชจึงไม่ดีเท่าที่ควร จึงต้องใช้สารละลายเจือจางลง คือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.04 N

3) ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.04 N titration curve มีความแตกต่างกันมากในช่วงพีเอช 8.5 - 9.5 ทุกระดับของความเข้มข้นโครเมียม การปรับพีเอชจึงง่ายกว่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่กล่าวมา



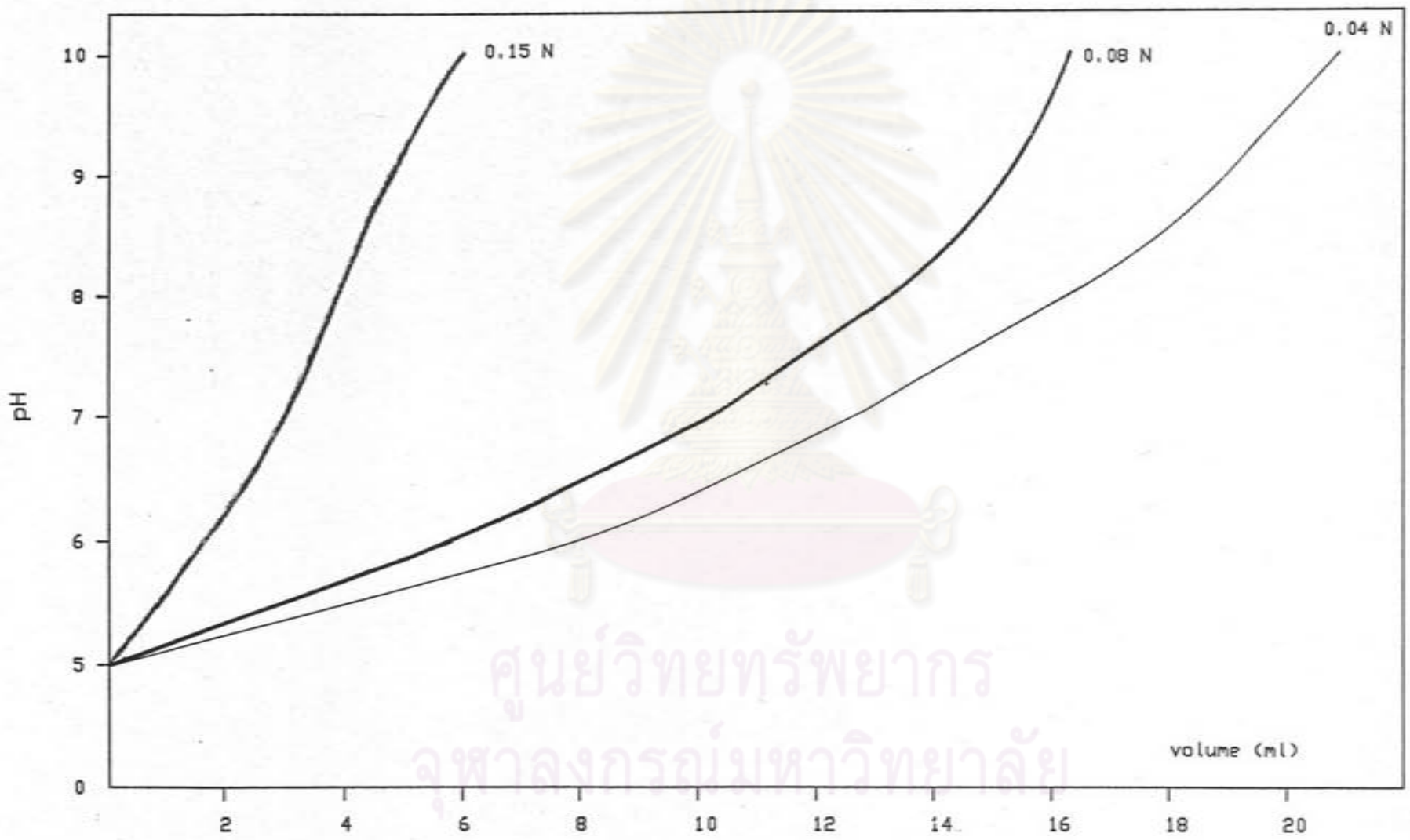
รูปที่ 4.6 กราฟการไตเตรทโครเมียม 5 มก./ล จำนวน 200 มล. กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



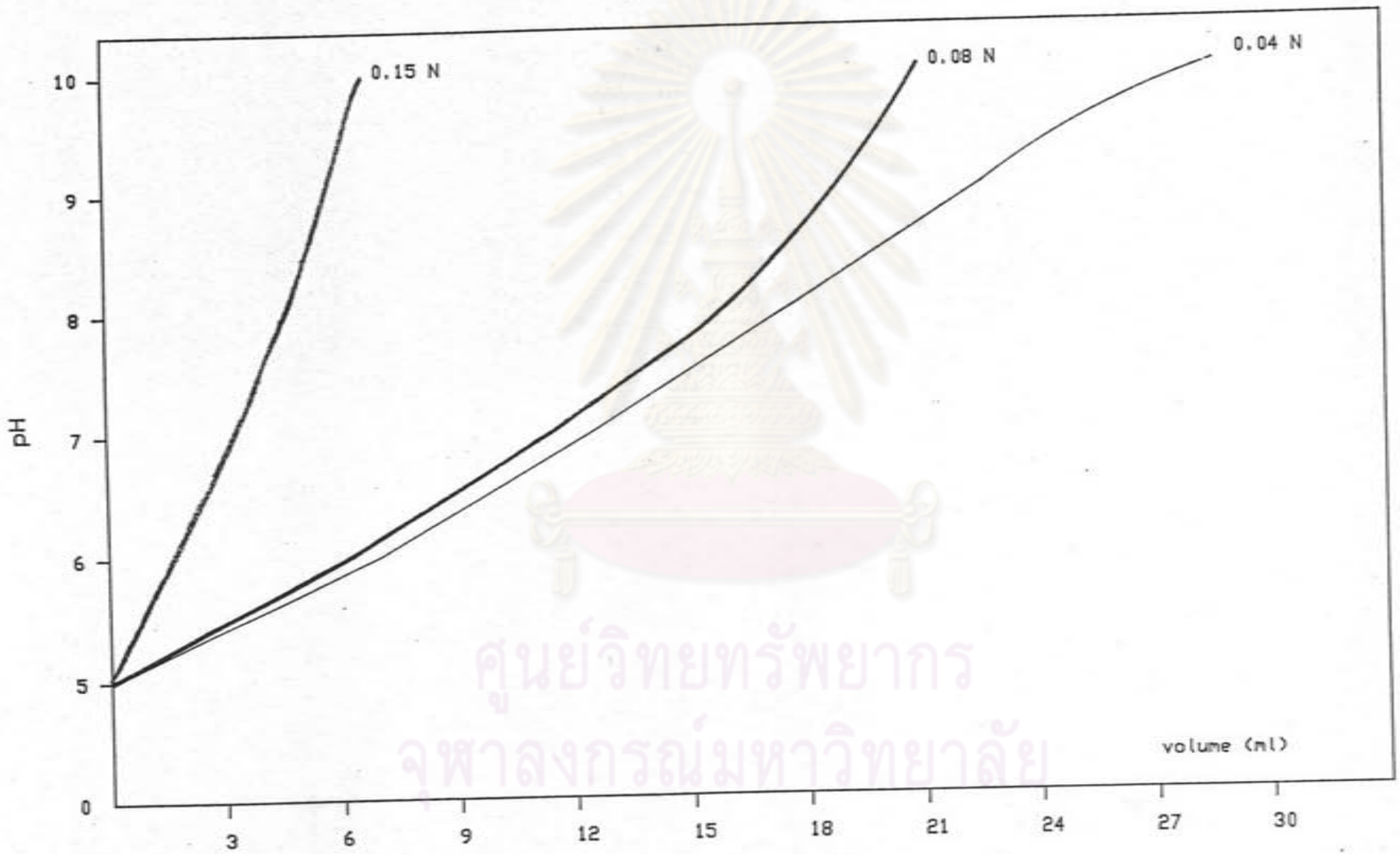
รูปที่ 4.7 กราฟการไตเตรทโครเมียม 10 มก./ล จำนวน 200 มล. กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



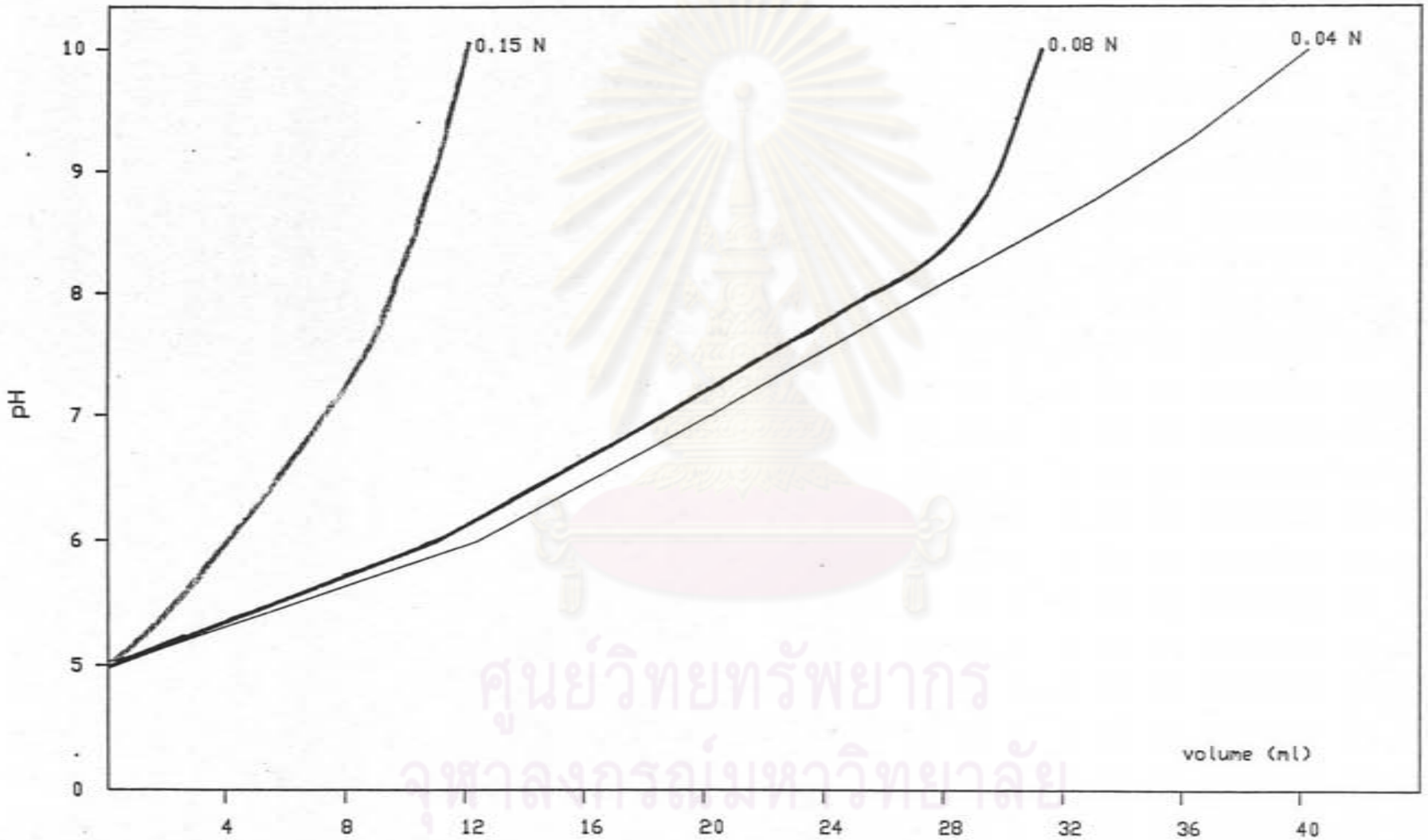
รูปที่ 4.8 กราฟการไตเตรทโครเมียม 50 ม.ก./ล จำนวน 200 มล. กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 กราฟการไตเตรทโครเมียม 100 มก./ล จำนวน 200 มล. กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 กราฟการไตเตรทโครเมียม 200 มก./ล จำนวน 200 มล. กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 กลไกการกำจัดโครเมียมในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

ในการทดลอง มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารทำให้เกิดตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ โดยสูบน้ำเสียที่มีโครเมียมผสมกับไฮดรอกไซด์ ไหลเข้าสู่หอทดลองที่บรรจุเม็ดทรายเป็นอนุภาคตัวกลาง สารทั้งสองผสมกันปฏิกิริยาเคมีจึงเกิดขึ้นระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับโครเมียม (III) ไอออน จากนั้นโมเลกุลของโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์จะเคลื่อนย้ายมายังชั้งทรายและเข้าเกาะจับบนผิวทรายในที่สุด

ทั้งนี้การเคลื่อนย้ายโมเลกุลโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ อาศัยหลักการถ่ายเทมวลสารในฟลูอิดไดซ์เบด โดยมีทฤษฎีการถ่ายเทมวลสารที่กล่าวไว้ว่า ปริมาณของการถ่ายเทย่อมขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของความเข้มข้นของสาร ที่ใดมีมวลมากกว่าก็จะกระจายไปหรือเดินทางไปยังที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ดังรูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของมวลจากของไหลไปเกาะติดอยู่บนผิวของเม็ดของแข็งได้อย่างไร ขณะที่ของไหลไหลผ่านเม็ดของแข็งด้วย (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2525)

รูปที่ 4.11 การแพร่ของมวลจากของไหลไปยังผิวของเม็ดอนุภาคตัวกลาง

การถ่ายเทมวลสารเป็นไปอย่างช้าๆ จึงเกิดการเกาะจับของโมเลกุลเกิดขึ้น เมื่อโมเลกุลเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวเม็ดทราย โดยการไหลหมุนเวียนของเม็ดทรายภายในเบด กล่าวคือ เม็ดทรายภายในเบด แบ่งเป็น 2 พวก พวกหนึ่งเคลื่อนที่ไปส่วนบน อีกส่านหนึ่งเคลื่อนที่ลงมาทางส่วนล่างของเบด เพื่อแทนที่ส่วนที่เคลื่อนที่ขึ้นข้างบน

ช่วงเวลาการทำงานของระบบ จะมีสารแขวนลอยหลุดออกมาด้วย อาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีตะกอนบางส่วนเกาะอย่างหลวม เมื่ออนุภาคทรายมีโมเลกุลโครเมียม(III)ไฮดรอกไซด์มาเกาะมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นไปด้วย ทำให้ตะกอนหลุดออกจากชั้นทรายได้ หรือกล่าวได้ว่า พื้นที่ผิวบนเม็ดทรายถูกใช้จนเกือบหมด ทำให้สารแขวนลอยเกาะผิวเม็ดทรายได้น้อย สารแขวนลอยจึงหลุดออกมาได้มาก

4.3.3 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างในระดับความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับ

4.3.3.1 พีเอช 8.5

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับค่าความเป็นด่าง จะพบว่า ความเป็นด่างจะลดลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครเมียม(III)ไอออน จับกับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดการตกผลึกบนเม็ดทรายมากขึ้น เมื่อความสูงของเบดเพิ่มจึงทำให้ค่าความเป็นด่างลดลง

จากรูปที่ 4.12 ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล. ที่ความสูงของเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่ เท่ากับ 130 , 115 , 93 มก./ล. ในรูปของหินปูน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเป็นด่างจากรูปที่ 4.12 กับ 4.13 ค่าความเป็นด่างจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นโครเมียมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องการไฮดรอกไซด์ไอออนมากขึ้น เพื่อจับกับโครเมียม(III) ที่เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล. จึงมากกว่าความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล. กล่าวคือ ที่ความสูง 1, 1.5 ,

2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 138 , 127 , 111 มก./ล. ในรูปของหินปูนตามลำดับ

ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูป 4.12 และ 4.13 ในรูป 4.14 ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล. ที่ความสูงของเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 170 , 167 , 125 มก./ล. ในรูปของหินปูนตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. ในรูป 4.15 ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 203 , 174 , 168 มก./ล.ในรูปของหินปูนตามลำดับ และในรูปที่ 4.16 ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล. ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 285,225 , 209 มก./ล.ในรูปของหินปูนตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเป็นด่างมากกว่าค่าความเป็นด่างของความเข้มข้นโครเมียมอื่นๆ ที่กล่าวมา

4.3.3.2 พีเอช 9.0

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับค่าความเป็นด่างที่พีเอช 8.5 กับ 9.0 ทุกระดับความเข้มข้นของโครเมียม ที่พีเอช 9.0 จะมีค่าความเป็นด่างมากกว่า พีเอช 8.5 และ ค่าความเป็นด่างจะลดลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับที่พีเอช 8.5 จากรูปที่ 4.12 ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล. ที่ความสูงของเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่ เท่ากับ 145 , 125 , 105 มก./ล.ในรูปของหินปูน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความเป็นด่างจากรูปที่ 4.12 กับ 4.13 ค่าความเป็นด่างจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นโครเมียมที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ที่ความสูง 1, 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 169 , 153 , 112 มก./ล. ในรูปของหินปูนตามลำดับ

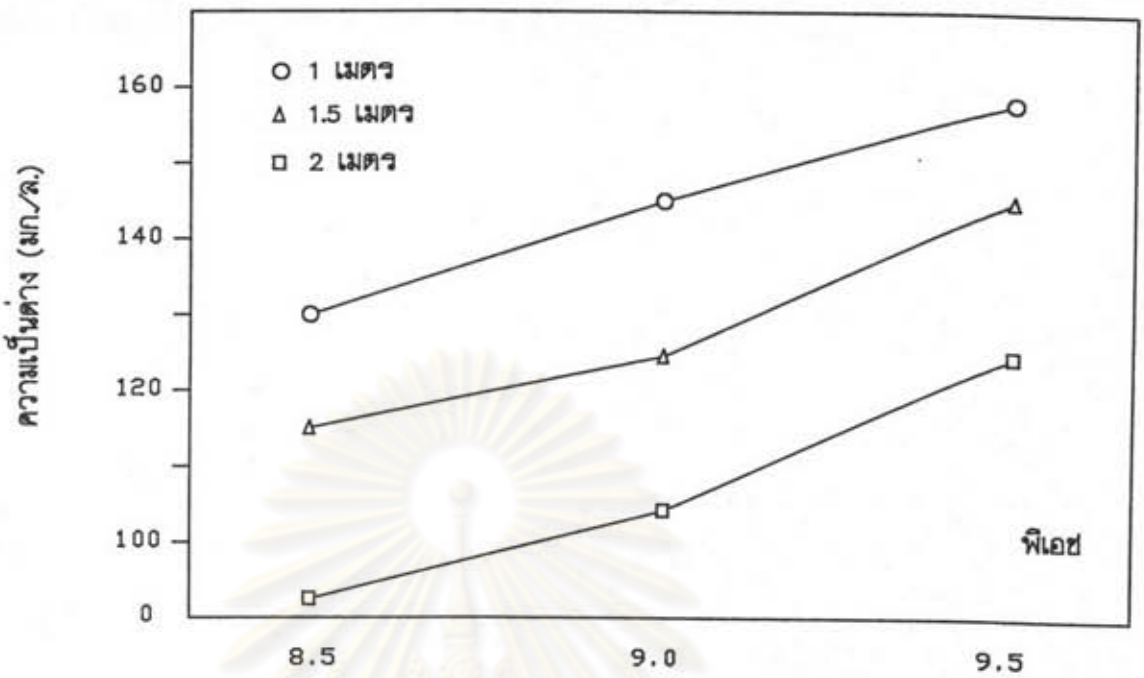
ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูป 4.12 และ 4.13 ในรูป 4.14 ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล. ที่ความสูงของเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 191 , 167 , 143 มก./ล. ในรูป

ของหินปูนตามลำดับ ลำหรับความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. ในรูป 4.15 ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 215 , 191 , 178 มก./ล.ในรูปของหินปูนตามลำดับ และในรูปที่ 4.16 ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล. ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร ค่าความเป็นด่างคงที่เท่ากับ 306 , 276 , 238 มก./ล.ในรูปของหินปูนตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเป็นด่าง มากกว่าค่าความเป็นด่าง ของความเข้มข้นโครเมียมอื่นๆ ที่กล่าวมา

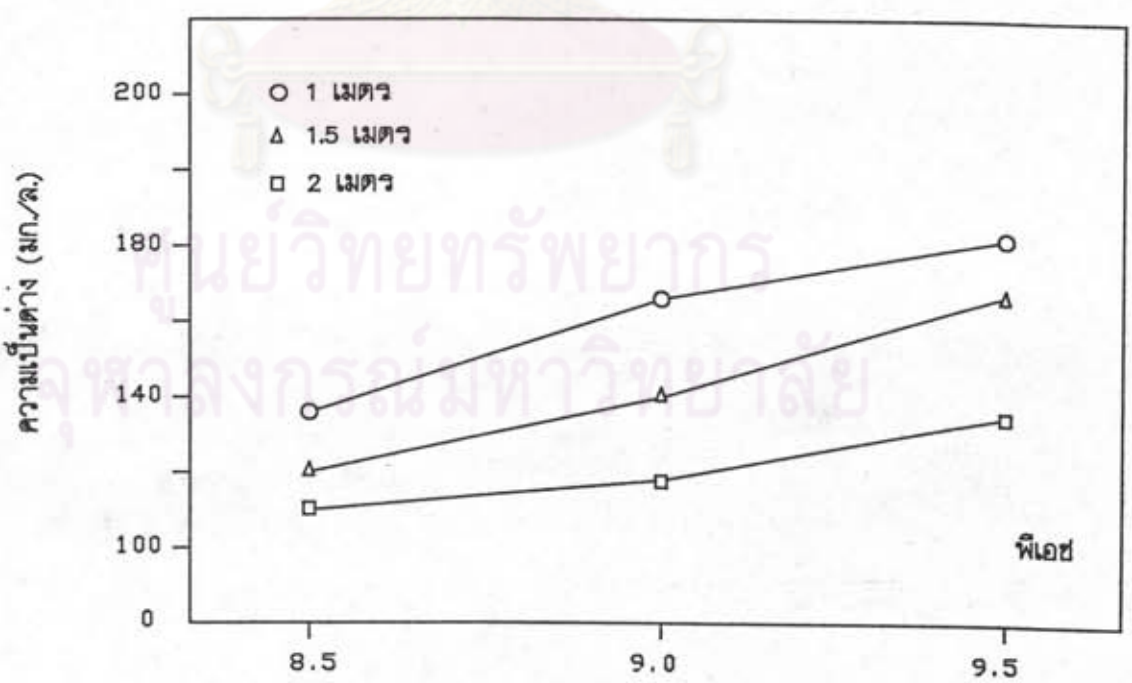
4.3.3.3 พีเอช 9.5

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับค่าความเป็นด่างเปรียบเทียบกับที่พีเอช 8.5, 9.0 กับ 9.5 จะพบว่าค่าความเป็นด่างที่พีเอช 9.5 มากกว่า พีเอช 8.5 , 9.0 ตามลำดับ ทุกระดับความเข้มข้นของโครเมียม ลำหรับที่พีเอช9.5นี้ ค่าความเป็นด่างจะลดลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับพีเอชอื่นๆ

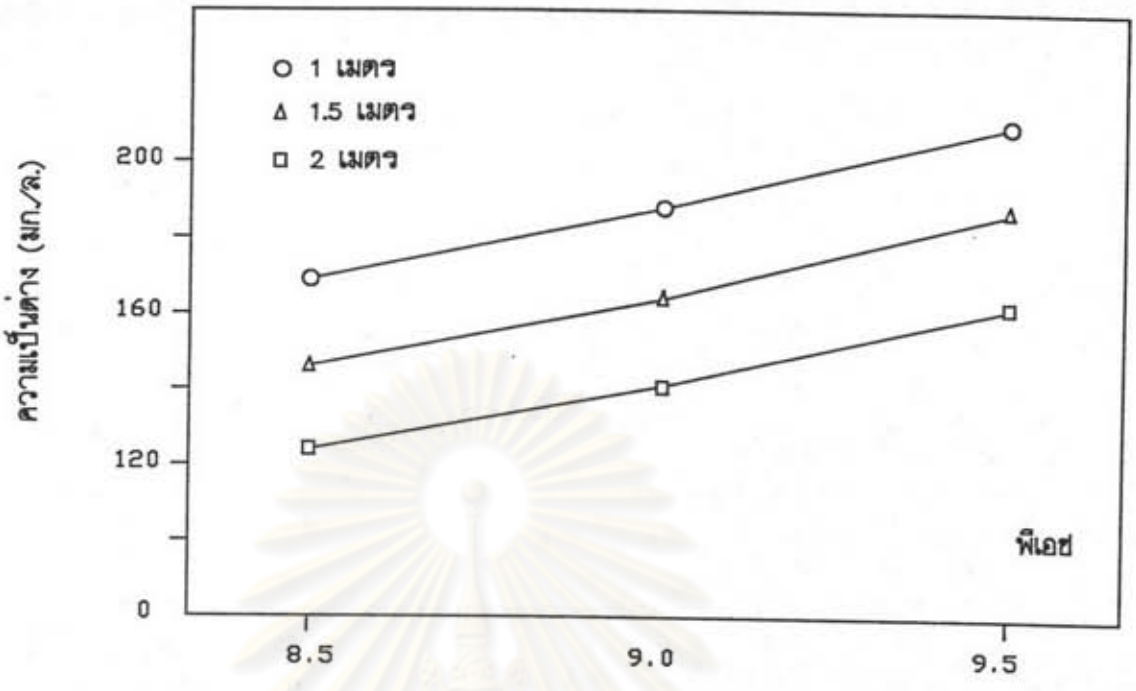
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



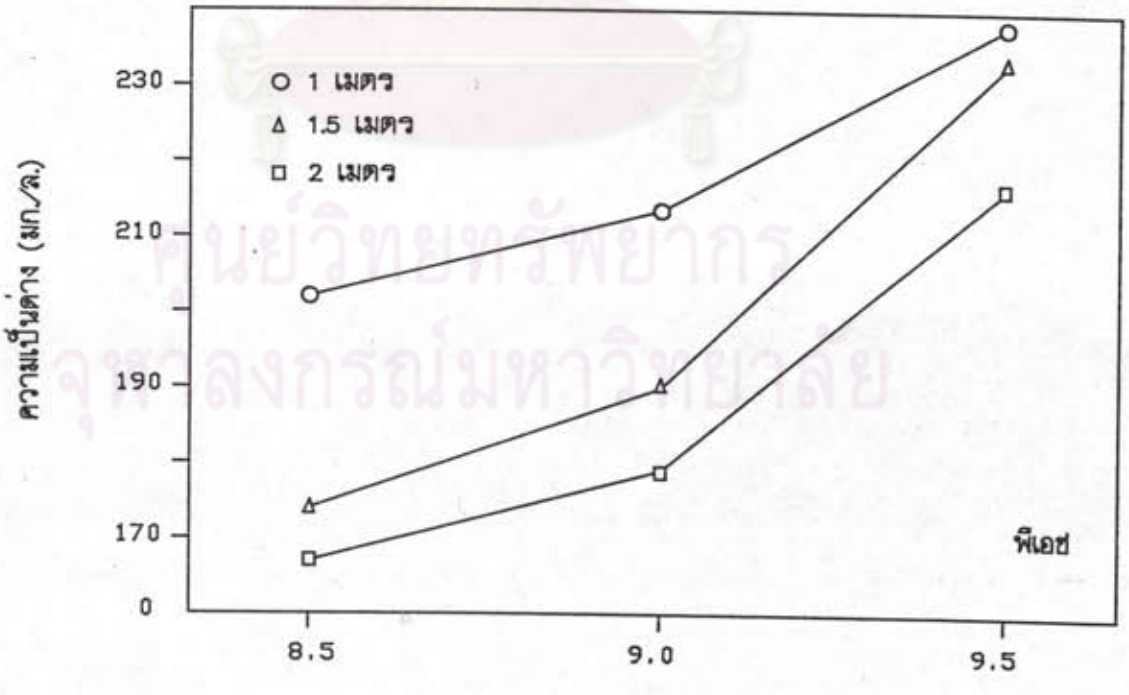
รูปที่ 4.12 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



รูปที่ 4.13 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5

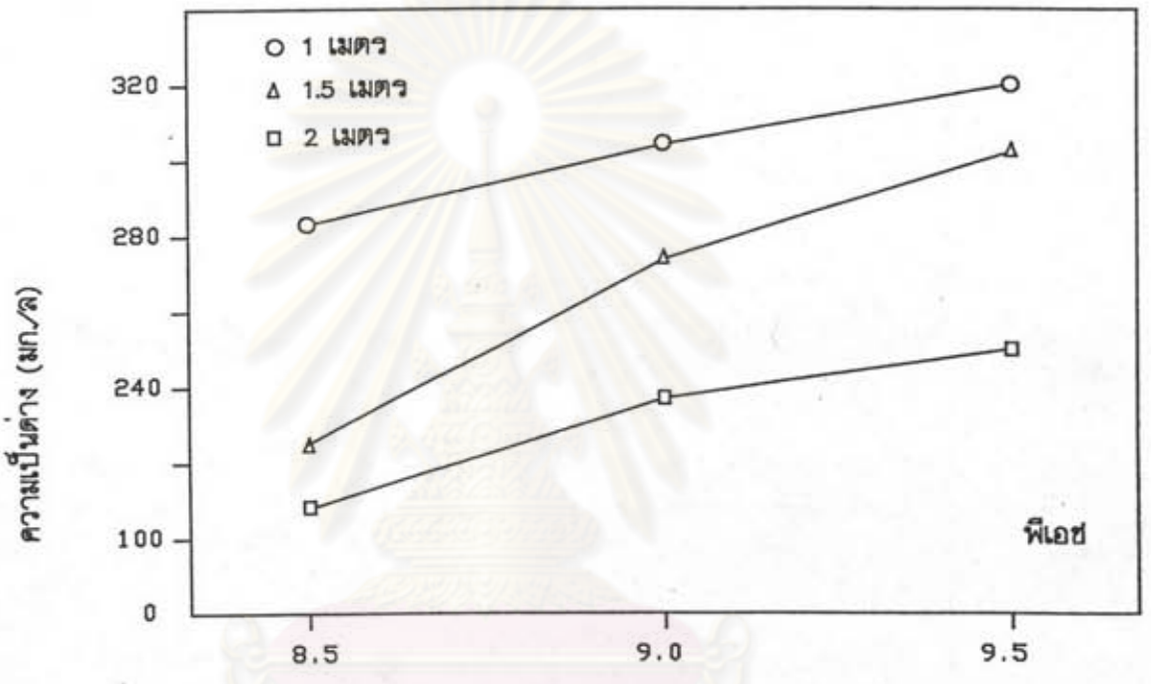


รูปที่ 4.14 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



รูปที่ 4.15 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.16 ผลของความสูงของเบดต่อความเป็นด่างที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่พีเอช 8.5-9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4 ผลของความสูงของเบดต่อของแข็งแขวนลอยในระดับความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับ

4.3.4.1 พีเอช 8.5

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบด กับของแข็งแขวนลอยพบว่าของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครเมียม (III)ออน จับกับ ไฮดรอกไซด์ออน เกิดการตกผลึกบนเม็ดทรายมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามตะกอนโครเมียม (III)ไฮดรอกไซด์เป็นตะกอนที่แยกออกจากน้ำได้ยาก ลังเกตจากลักษณะตะกอนจะเป็นปุยไม่อัดตัวกันแน่น มีการฟุ้งกระจายได้ง่าย ความสามารถในการรีดน้ำออกจากตะกอนได้น้อย ตะกอนจึงมีการเกาะตัวเป็นแบบหลวมๆ ตามผิวเม็ดทราย แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจึงพัดพาตะกอนหลุดออกจากอนุภาคทราย จึงเป็นข้อเสียของตะกอนโลหะหนักในระบบไฮดรอกไซด์ ซึ่งการเกิดตะกอนจะมีมาก การแยกตะกอนออกจากน้ำได้ยาก โดยเฉพาะในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งใช้เวลากักน้อย จึงทำให้ตะกอนในระบบไฮดรอกไซด์เกาะแบบหลวมๆ จึงมีไฮดรอกไซด์ออนที่อยู่รอบๆ ผิวเม็ดทรายทำปฏิกิริยากับโครเมียม เกิดเป็นตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ แล้วหลุดออกไป จากรูปที่ 4.17 ถึง4.21 ที่พีเอช 8.5 ความเข้มข้นโครเมียม 5 , 10 , 50 , 100 มก./ล ของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลง ตามความสูงของเบดที่เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นโครเมียมที่เพิ่มขึ้นด้วย ยกเว้น ความเข้มข้น 200 มก./ล จะมีค่าของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าความเข้มข้น 100 มก./ล ในแต่ละความสูงของเบด เป็นเพราะว่า ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ออน มีไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นโครเมียม (III) ออน จึงทำให้เกิดตะกอนได้บางส่วน และของแข็งแขวนลอยจึงออกมาได้น้อยกว่า

สำหรับพีเอช 8.5 และ9.0 ค่าของแข็งแขวนลอยมีค่าใกล้เคียงกัน

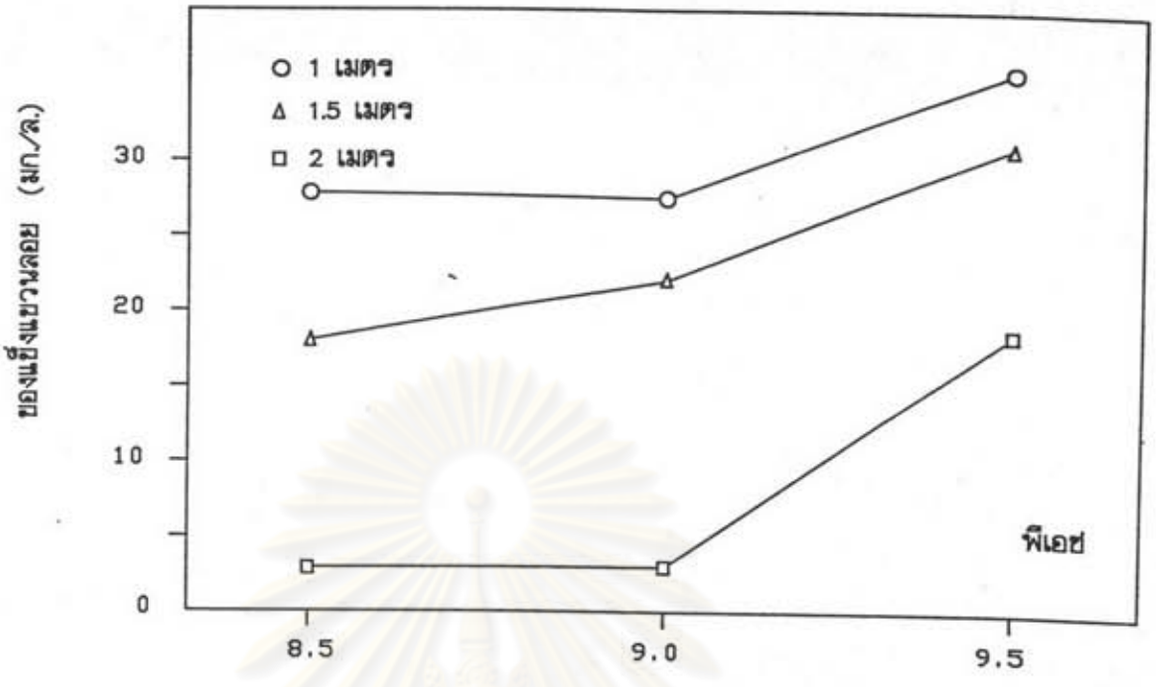
4.3.4.2 พีเอช 9.0

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับของแข็งแขวนลอย เช่นเดียวกับพีเอช 8.5 ของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลงตามความสูงของเบดเพิ่มขึ้น แต่ของแข็งแขวนลอยที่พีเอช 9.0 จะมีค่ามากกว่าพีเอช 8.5 เล็กน้อย จากรูปที่ 4.17 ถึง4.20 ที่พีเอช 9.0 ความเข้มข้นโครเมียม 5 , 10 , 50 , 100 มก./ล ของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลง ตามความสูงของเบดที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นโครเมียมที่เพิ่มขึ้นด้วย ยกเว้นความเข้มข้น 200 มก./ล ในรูปที่ 4.21 ค่าของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล ในแต่ละความสูงของเบด เพราะว่าความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์อิออนมีไม่เพียงพอ ในการทำปฏิกิริยากับความเข้มข้นโครเมียม(III)อิออน จึงทำให้เกิดตะกอนน้อย ค่าของแข็งแขวนลอยจึงมีค่าน้อยไปด้วย

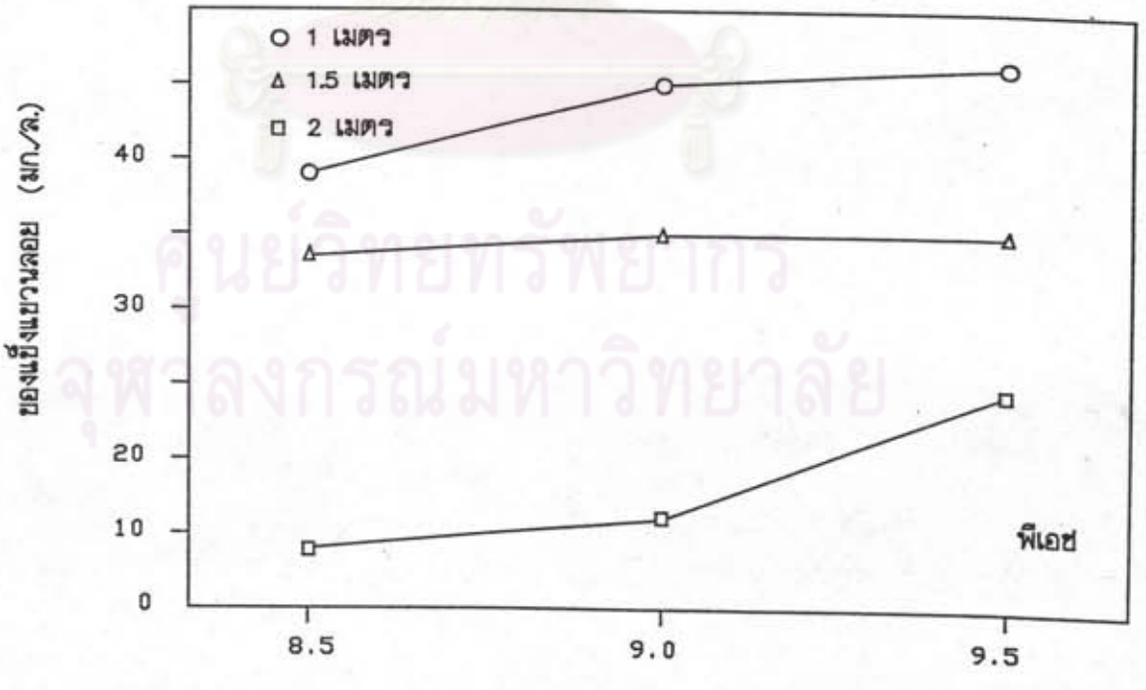
4.3.4.3 พีเอช 9.5

ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดกับของแข็งแขวนลอย เช่นเดียวพีเอช 8.5และ 9.0 จากรูปที่ 4.17 ถึง4.21 ที่พีเอช 9.5 ความเข้มข้นโครเมียม 5 , 10 , 50 , 100 มก./ล ของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลงตามความสูงของเบดที่เพิ่มขึ้น และมีค่ามากขึ้นตามความเข้มข้นโครเมียมที่เพิ่มขึ้นด้วย ยกเว้นความเข้มข้น 200 มก./ล ในรูปที่ 4.21 ค่าของแข็งแขวนลอยน้อยกว่าความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ลในแต่ละความสูงของเบด

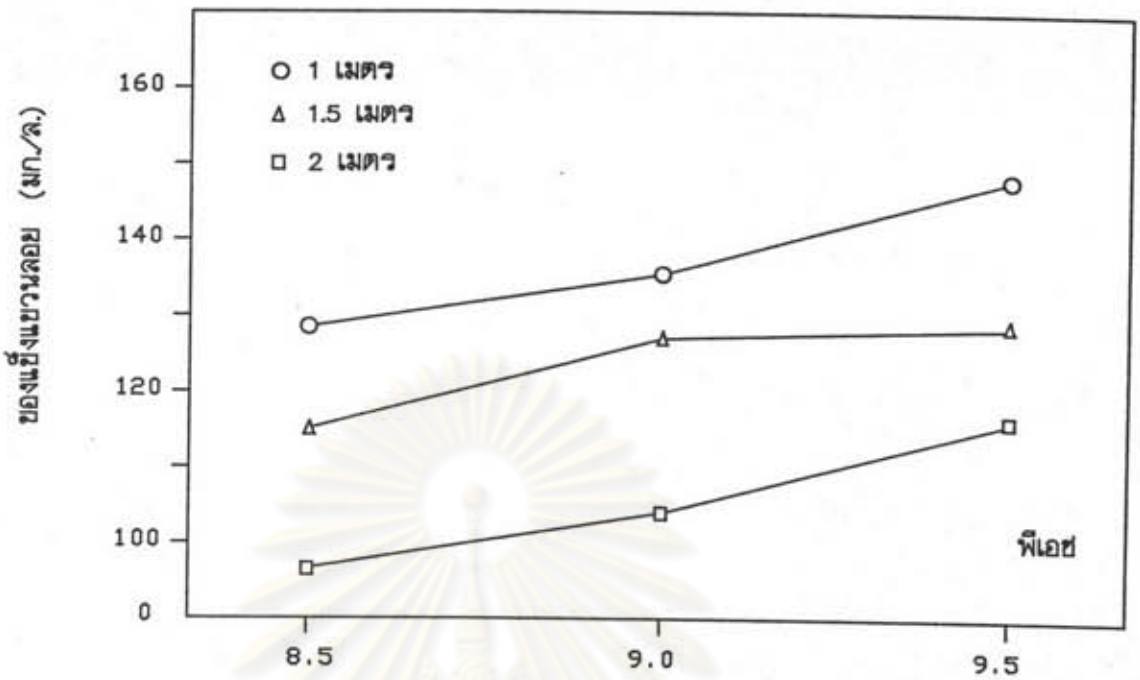
สำหรับพีเอช 9.5 นี้ จะมีค่าของแข็งแขวนลอยมากกว่าพีเอช 8.5 , 9.0 เมื่อสังเกตจากค่าของแข็งแขวนลอยที่เพิ่มขึ้นตามความสูงของเบดทุกพีเอชที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่า ตะกอนในระบบไฮดรอกไซด์จะจับเป็นผลึกบนผิวเม็ดทรายได้ไม่ดีพอ แม้จะเพิ่มความสูงของเบดขึ้นก็ตาม หากใช้ระบบไฮดรอกไซด์ในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดก็จำเป็นต้องให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วผ่านกระบวนการกรองอีกครั้งหนึ่ง หรือไม่ก็ใช้ระบบคาร์บอเนตในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด เพื่อให้ตะกอนจับเบ็บผลึกบนอนุภาคทรายได้ดี ของแข็งแขวนลอยจะมีค่าน้อยลง



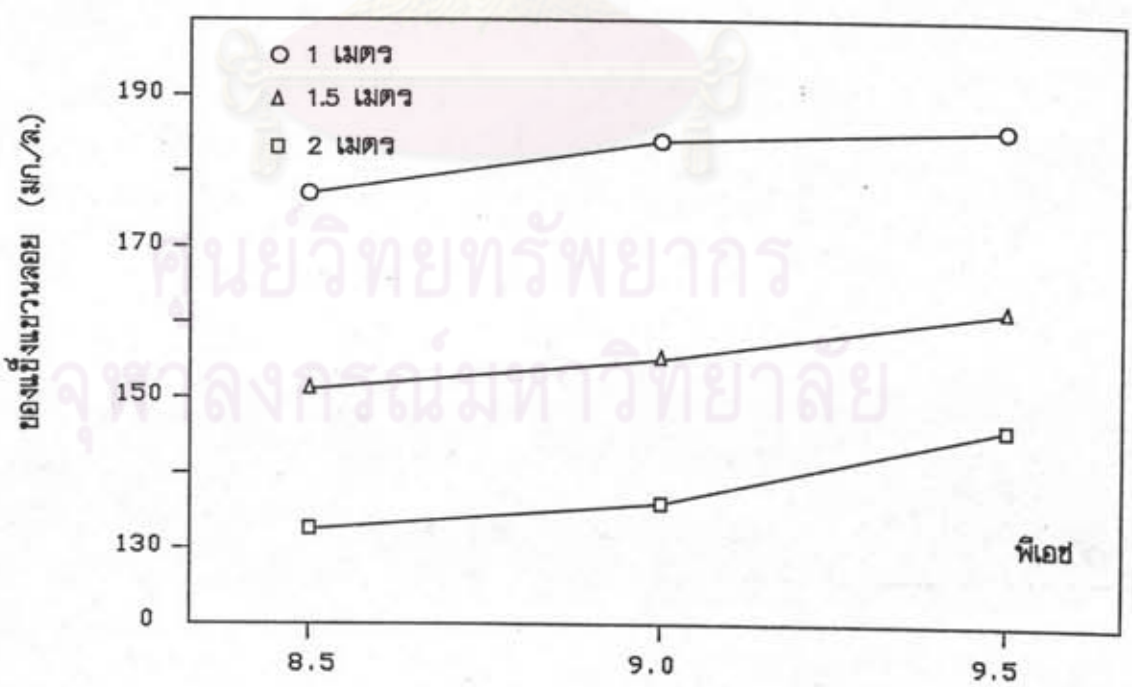
รูปที่ 4.17 ผลของความสูงของเบดต่อของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



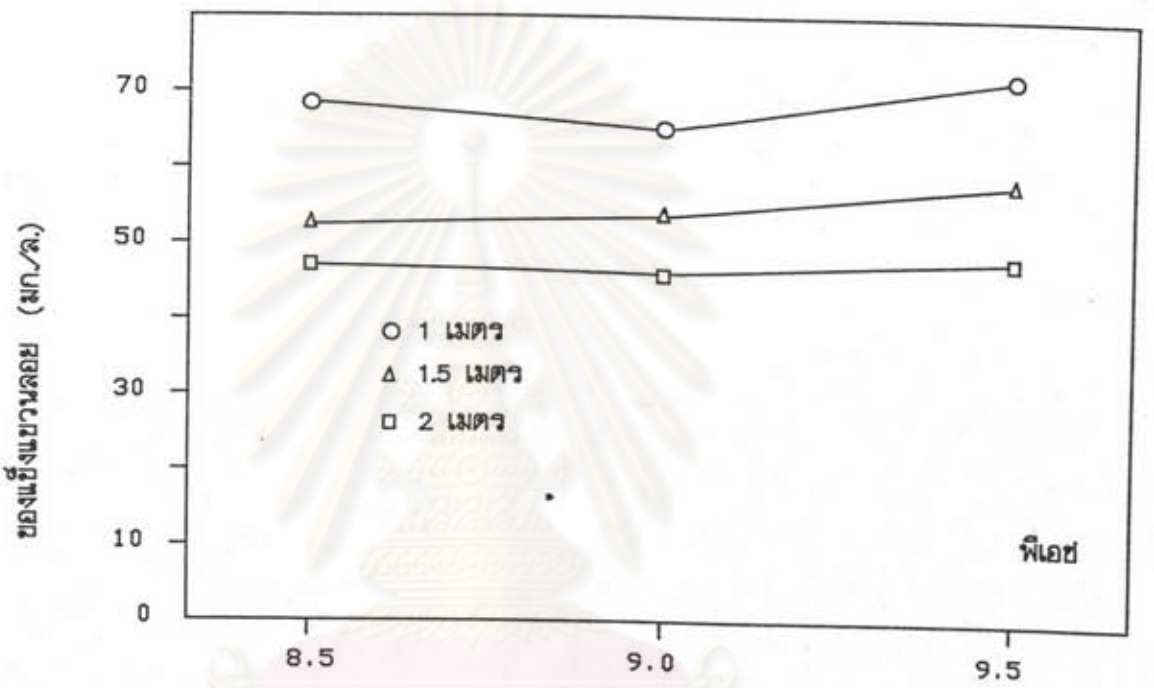
รูปที่ 4.18 ผลของความสูงของเบดต่อของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



รูปที่ 4.19 ผลของความสูงของเบดต่อของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



รูปที่ 4.20 ผลของความสูงของเบดต่อของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล. ที่พีเอช 8.5-9.5



รูปที่ 4.21 ผลของความสูงของเบด ต่อของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่พีเอช 8.5-9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Patterson et al (1977) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะคาร์บอเนต ในการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ สังกะสี นิเกิล แคดเมียม และตะกั่ว โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอเนตในน้ำ และใช้โซดาไฟเป็นการเพิ่มปริมาณไฮดรอกไซด์ ผลการทดลองพบว่า ตะกอนที่เกิดจากระบบคาร์บอเนตหนาแน่น และอัดตัวดีกว่าระบบไฮดรอกไซด์ ทำให้ปริมาณตะกอนน้อยกว่า และแยกตะกอนออกจากน้ำได้ง่ายกว่า อีกทั้งยังมีความสามารถในการรีดน้ำออกจากจะกอนได้ดีกว่าระบบไฮดรอกไซด์

ดังนั้นจากการศึกษาค่าของแข็งแขวนลอยในการวิจัยนี้ จะเป็นสิ่งชี้ให้เห็นว่า วิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด จำเป็นต้องเลือกสารที่ทำให้เกิดตะกอน แล้วจับเป็นผลึกบนอนุภาคตัวกลาง ได้ผลึกที่เกาะติดแน่นไม่หลุดง่าย ฉะนั้นในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด โดยใช้ระบบไฮดรอกไซด์ จะมีปัญหาในด้านตะกอนที่ฟุ้งกระจาย ควรเปลี่ยนสารที่ทำให้เกิดตะกอนได้แน่น เช่น สารประกอบคาร์บอเนต เป็นต้น

4.3.5 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมในระดับความเข้มข้นโครเมียม 5 ระดับ

4.3.5.1 พีเอช 8.5

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียม พบว่า โครเมียมถูกกำจัดได้มากเมื่อเพิ่มความสูงของเบดมากขึ้น เนื่องจากมีการตกผลึกของโครเมียม (III)ไฮดรอกไซด์ บนอนุภาคทราย จากรูปที่ 4.22 ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 3.82 , 3.71 , 2.31 มก./ล ตามลำดับ

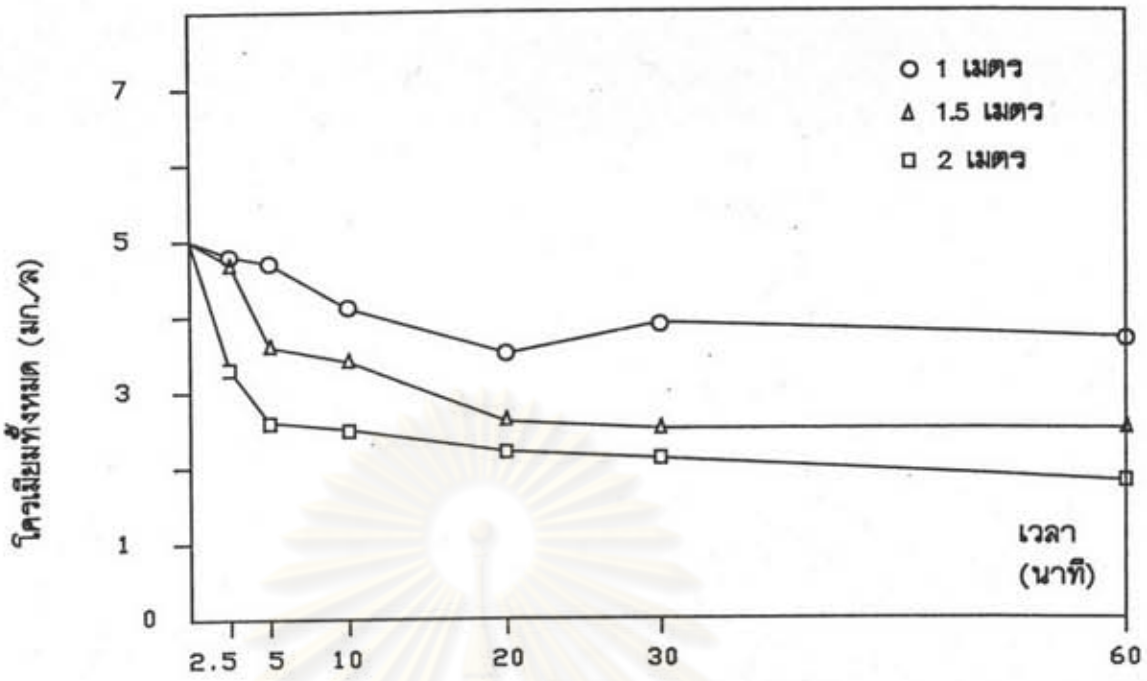
จากรูปที่ 4.23 - 4.25 จะมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.22 กล่าวคือ ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 ,

2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 8.28 , 6.05 , 4.74 มก./ล ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ลที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 40.45 , 30.72 , 22.8 มก. / ล ตามลำดับ และความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ลที่ความสูงเบด 1 , 1.5, 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 80.5 , 58.24 , 44.33 มก. / ล ตามลำดับ

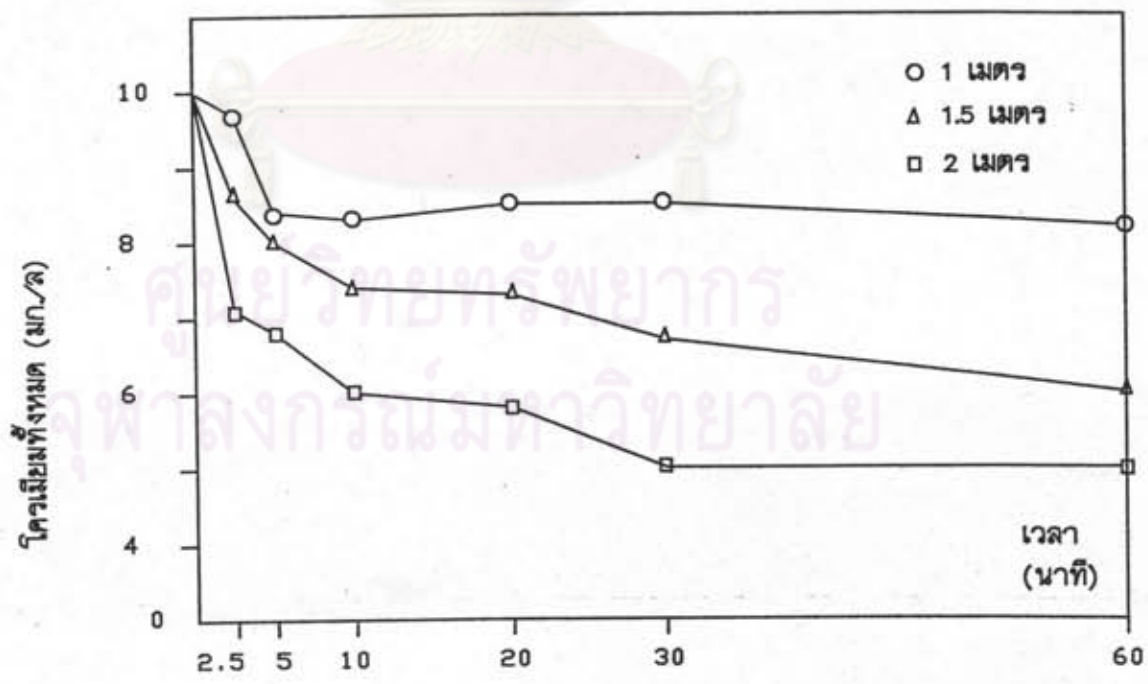
ลำหรับความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล จะกำจัดโครเมียมได้น้อยกว่าทุกความเข้มข้นที่กล่าวมา เนื่องจากความเข้มข้นไฮดรอกไซด์อาจไม่เพียงพอต่อการตกผลึกของโครเมียม จำเป็นต้องมีการนำโครเมียมหนุมเวียนกลับมากำจัดอีก เพื่อให้ความเข้มข้นโครเมียมลดลง ในรูปที่ 4.26 ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 164.23, 155.67 , 139 มก. / ล ตามลำดับ

ที่พีเอช 8.5 นี้ การกำจัดโครเมียม กำจัดได้น้อยกว่าพีเอช 9.0 เล็กน้อย แต่กำจัดโครเมียมได้มากกว่าพีเอช 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

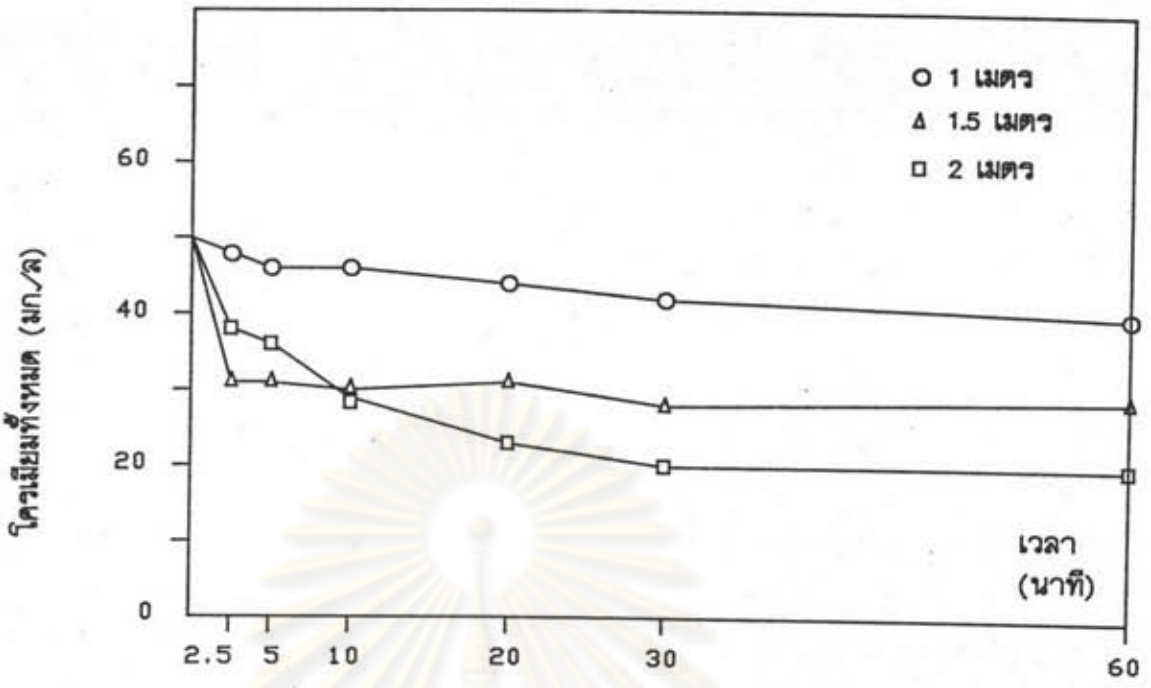


รูปที่ 4.22 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล พีเอช 8.5

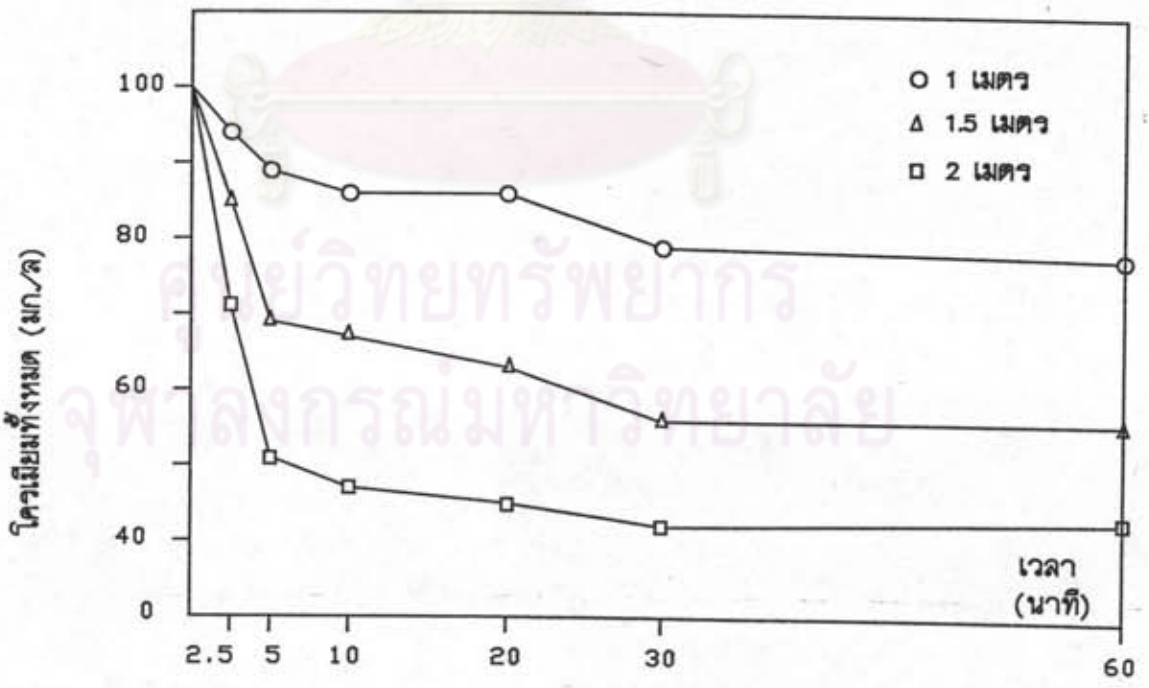


รูปที่ 4.23 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล พีเอช 8.5

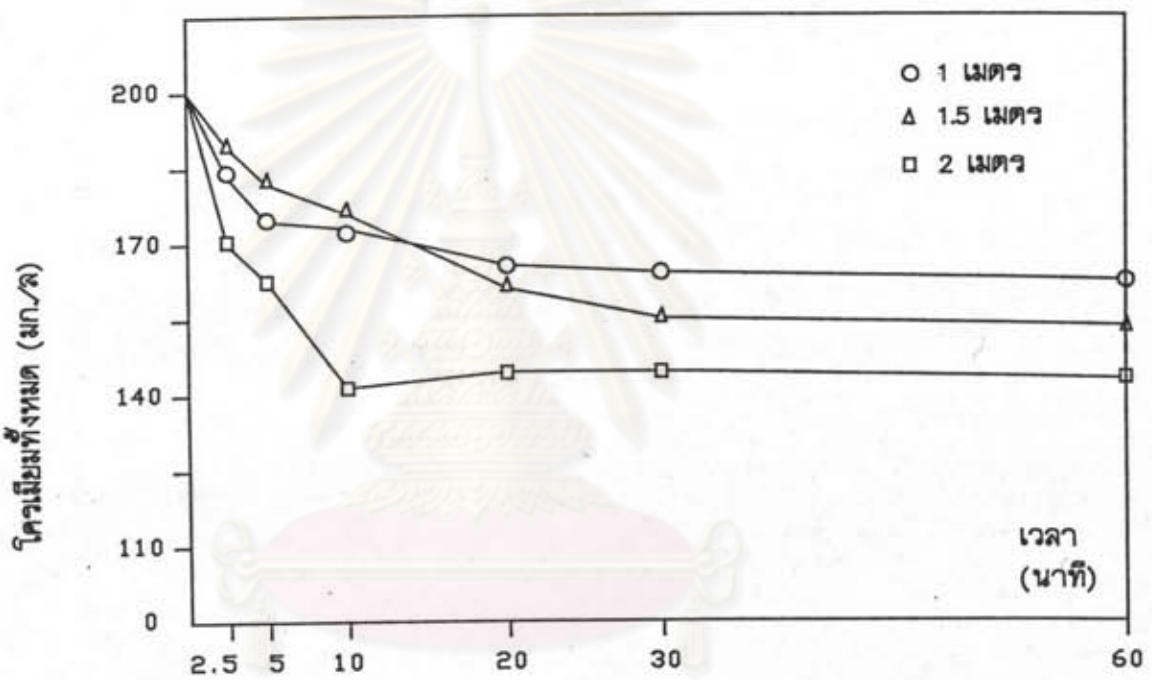
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.24 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล พีเอช 8.5



รูปที่ 4.25 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล พีเอช 8.5



รูปที่ 4.26 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล พีเอช 8.5

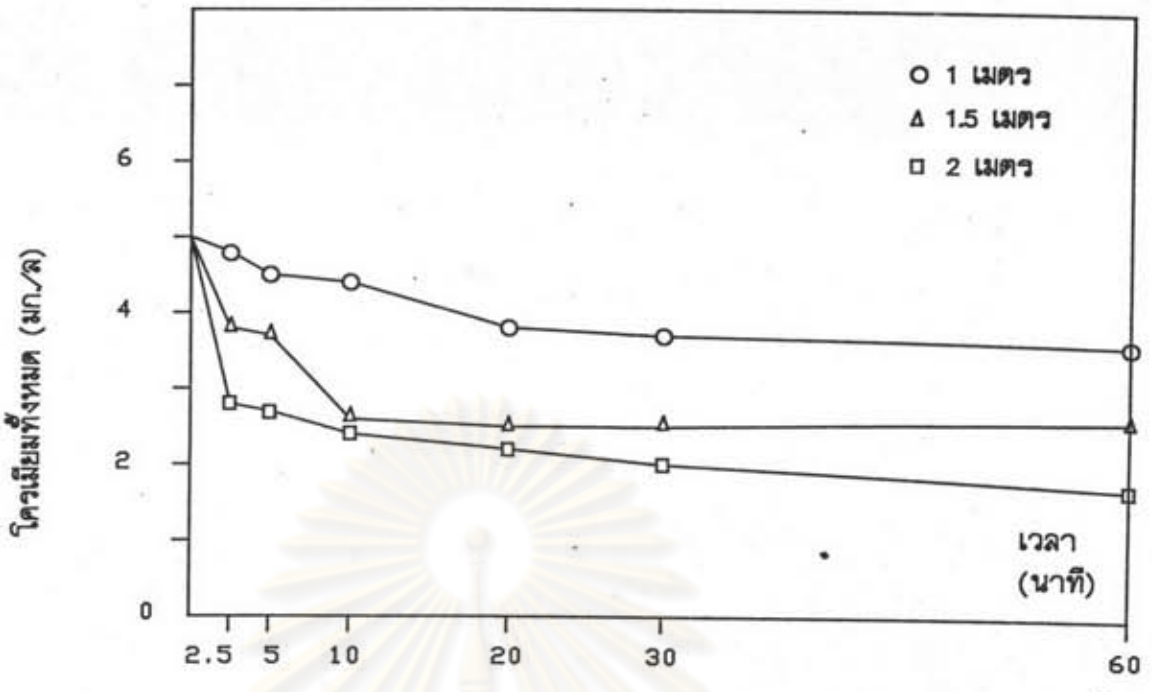
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.5.2 พีเอช 9.0

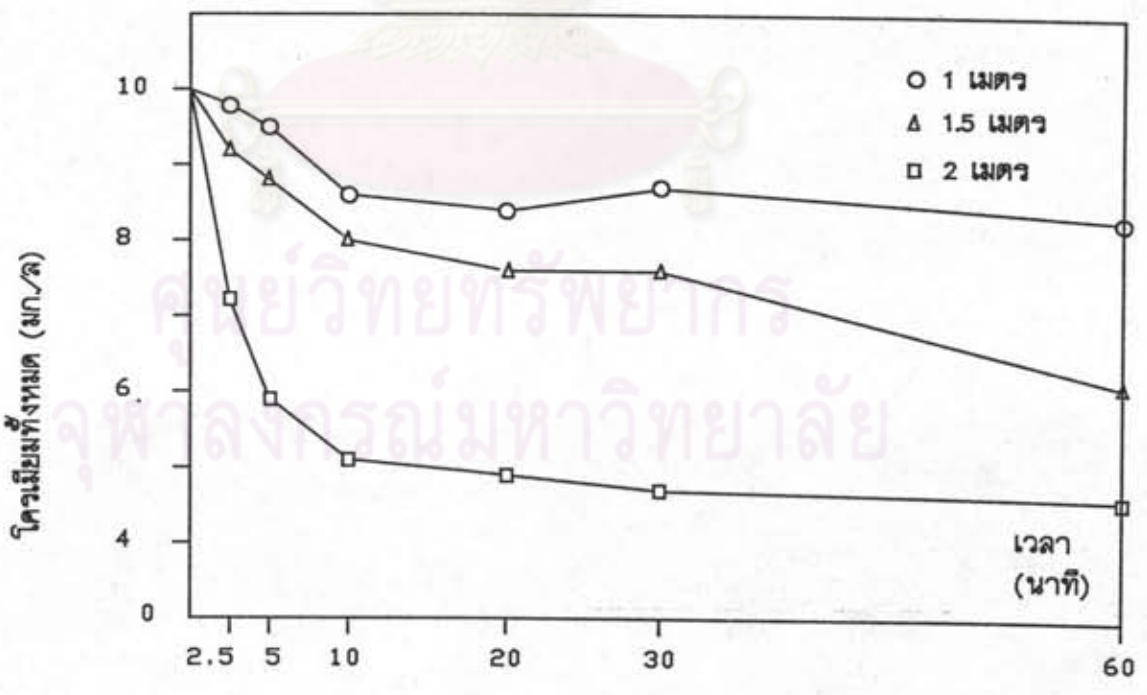
เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบด กับการกำจัดโครเมียมพบว่า โครเมียมที่พีเอช 8.5 กับ 9.0 ทุกระดับความเข้มข้นของโครเมียม ที่พีเอช 9.0 จะกำจัดโครเมียมได้มากกว่าที่พีเอช 8.5 เพราะเป็นช่วงที่โครเมียม (III)ไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน เกินค่าคงที่ผลคูณการละลาย (k_{sp}) จากรูปที่ 4.27 ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 3.77 , 2.76 , 1.87 มก./ล ตามลำดับ

ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.27 จากรูปที่ 4.28 - 4.30 ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 8.45 , 6.21 , 4.29 มก./ล ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ลที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 42.3 , 28.2 , 23.45 มก. / ล ตามลำดับ และความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ลที่ความสูงเบด 1,1.5,2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 77.17 , 60.02 , 42.27 มก. / ล ตามลำดับ

ในรูปที่ 4.31 ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 159.65, 154.17 , 140.87 มก. / ล ตามลำดับ ซึ่งในระดับความเข้มข้นนี้ จะกำจัดโครเมียมได้น้อย เช่นเดียวกับที่พีเอช 8.5 สำหรับพีเอช 9.0 นี้ จะกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าพีเอชอื่นๆ ด้วยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด

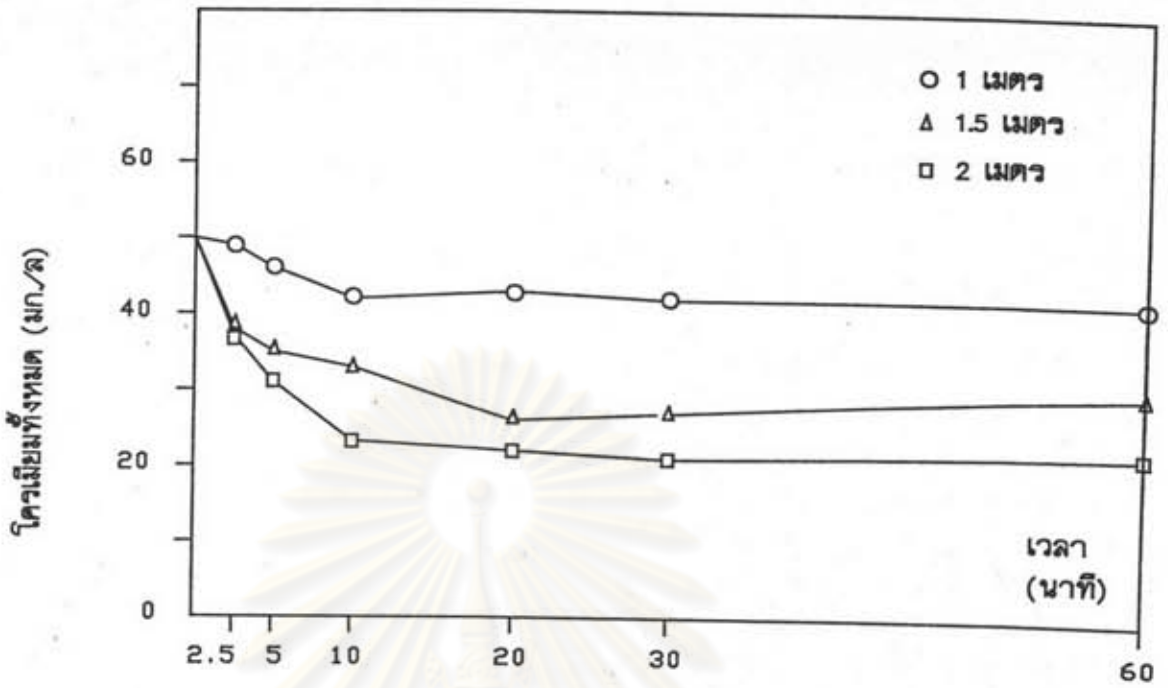


รูปที่ 4.27 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล พีเอช 9.0

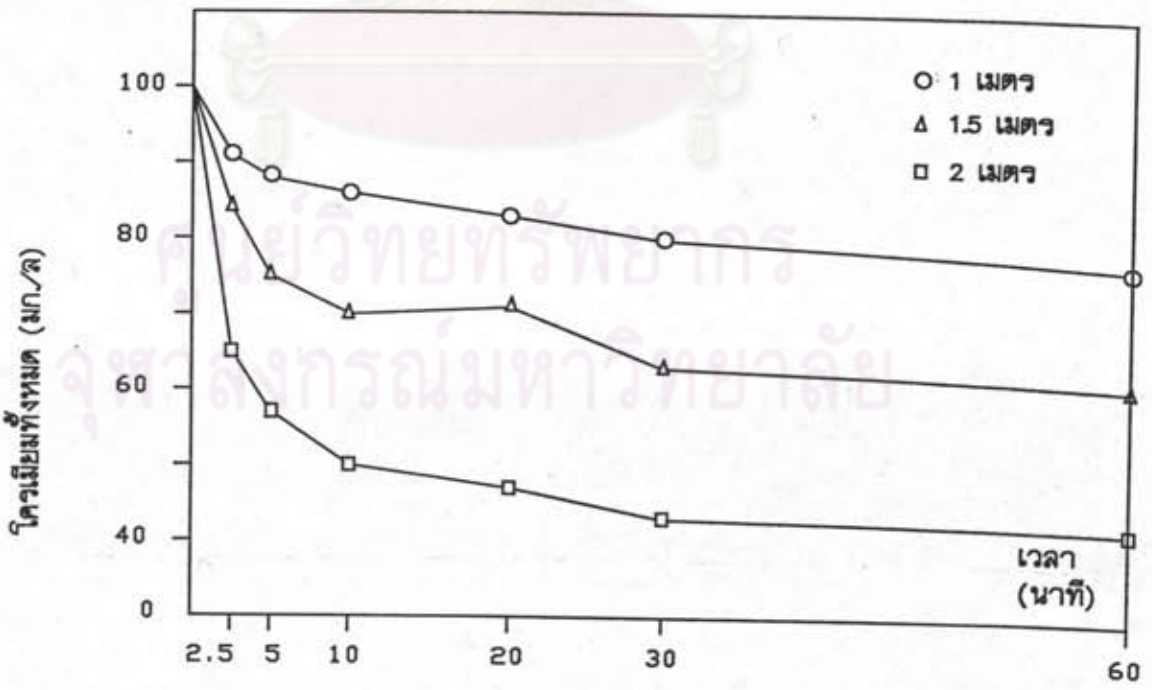


รูปที่ 4.28 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล พีเอช 9.0

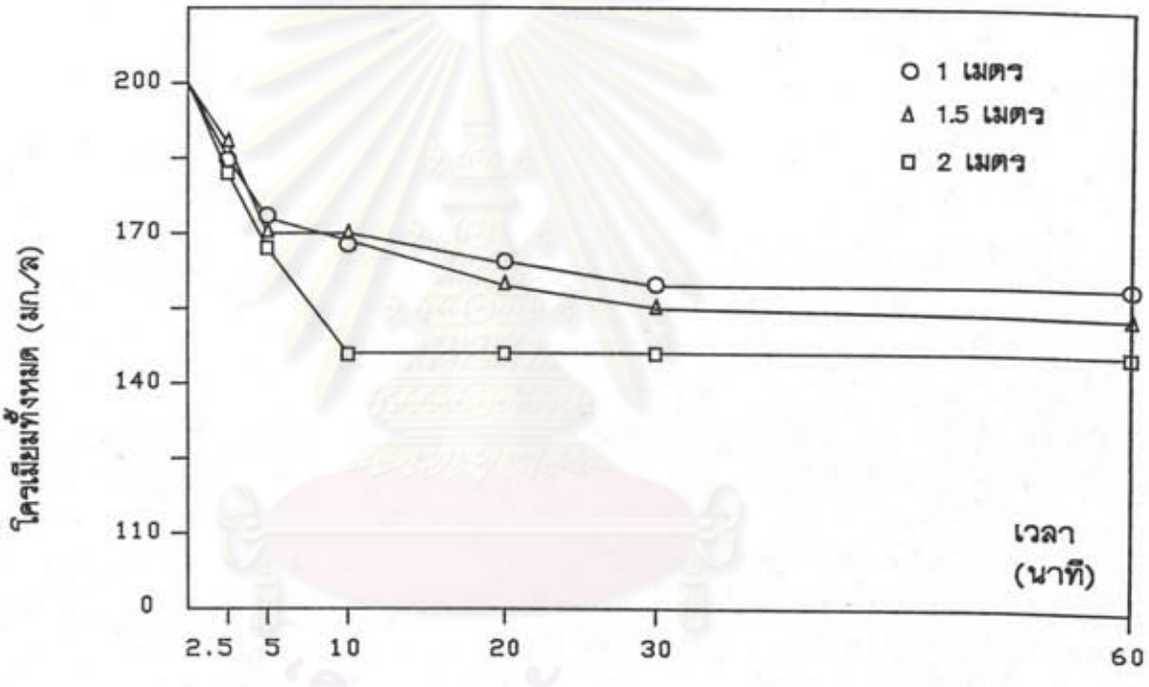
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.29 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล พีเอช 9.0



รูปที่ 4.30 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล พีเอช 9.0



รูปที่ 4.31 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล พีเอช 9.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

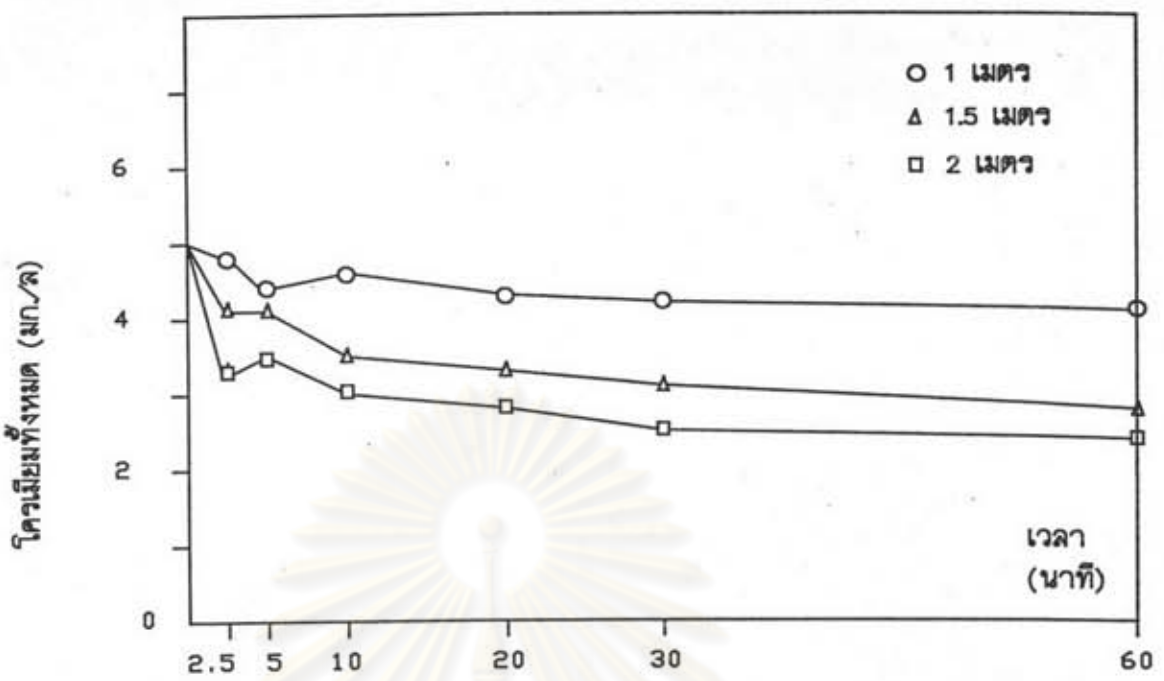
4.3.5.3 ที่พีเอช 9.5

จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียม พบว่า โครเมียมถูกกำจัดมากขึ้น เมื่อความสูงของเบดมากขึ้น เช่นเดียวกับที่พีเอช 8.5 และ 9.0 ที่มีการตกผลึกของโครเมียม (III)ไฮดรอกไซด์บนผิวเม็ดทราย จากรูปที่ 4.32 ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 4.24 , 2.93 , 2.65 มก./ล ตามลำดับ

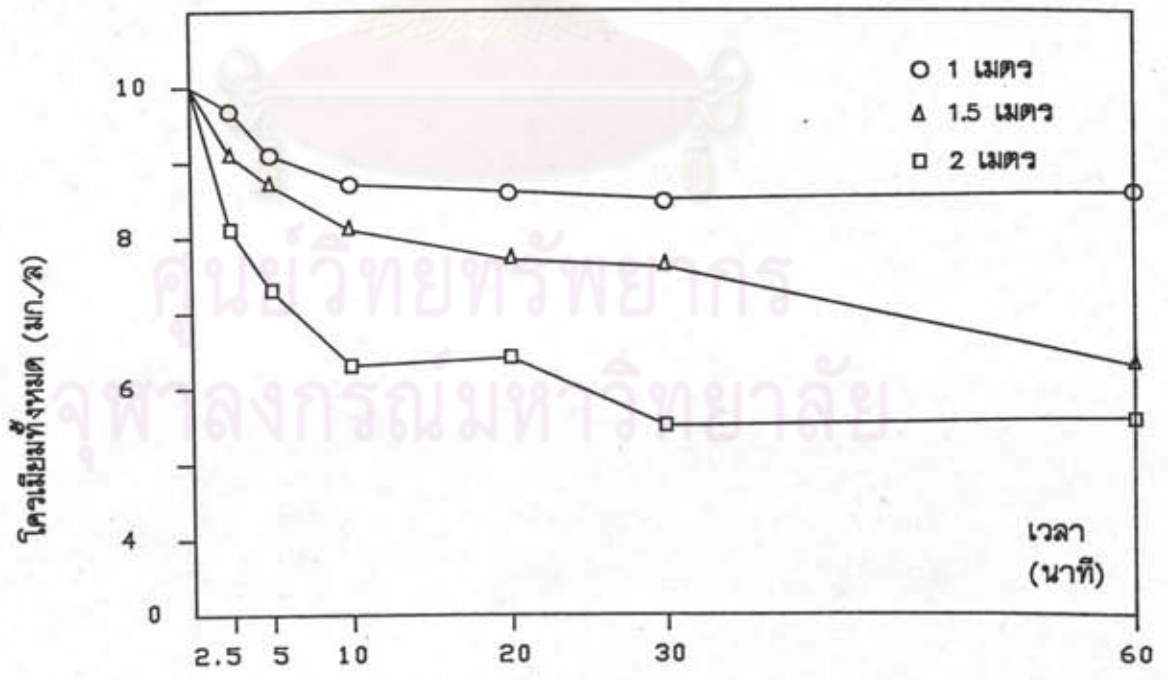
จากรูปที่ 4.33-4.35 ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับรูปที่ 4.32 กล่าวคือความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ลที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60 นาทีจะเหลือโครเมียมเท่ากับ 8.73 , 6.43 , 5.74 มก./ล ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ลที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 44 , 36 , 26.45 มก. / ล ตามลำดับ และความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ลที่ความสูงเบด1 , 1.5 , 2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 86.76 , 68.4 , 52.57มก./ล ตามลำดับ

ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ ล จะกำจัดโครเมียมได้น้อยกว่าทุกความเข้มข้นโครเมียมที่กล่าวมาโดยเฉพาะที่พีเอช 9.5 จะกำจัดได้น้อยที่สุดในรูปที่ 4.36 ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่ความสูงเบด 1 , 1.5,2 เมตร โครเมียมทั้งหมดในเวลา 60นาที จะเหลือโครเมียมเท่ากับ 175 ,167, 145.6 มก. / ล ตามลำดับ

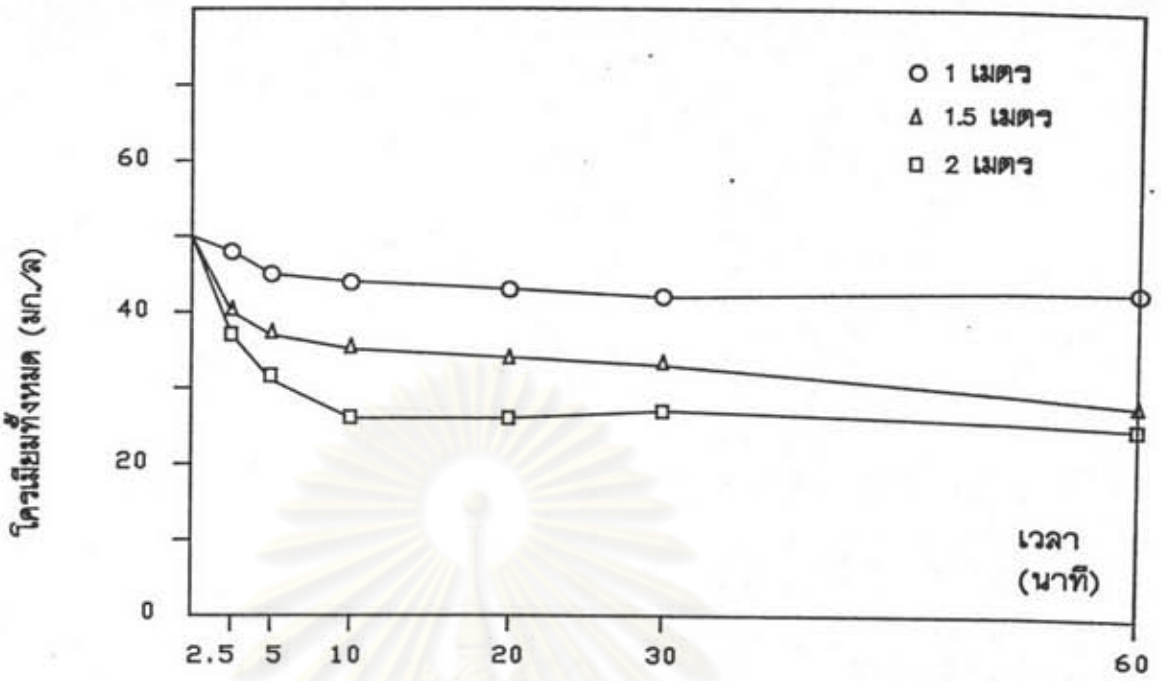
ลำหรับพีเอชที่ 9.5 นี้ จะเป็นช่วงที่มีการกำจัดโครเมียมได้น้อยที่สุด



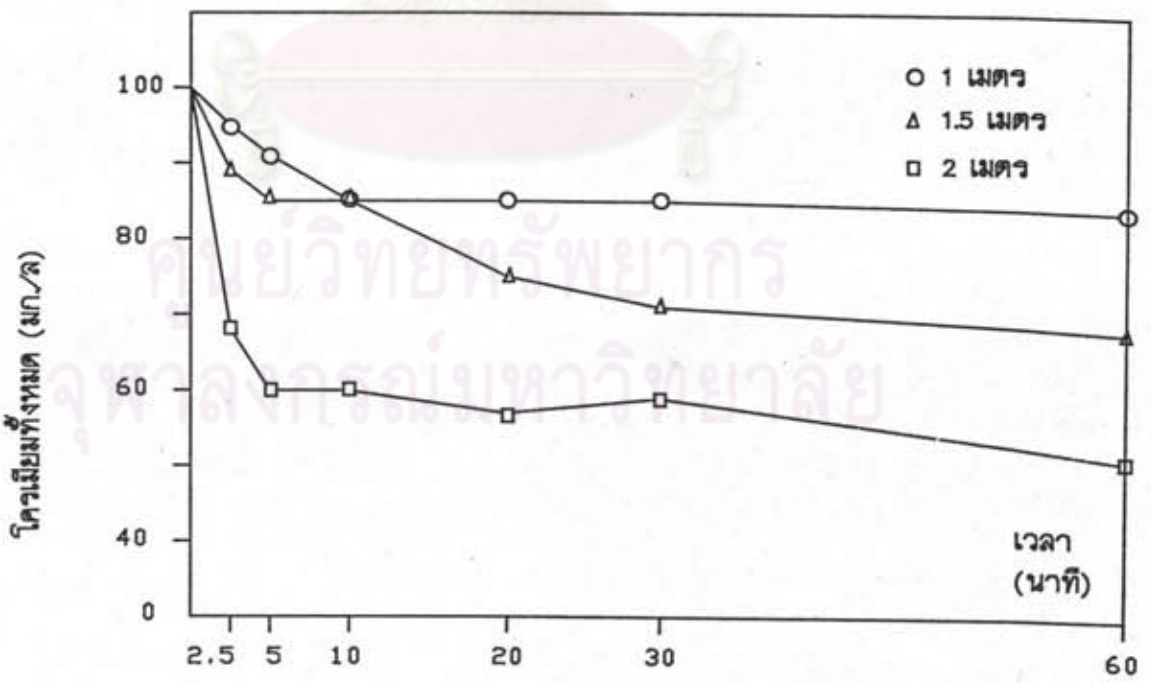
รูปที่ 4.32 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 5 มก./ล พีเอช 9.5



รูปที่ 4.33 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 10 มก./ล พีเอช 9.5

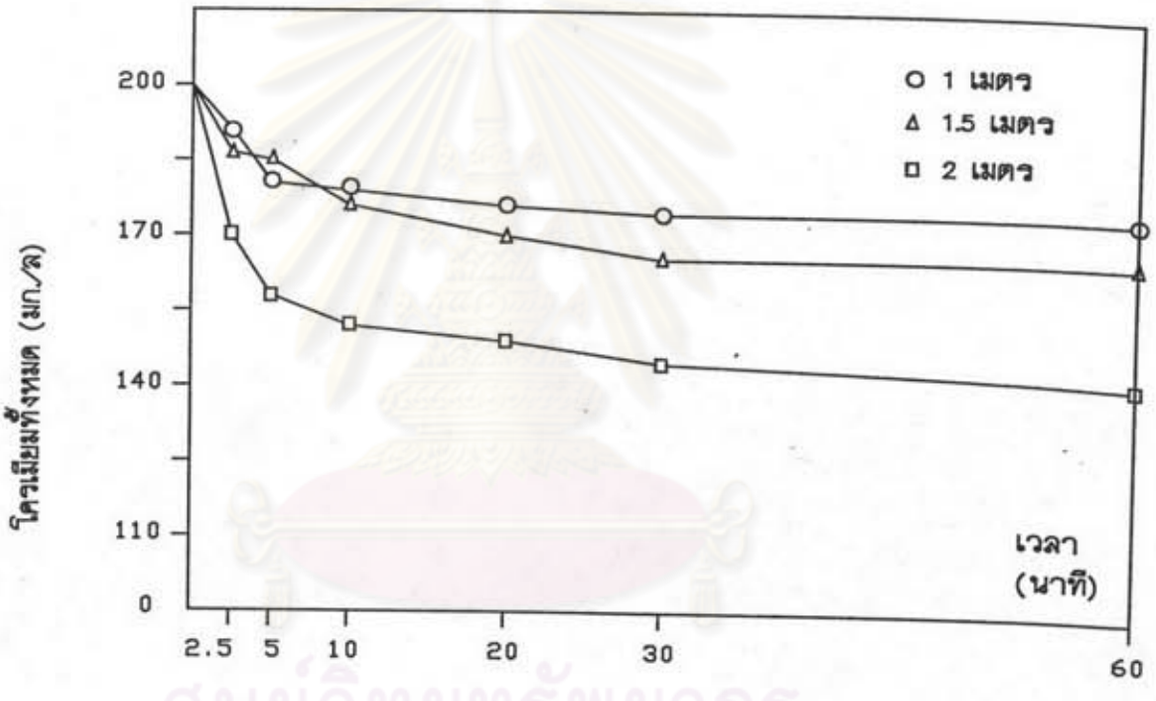


รูปที่ 4.34 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 50 มก./ล พีเอช 9.5



รูปที่ 4.35 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 100 มก./ล พีเอช 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.36 ผลของความสูงของเบดต่อการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล พีเอช 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.6 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม

จากรูปที่4.37และ 4.41 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้นโครเมียมระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับพีเอชในการทำปฏิกิริยาในแต่ละเบด โดยวัดค่าโครเมียมทั้งหมดที่เหลือหลังจากการทดลองที่เวลา 60 นาที นำมาเปรียบเทียบดูประสิทธิภาพเพื่อจะหาค่าพีเอชที่เหมาะสม และความสูงเบดในการกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด ในรูปจะแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดที่พีเอช 9.0 รองลงมาคือ พีเอช 8.5 ส่วนพีเอช 9.5 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดน้อยที่สุด

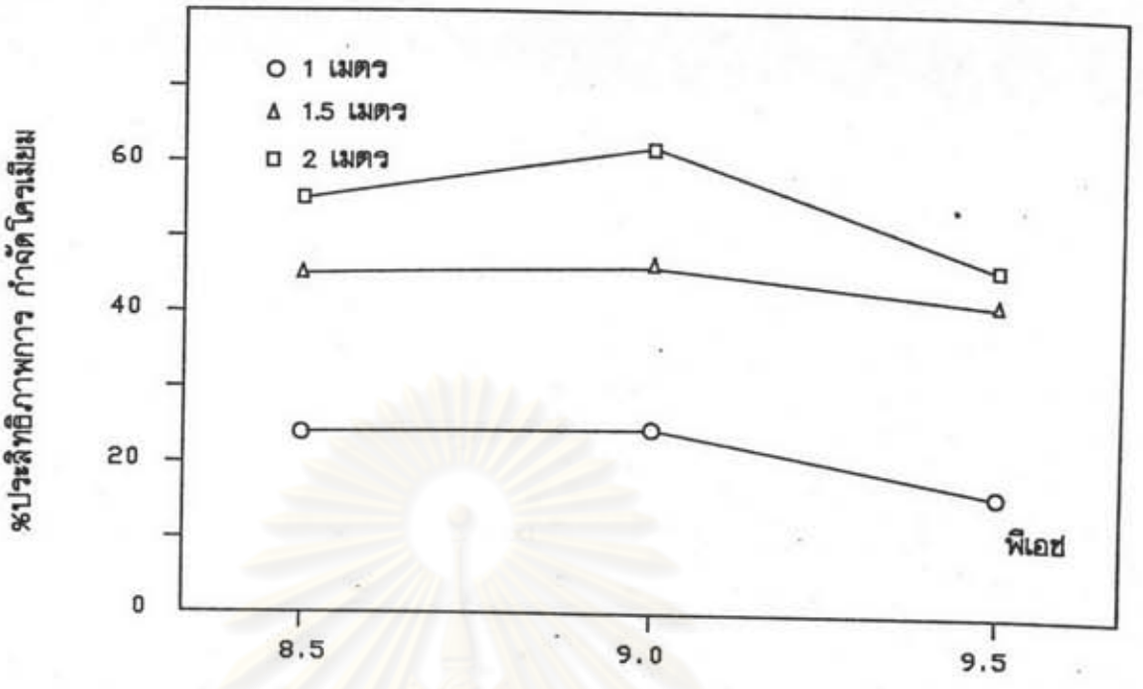
ปริมาณความเข้มข้นโครเมียมต่ำๆ จะถูกกำจัดได้ดีกว่าปริมาณความเข้มข้นโครเมียมสูงๆสำหรับความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดน้อยมากในทุกๆ เบด ส่วนความสูงก็มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดเช่นเดียวกัน กล่าวคือ

1. ที่ความสูงเบด 1 เมตร จะมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมประมาณ 10 - 25 %

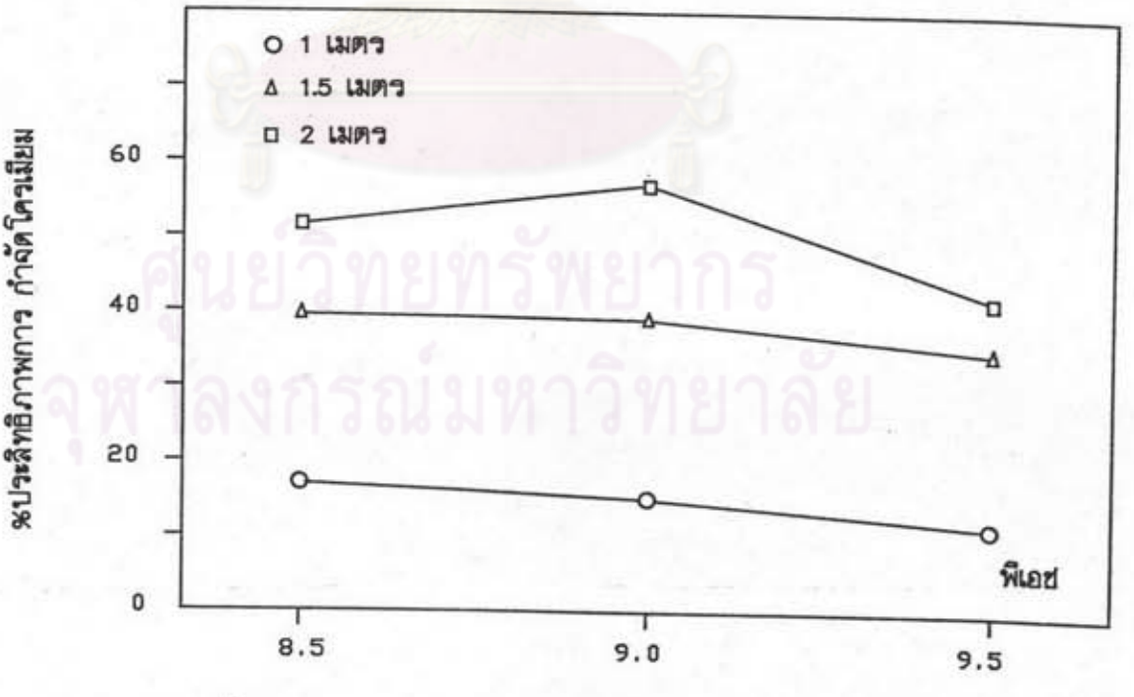
2. ที่ความสูงเบด 1.5 เมตร จะมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมประมาณ 30 - 45 %

3. ที่ความสูงเบด 2 เมตร จะมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมประมาณ 45 - 60 %

ยกเว้นที่ความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในแต่ละเบดน้อยกว่าที่กล่าวมากล่าวคือ ที่ความสูงเบด 1 , 1.5 , 2 เมตร จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด 10 - 20 %, 15 - 22 %, 25 - 30 % ตามลำดับ เนื่องจากความเข้มข้นของโครเมียมที่มากเกินที่จะกำจัดได้ที่ความสูงของเบดต่างๆซึ่งจำต้องมีการหมุนเวียนนำโครเมียมกลับมากำจัดเพื่อให้น้ำเสียมีความเข้มข้นโครเมียมเจือจางลง

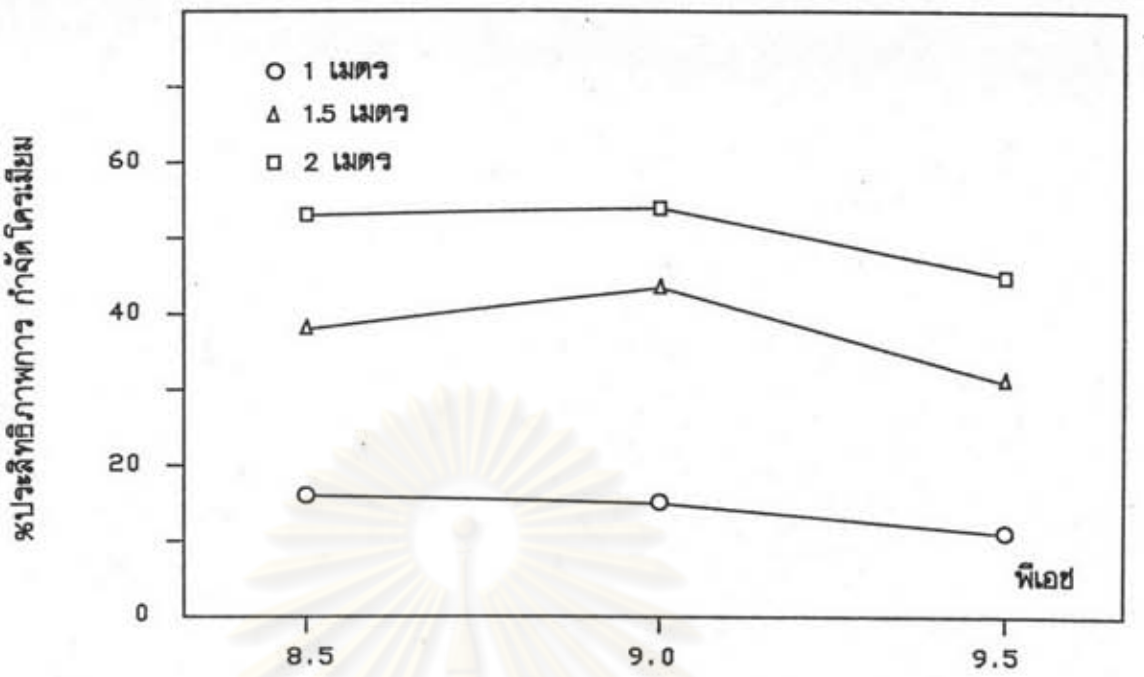


รูปที่ 4.37 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม 5 มก./ล ต่อความสูงของเบดที่พีเอช 8.5 - 9.5

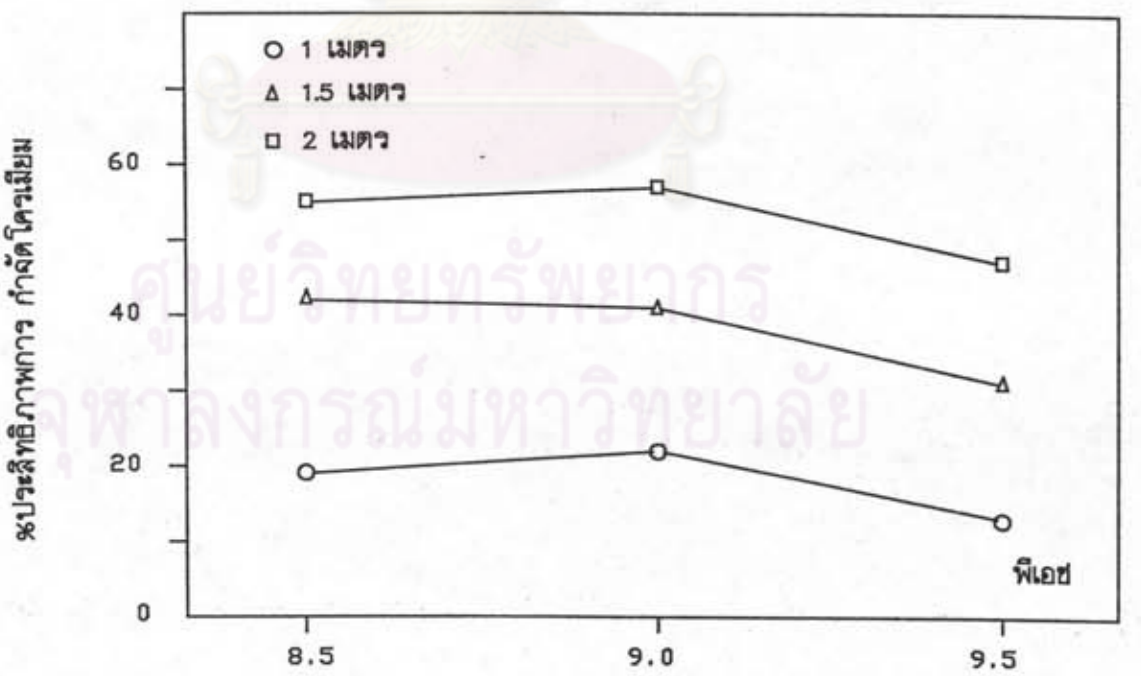


รูปที่ 4.38 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม 10 มก./ล ต่อความสูงของเบดที่พีเอช 8.5 - 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

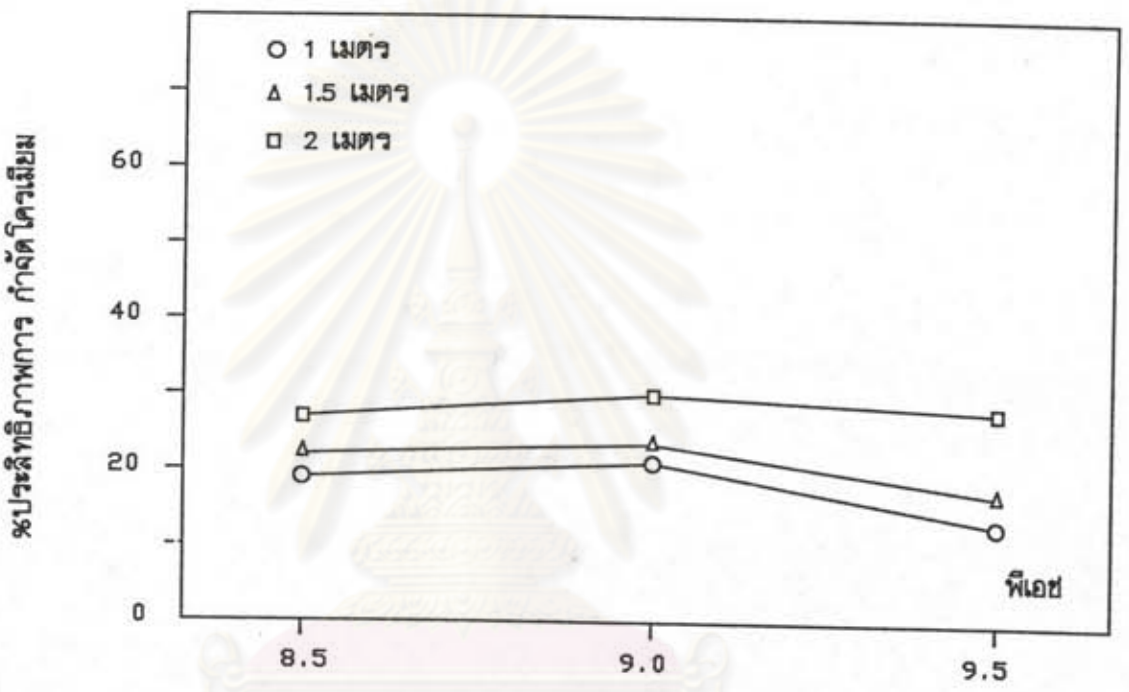


รูปที่ 4.39 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม 50 มก./ล ต่อความสูงของเบดที่พีเอช 8.5 – 9.5



รูปที่ 4.40 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม 100 มก./ล ต่อความสูงของเบดที่พีเอช 8.5 – 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.41 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม 200 มก./ล ต่อความสูงของเบดที่พีเอช 8.5 – 9.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด</u>

จากผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการตกผลึก ในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบดโดยมีโซดาไฟเป็นสารทำให้เกิดตะกอนสำหรับการทดลองนี้สรุปได้ว่า พีเอช,ความสูงของเบด และ ความเข้มข้นโครเมียม จะมีอิทธิพลต่อการกำจัดโครเมียม ดังจะกล่าวต่อไปนี้ คือ

1. พีเอช

พีเอชมีผลต่อการกำจัดโครเมียมมาก เนื่องจากพีเอชที่ใช้ทำปฏิกริยาเพื่อให้ภาวะอิ่มตัวยวดยิ่ง พีเอชที่เหมาะสมนี้จะเป็นพีเอชที่ทำให้โครเมียมเหลือน้อยที่สุด สำหรับพีเอชที่เหมาะสมโดยใช้สารละลายโซดาไฟในการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการตกผลึกในกระบวนการฟลูอิดไดซ์เบด ในการทดลองนี้ คือ พีเอช 9.0

2. ความสูงของเบด

จากการเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมที่เหลือหลังจากการทดลองในแต่ละการทดลอง พบว่า ความสูงของเบดสูงขึ้น จะสามารถกำจัดโครเมียมให้เหลือปริมาณน้อยลง จากการทดลองพบว่า ความสูงของเบด 2 เมตร จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าความสูงของเบดที่น้อยกว่า คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประมาณ 50 - 60 % ยกเว้นปริมาณความเข้มข้นโครเมียม 200 มก. / ล ที่มีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง คือ 25 - 30 %

3. ความเข้มข้นของโครเมียม

การกำจัดโครเมียมในการทดลองนี้ มีขีดจำกัดในการกำจัดปริมาณความเข้มข้นโครเมียม ตั้งแต่ 5 - 100 มก./ ล ยังมีการกำจัดอยู่ในช่วงประสิทธิภาพเดียวกัน แต่เมื่อทดลองกับความเข้มข้นโครเมียม 200 มก./ล การกำจัดในแต่ละเบด จะมีการกำจัดได้น้อยลง ดังนั้น ในการกำจัดโครเมียม 200 มก./ ล ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จะต้องมีการหมุนเวียนกลับ เพื่อให้โครเมียมจับกับไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น ความเข้มข้นของโครเมียมจึงจะลดลง