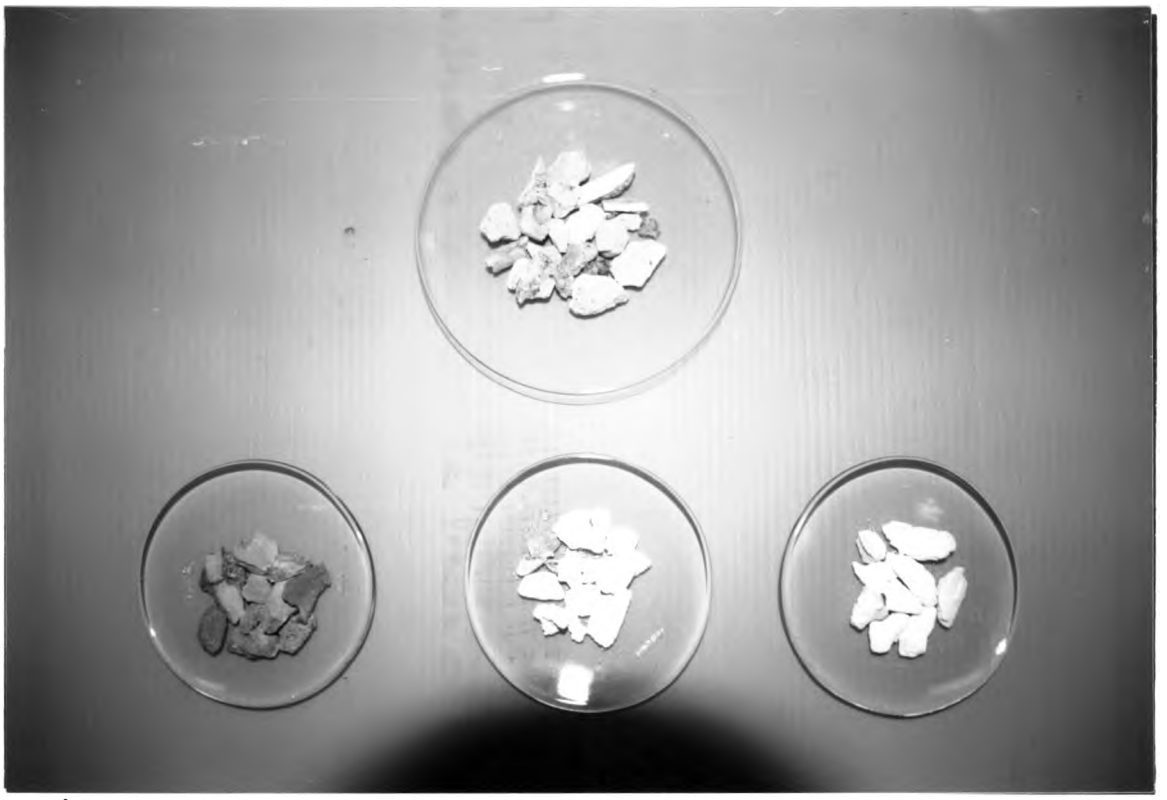
บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

แบ่งทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียม ด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมโดยนำกระดูกป่นมาเผาที่สภาวะการเผาต่างๆ ทั้งหมด 9 สภาวะ คือ ใช้อุณหภูมิการเผาที่ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง และหลังจากนั้นนำมาบดและคัดขนาดให้มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 20-40 (0.42-0.84 มิลลิเมตร) ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระดูกป่นก่อนทำการเผามีสีเหลืองและน้ำตาลอ่อนปะปนกันและมีลักษณะกระดูกหลายแบบเนื่องจากเป็นกระดูกจากหลายๆส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีลักษณะที่ต่างกัน ส่วนถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นว่า ถ่านที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส จะมีสีเทาปนดำ ส่วนถ่านกระดูกที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีสีขาว

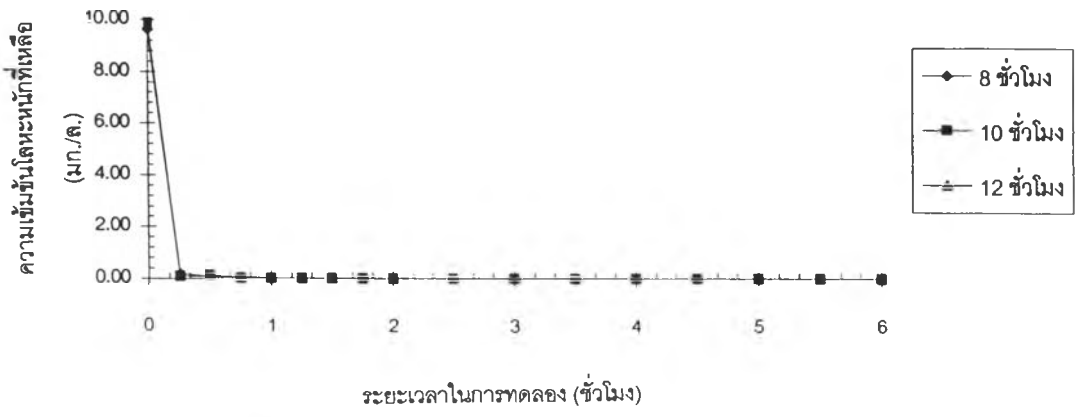
4.1.1 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดตะกั่ว

จากผลการทดลองการกำจัดตะกั่วพบว่า เมื่อใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 9.63-9.88 มิลลิกรัมต่อลิตร จนกระทั่งหมด (โดยคิดร้อยละการกำจัดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์) ได้ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนถ่านกระดูกที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียสที่ทุกระยะเวลาในการเผา ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วจากความเข้มข้นเริ่มต้น 9.63-9.89 มิลลิกรัมต่อลิตร จนกระทั่งหมดได้ภายในระยะเวลา 5 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.3-4.4 และตารางที่ ก1 เมื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชหลังการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากที่สุด คือจากค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5.02-5.09 เปลี่ยนแปลงเป็น 5.61-5.67 โดยที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกัน คือเปลี่ยนแปลงจากค่าพีเอชเริ่มต้น 5.02-5.09 เป็น 5.07-5.24 และเปลี่ยนแปลงพีเอชจาก 4.98-5.06 เป็น 5.07-5.24 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ ตารางที่ ก1 ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมด ปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ 1 กรัมต่อลิตรตัวอย่างเป็นปริมาณที่สูงเกินไป เนื่องจากสามารถกำจัดตะกั่วจนหมดได้ภายในระยะเวลาที่รวดเร็วหรือปริมาณดังกล่าวอาจจะสามารถกำจัดตะกั่วได้ปริมาณสูงกว่านี้ ดังนั้นจึงทำการทดลองอีกครั้งโดยปรับเปลี่ยนปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ให้ลดน้อยลงเป็น 0.2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง

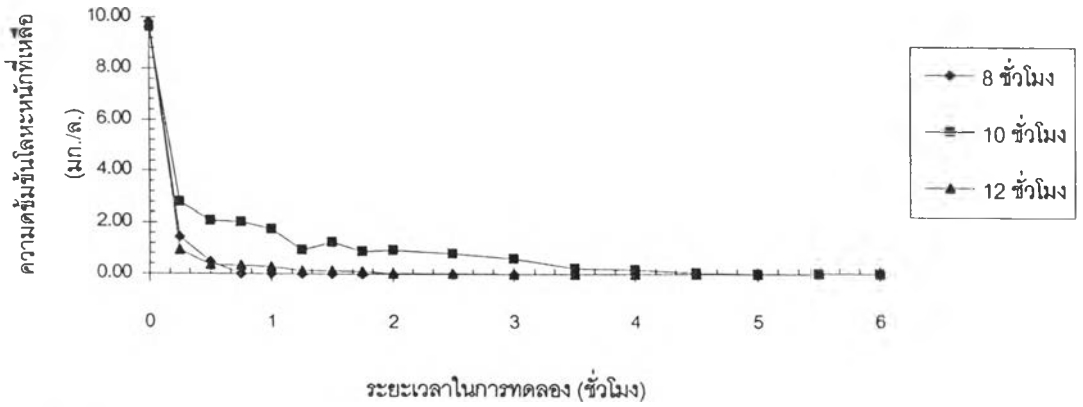


รูปที่ 4.1 กระดูกป่นก่อน (ส่วนบน) และหลังจากที่เผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส (ส่วนล่างจากซ้ายไปขวา)

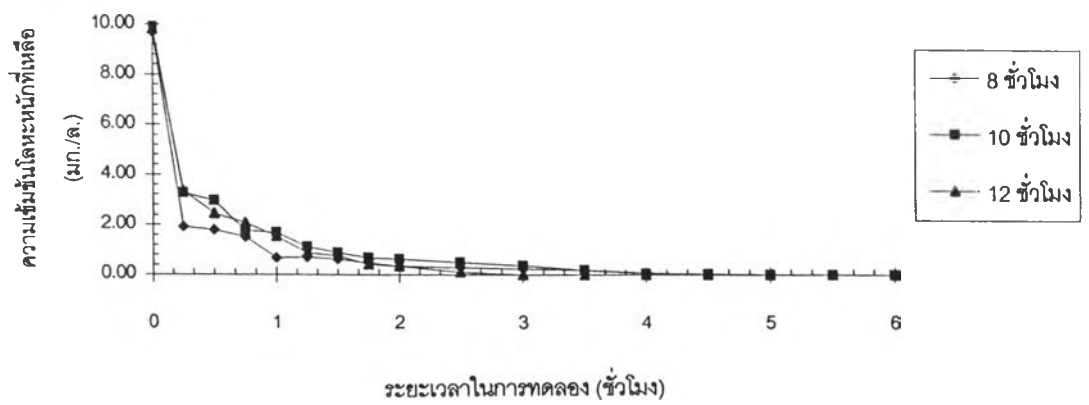
รูปที่ 4.2 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ขนาด 0.42-0.84 มิลลิเมตร (จากซ้ายไปขวา)



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

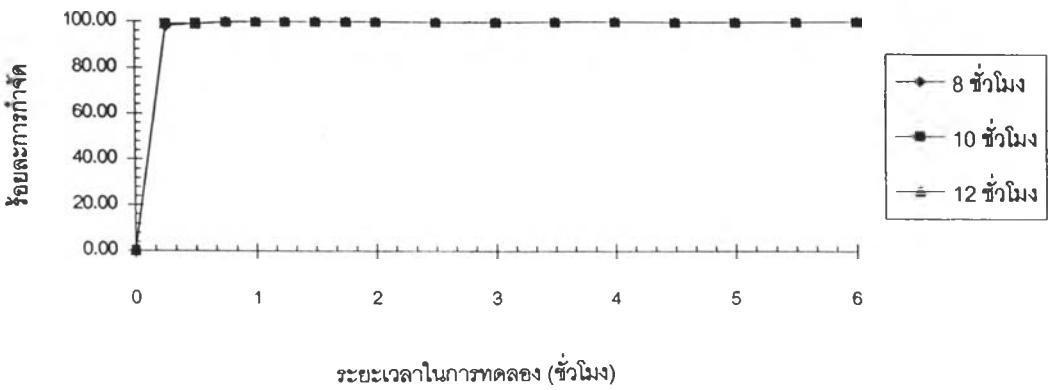


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

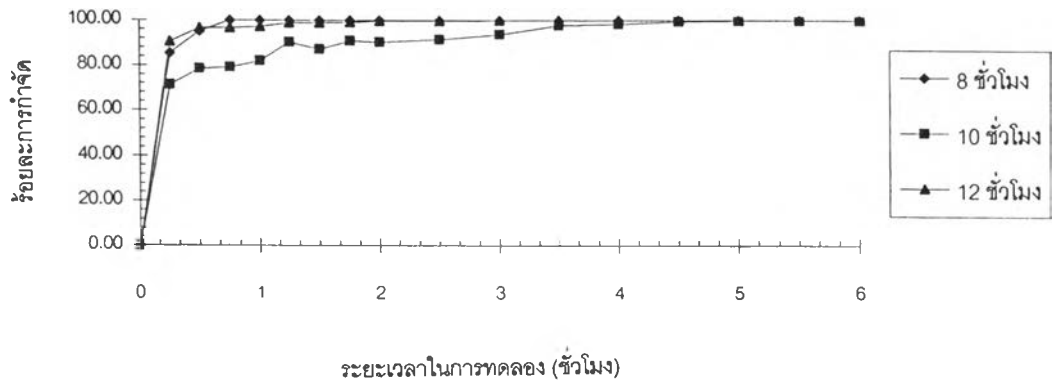


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

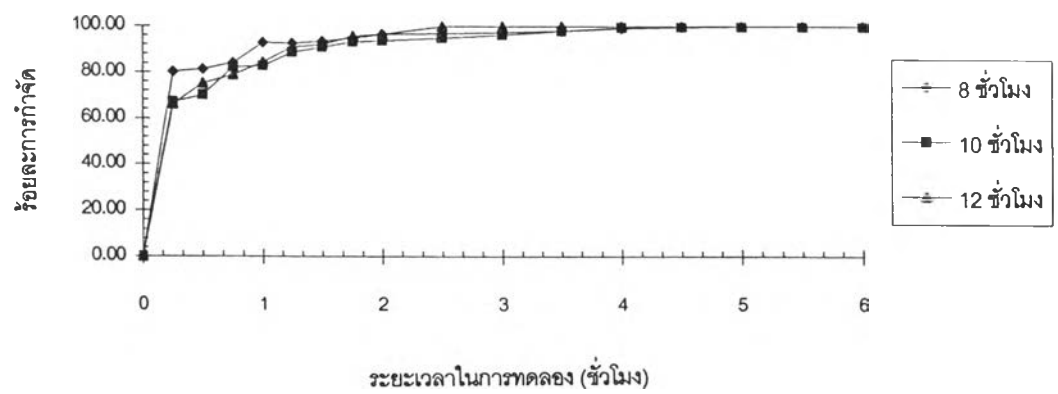
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่าง ๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

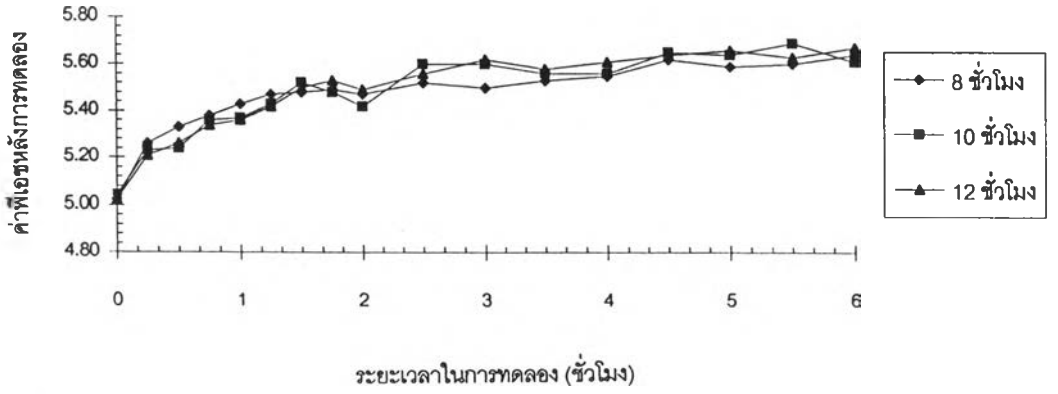


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

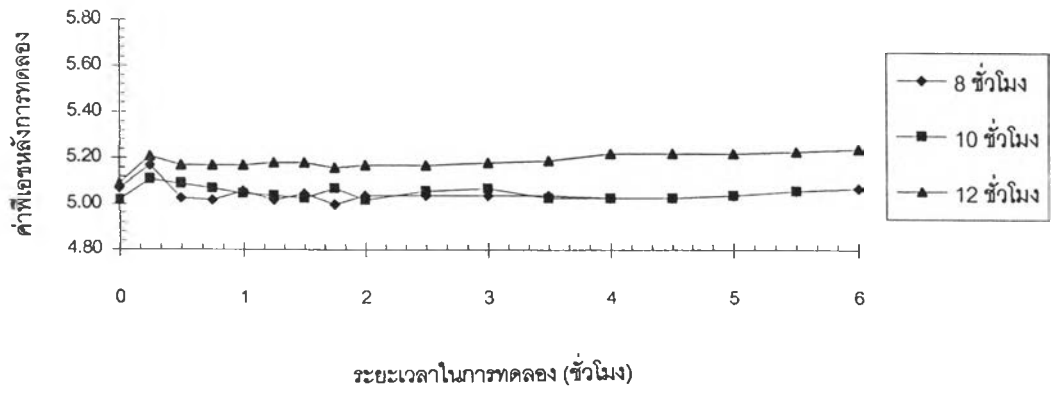


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

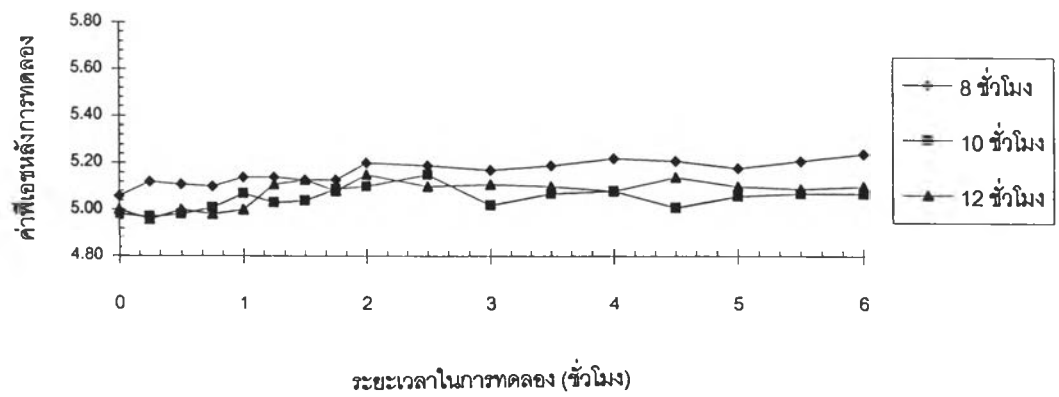
รูปที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



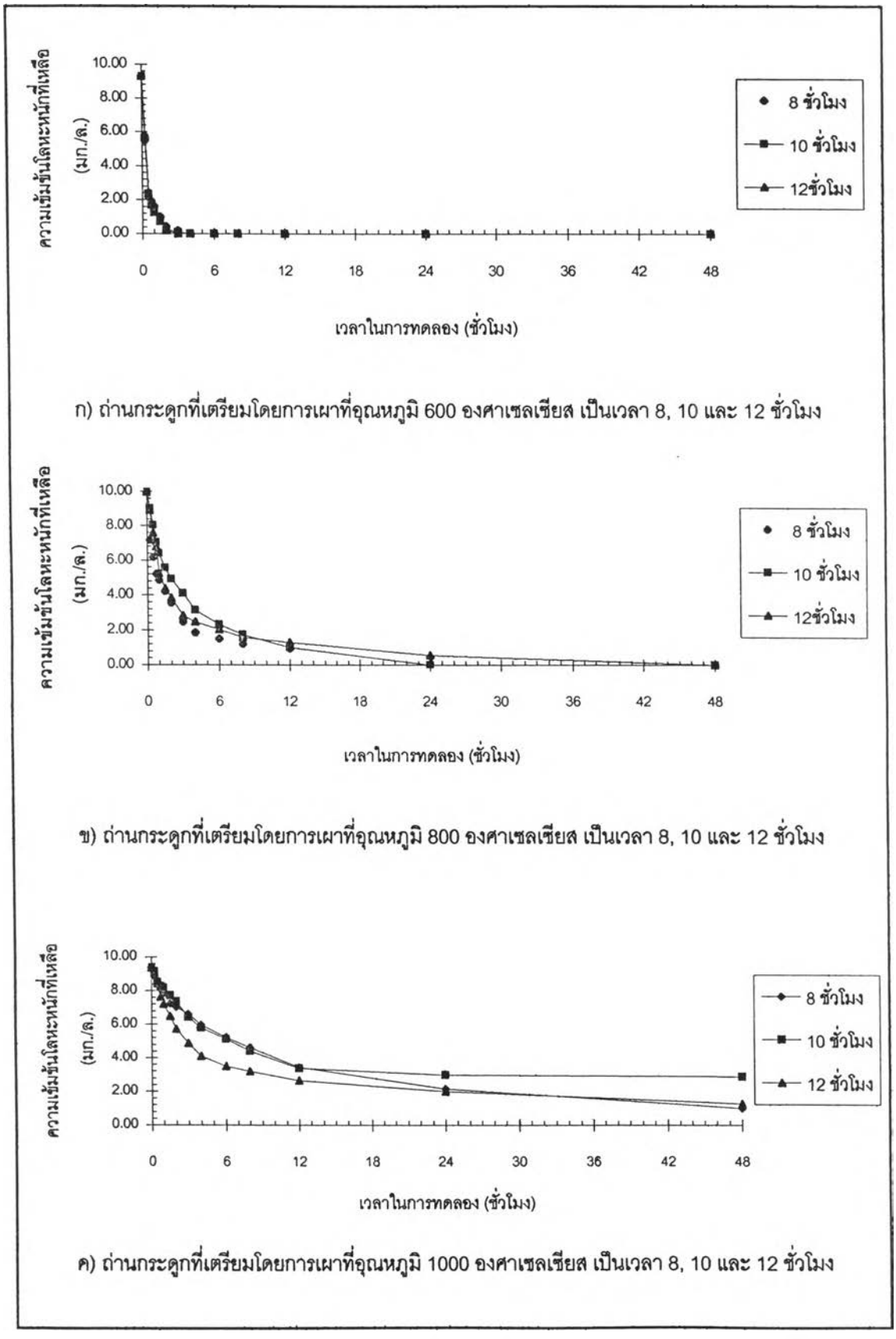
ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะการเตรียมต่างๆ

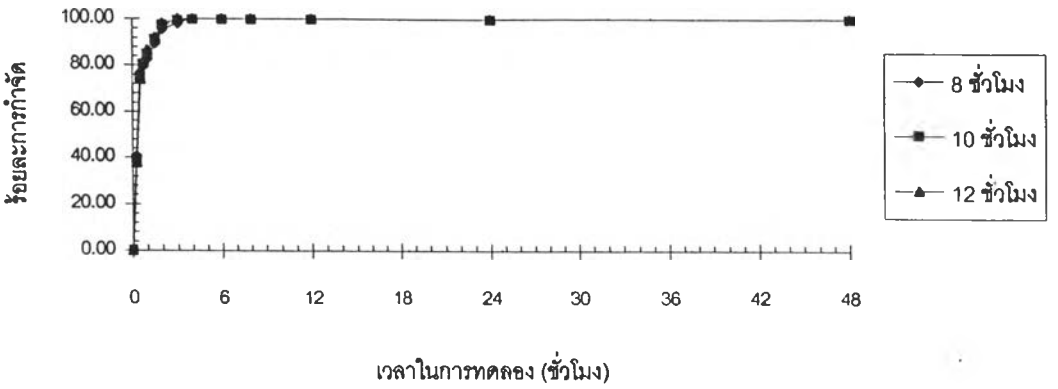
เมื่อใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสที่ทั้ง 3 ระยะเวลาการเผา มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงสุด โดยสามารถกำจัดตะกั่วจากความเข้มข้น 9.28 มิลลิกรัมต่อลิตรจนกระทั่งหมดซึ่งคิดเป็นร้อยละการกำจัดทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ได้ภายใน 4 ชั่วโมง และถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วรองลงมาคือ สามารถกำจัดตะกั่วจากความเข้มข้น 9.95 มิลลิกรัมต่อลิตรจนกระทั่งหมดได้ภายใน 48 ชั่วโมง และถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิการเผา 1000 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการกำจัดต่ำสุดคือ สามารถกำจัดตะกั่วจากความเข้มข้น 9.35 มิลลิกรัมต่อลิตรจนเหลือ 1.01-2.87 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็นร้อยละการกำจัด 69.3-89.2 เปอร์เซ็นต์) ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.6-4.7 และตารางที่ ก2 เมื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชหลังการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากที่สุด คือจากค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4.98 เปลี่ยนแปลงเป็น 5.20-5.35 โดยที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียสมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกัน คือเปลี่ยนแปลงจากค่าพีเอชเริ่มต้น 5.01 เป็น 5.09-5.18 และเปลี่ยนแปลงพีเอชจาก 5.05 เป็น 5.10-5.14 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ ตารางที่ ก2

4.1.2 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดแคดเมียม

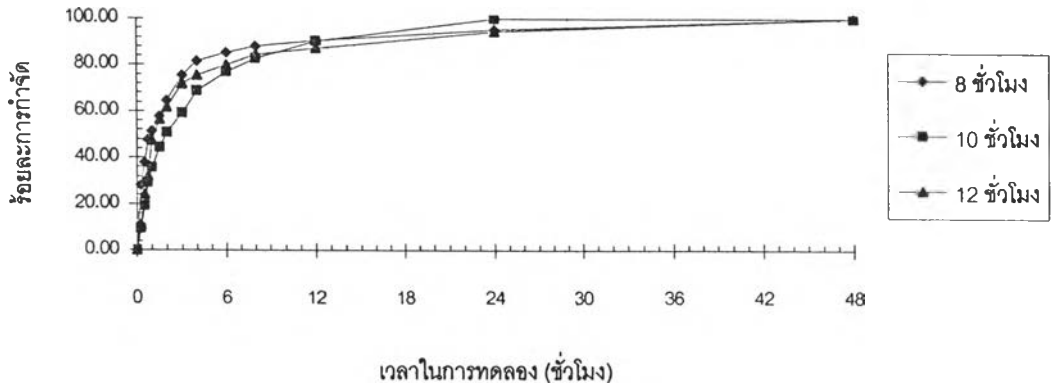
จากผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมพบว่า เมื่อใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิการเผาอื่นๆ โดยถ่านกระดูกสามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 9.81 มิลลิกรัมต่อลิตร จนกระทั่งเหลือ 0.57-1.43, มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยคิดร้อยละการกำจัดเป็น 85.42-94.19) ภายในระยะเวลา 48 ชั่วโมง โดยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิในการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาในการเผา 12 ชั่วโมงจะให้การกำจัดสูงสุดกว่าทุกๆสภาวะคือมีร้อยละการกำจัดเป็น 94.19 เปอร์เซ็นต์ และถ่านกระดูกที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดได้รองลงมาคือ สามารถกำจัดแคดเมียมได้จากความเข้มข้น 9.06 มิลลิกรัมต่อลิตรจนเหลือ 7.04-8.01 มิลลิกรัมต่อลิตร (โดยคิดร้อยละการกำจัดเป็น 11.59-16.45 เปอร์เซ็นต์) และที่ถ่านกระดูกที่อุณหภูมิการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสมีความสามารถในกำจัดแคดเมียมได้ต่ำสุดคือ กำจัดแคดเมียมจากความเข้มข้นเริ่มต้น 8.72 มิลลิกรัมต่อลิตร จนเหลือ 7.72-7.81 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดร้อยละการกำจัดเป็น 10.44-11.47 เปอร์เซ็นต์) ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.10 และตารางที่ ก3 เมื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าพี



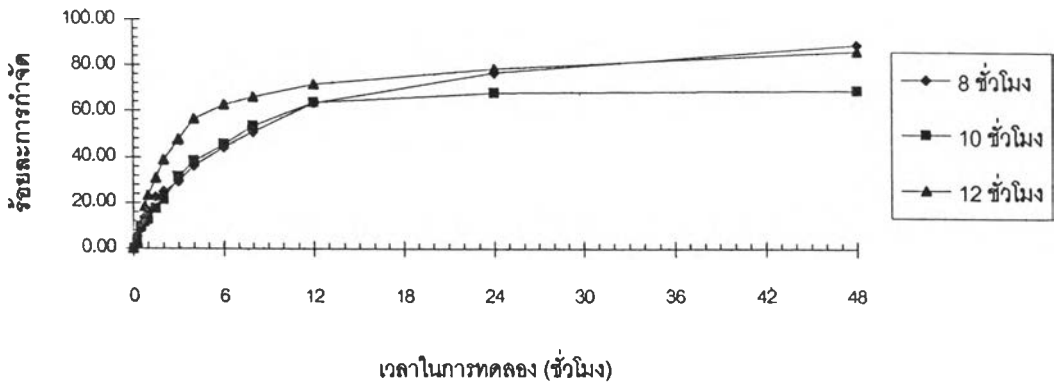
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.2 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

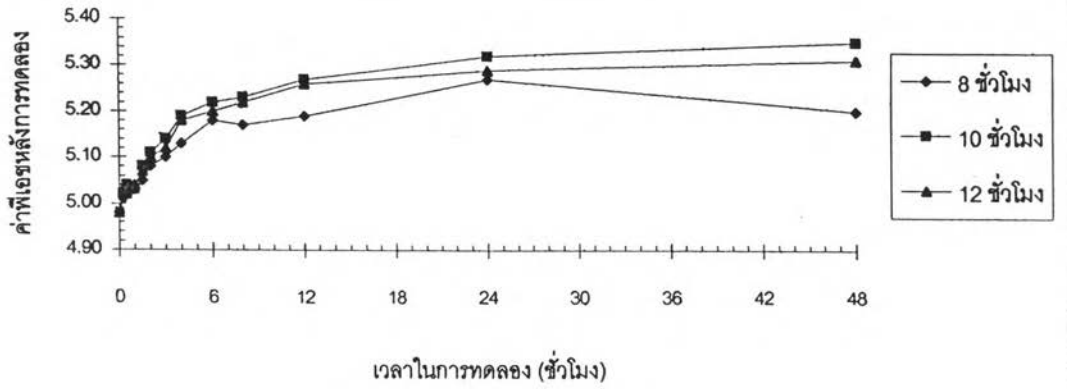


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

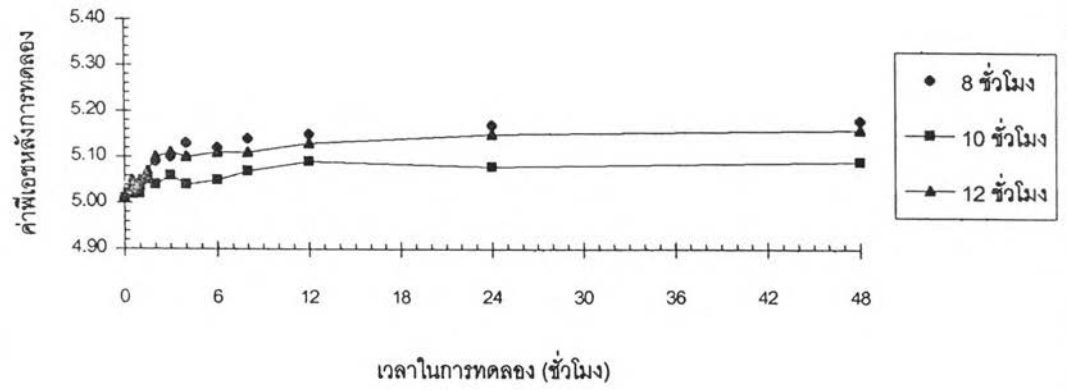


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

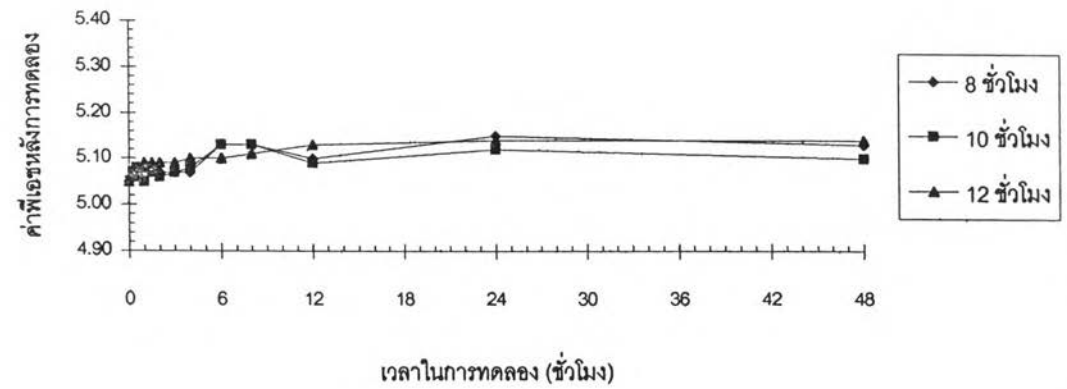
รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.2 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่าง ๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

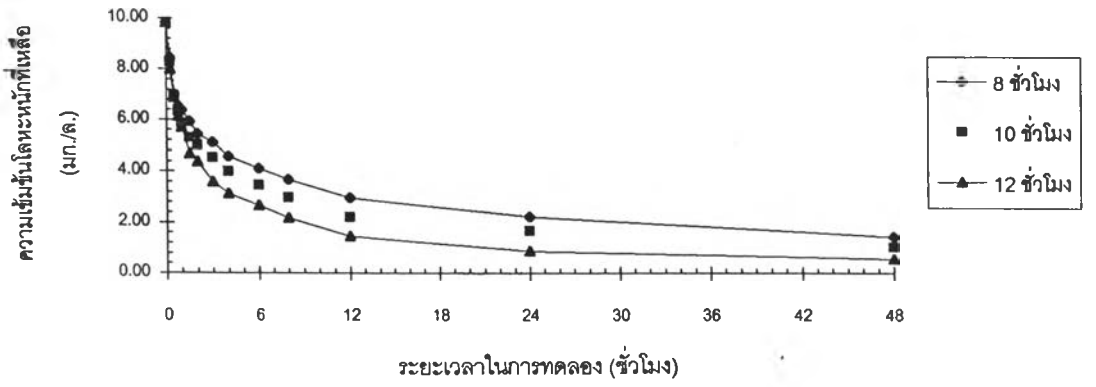


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

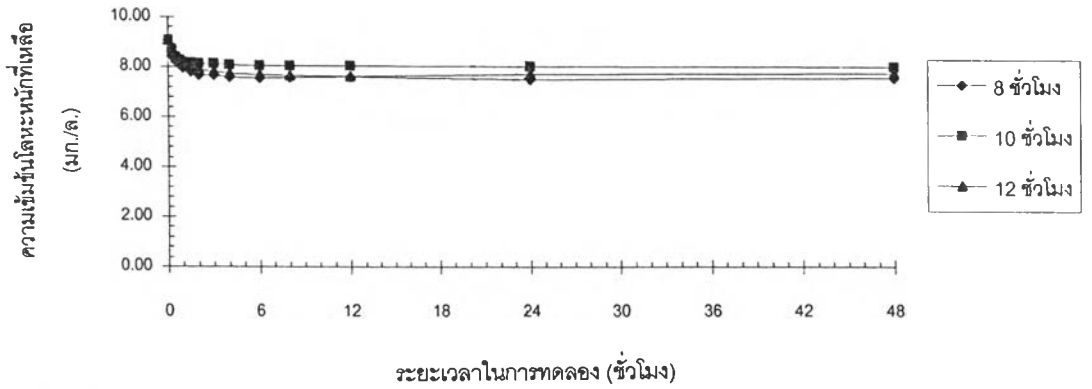


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

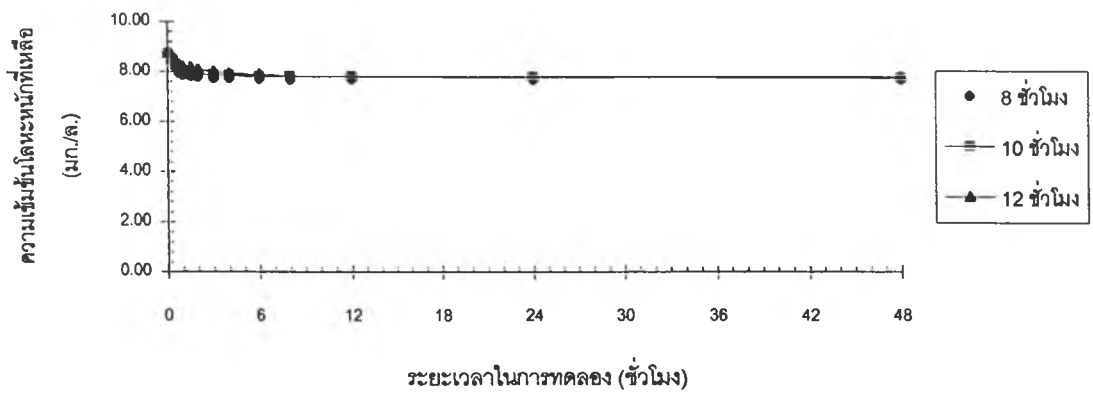
รูปที่ 4.8 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.2 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

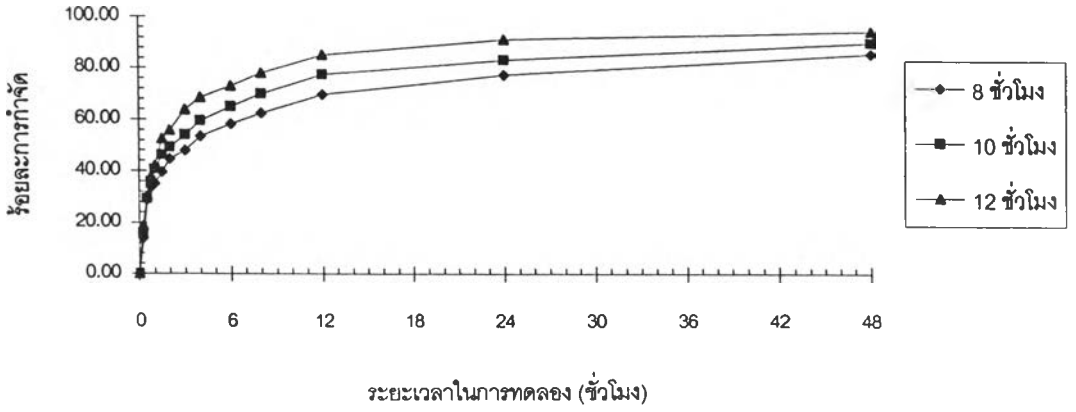


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

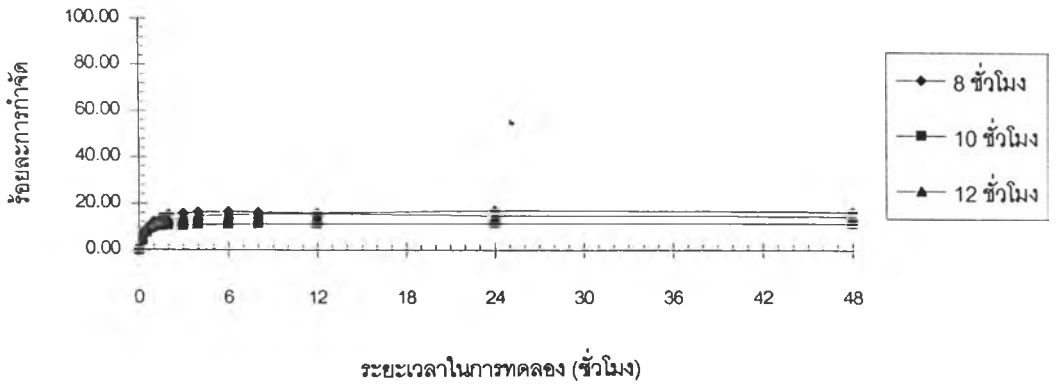


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

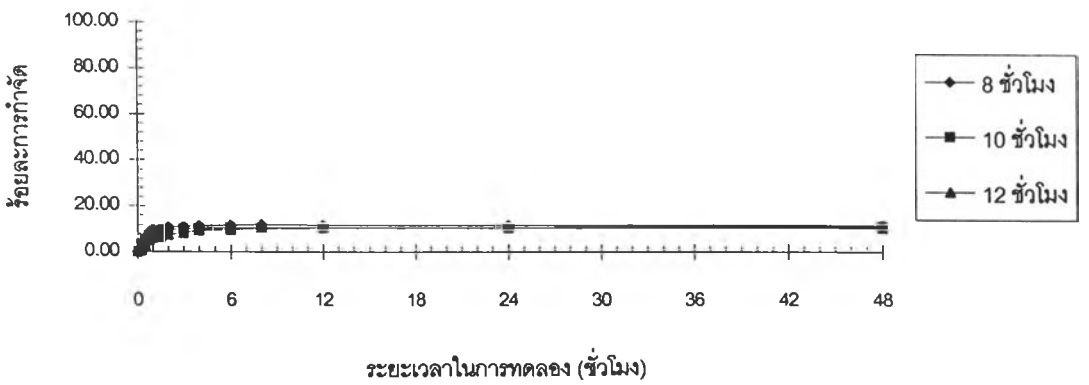
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดของแคดเมียมในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ

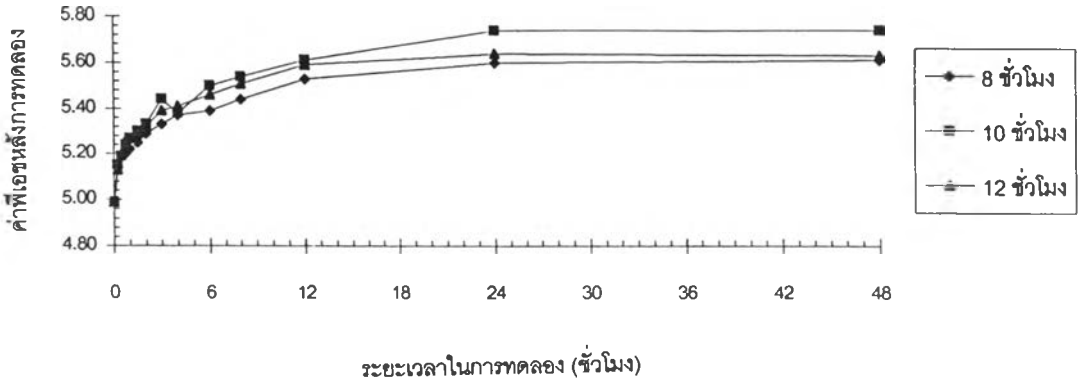
เอชหลังการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากที่สุด คือจากค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 4.99 เปลี่ยนแปลงเป็น 5.61-5.74 โดยที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ใกล้เคียงกัน คือเปลี่ยนแปลงจากค่าพีเอชเริ่มต้น 5.04 เป็น 5.32-5.34 และเปลี่ยนแปลงพีเอชจาก 5.02 เป็น 5.31-5.32 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ ตารางที่ ก3

4.1.3 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดโครเมียม

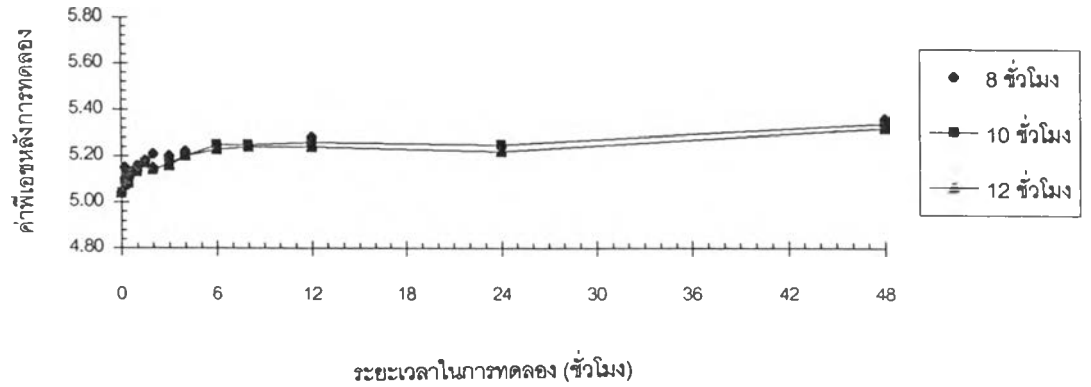
จากผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมดังแสดงในรูปที่ 4.12-4.13 และตารางที่ ข 3 พบว่าที่ถ่านกระดูกที่ทุกสภาวะการเตรียมสามารถกำจัดโครเมียมได้น้อยมาก คือสามารถกำจัดโครเมียมจากความเข้มข้น 9.98-10.09 มิลลิกรัมต่อลิตรจนเหลือ 9.28-9.97 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็นร้อยละการกำจัดได้เพียง 0.40-9.39 เปอร์เซ็นต์) ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชหลังการทดลองพบว่า ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสพบการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมากที่สุด คือจากค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3.01-3.03 เปลี่ยนแปลงเป็น 4.85-4.94 โดยที่ถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชจาก 2.98-3.05 และ 3.05-3.09 เป็น 4.15-4.37 และ 4.29-4.38 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ ก4

4.1.4 สรุปผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสม

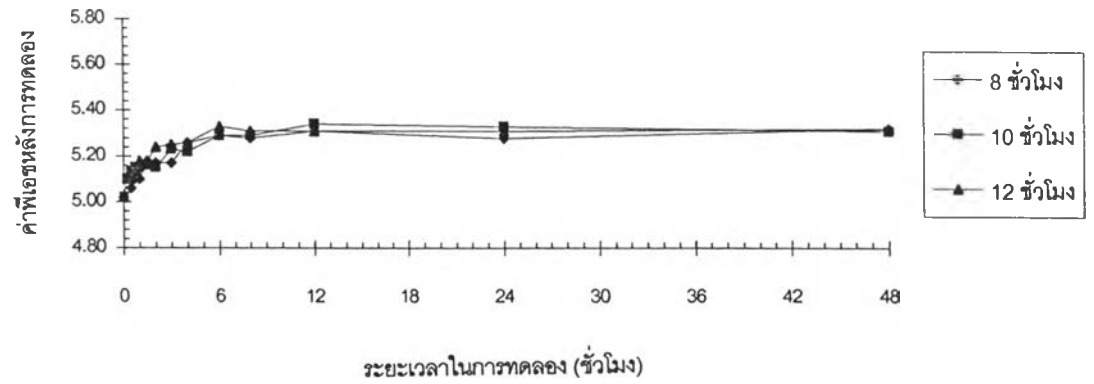
จากผลการทดลองทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า ถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสจะมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้สูงกว่าที่อุณหภูมิการเผา 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังการศึกษาของ Phantumvanit P. และ LeGeros RZ. (1997) ได้สรุปว่า เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจะทำให้ผลึกขององค์ประกอบถ่านกระดูก (crystallinity) มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง แต่ที่ระยะเวลาในการเผาพบว่าที่ทั้งเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมงในแต่ละอุณหภูมิการเผามีความสามารถในการกำจัดค่อนข้างใกล้เคียงกันจนถือว่าไม่เป็นนัยสำคัญ ซึ่งถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งตะกั่วและแคดเมียมสูงที่สุดจากทุกสภาวะการเตรียม โดยจะมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าแคดมียมคือ มีความสามารถในการกำจัดเป็น 46.4 และ 9.24 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกตามลำดับ จึงเลือกถ่านกระดูกที่เตรียมที่สภาวะดังกล่าวในการศึกษาขั้นตอนต่อไป ส่วนในการกำจัดแคดเมียมจาก



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

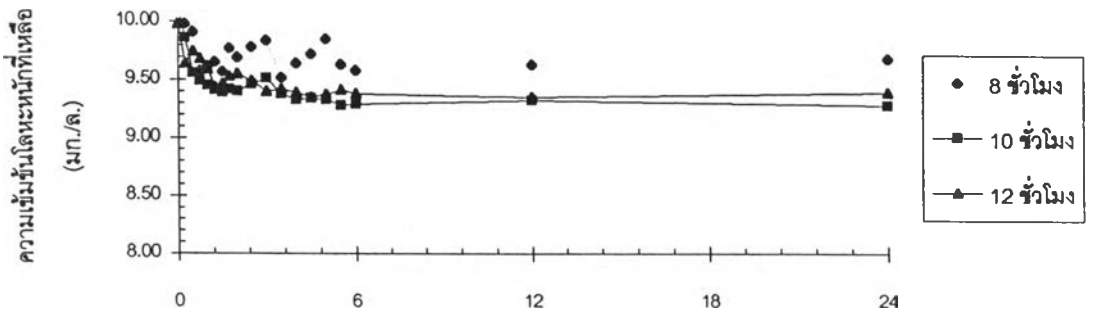


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

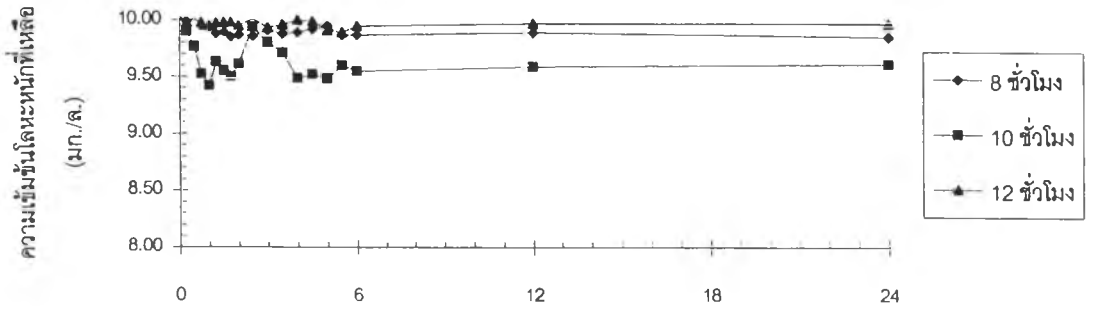


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

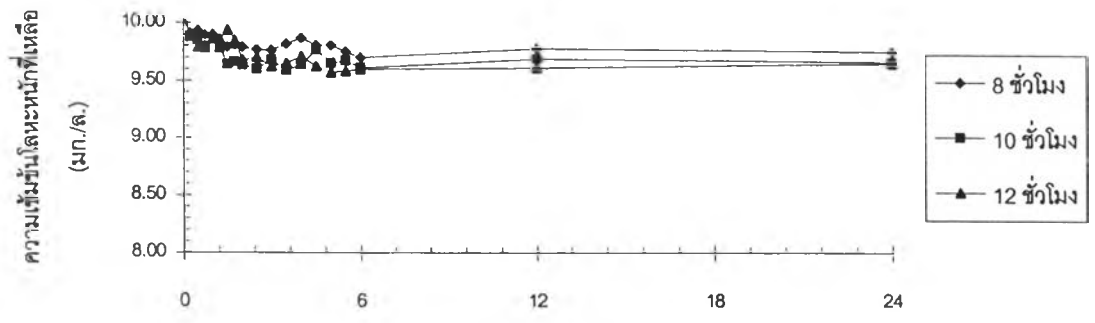
รูปที่ 4.11 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นแห่กับ5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะการเตรียมต่าง ๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

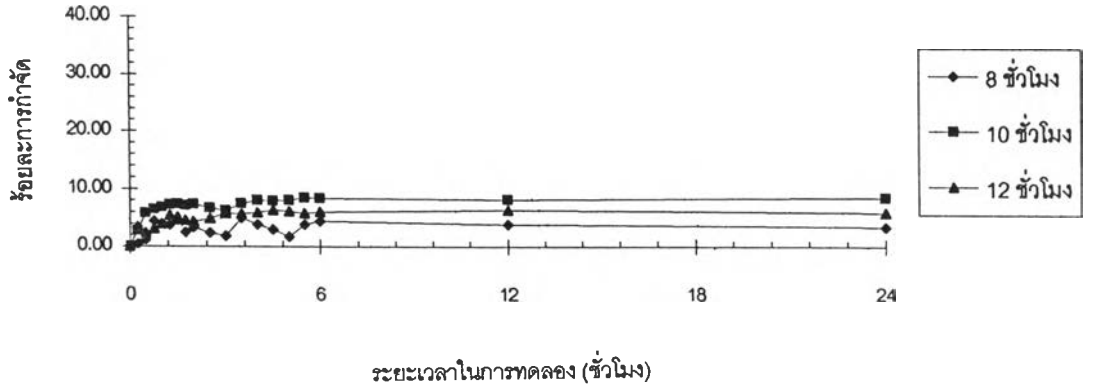


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

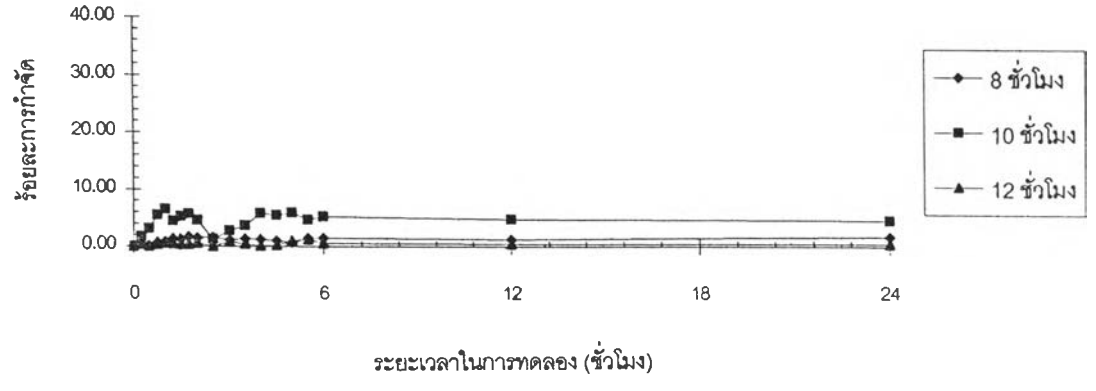


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

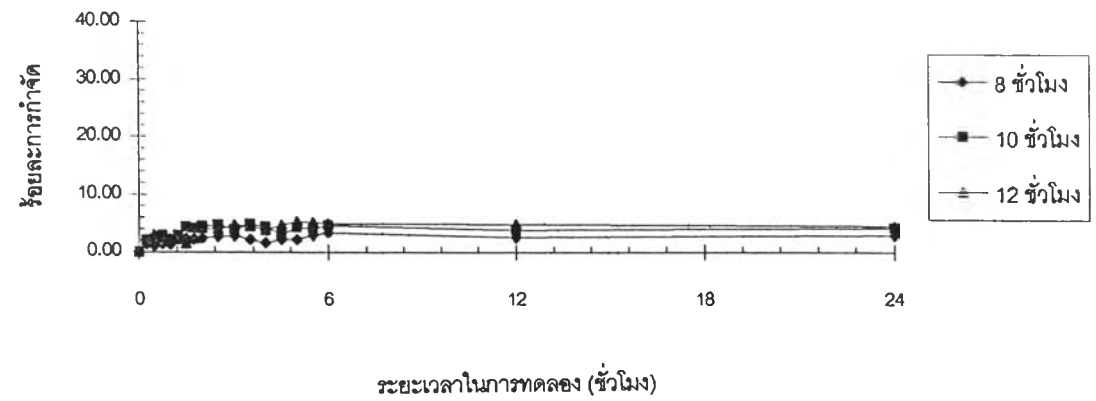
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่างๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

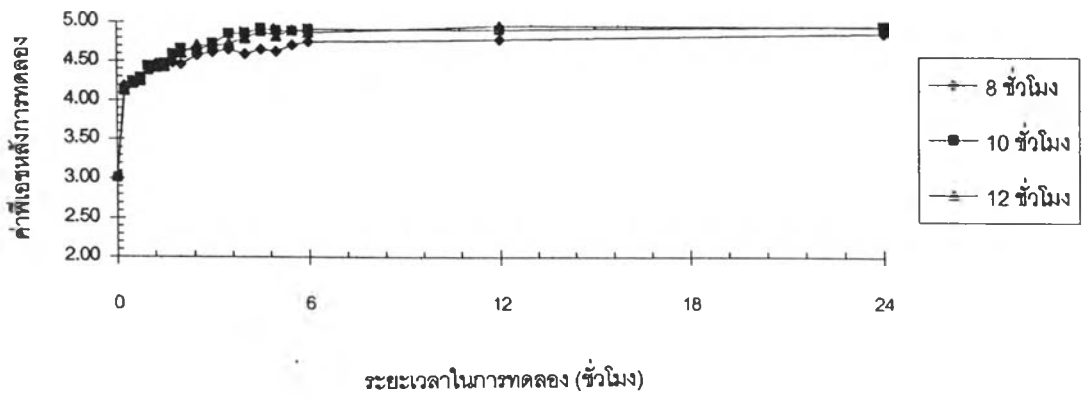


ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

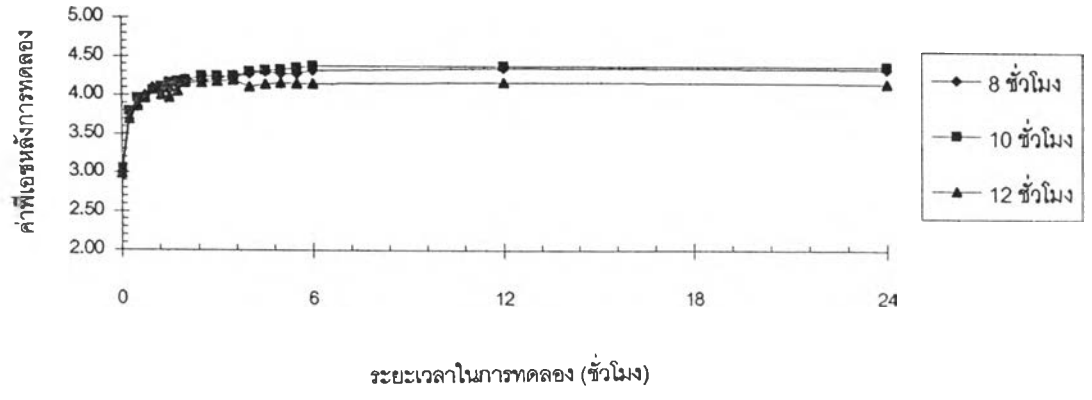


ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

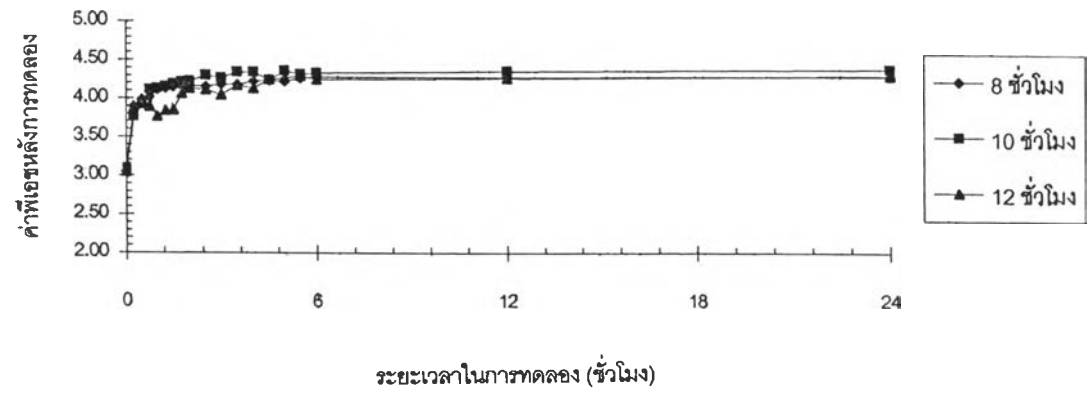
รูปที่ 4.13 ร้อยละการกำจัดของโครเมียมในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่างที่สภาวะการเตรียมต่าง ๆ



ก) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



ข) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง



ค) ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8, 10 และ 12 ชั่วโมง

รูปที่ 4.14 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดโครเมียมความเข้มข้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะการเตรียมต่างๆ

ผลการทดลองพอจะแสดงได้ว่าถ่านกระดูกไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้ จึงไม่ทำการทดลองการกำจัดโครเมียมในขั้นตอนต่อไป

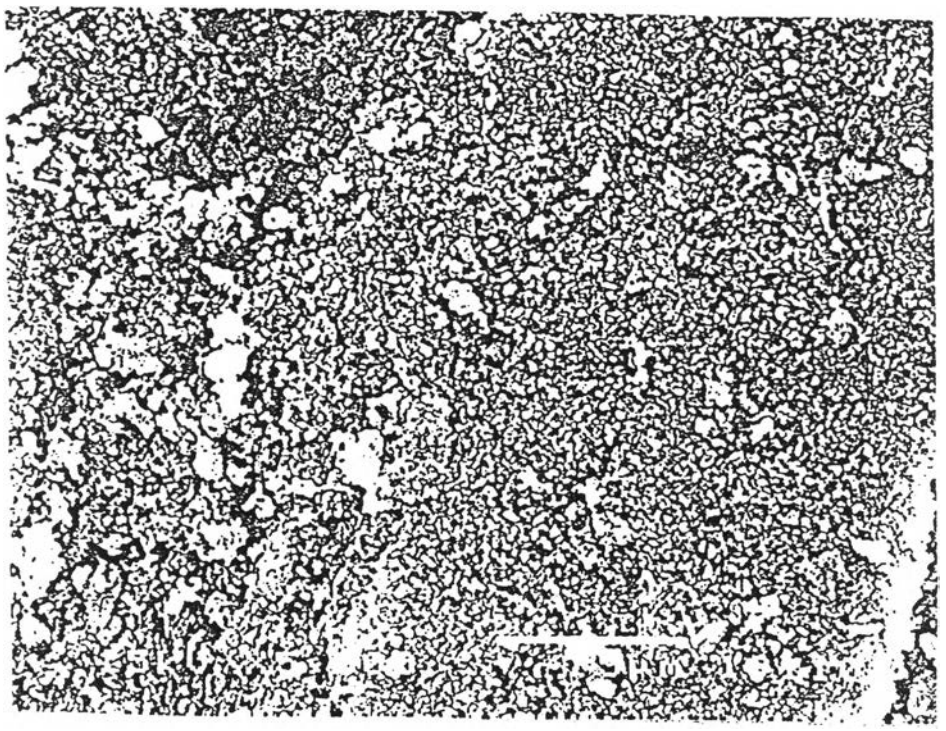
ซึ่งจากผลของการวิเคราะห์โครงสร้างของถ่านกระดูกก่อนและหลังการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยวิธี XRD ดังแสดงในภาคผนวก ฉ พบว่า ถ่านกระดูกก่อนการทดลองมีโครงสร้างเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ (calcium hydroxyapatite)หรือแคลเซียมฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ (calcium phosphate hydroxide) ส่วนถ่านกระดูกภายหลังการกำจัดตะกั่วจะมีโครงสร้างเป็นลีดฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ (lead phosphate hydroxide) ซึ่งทำให้สามารถอธิบายได้ว่าเหตุที่ถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมียมได้เนื่องจาก ที่พีเอชเริ่มต้น 5 ตะกั่วและแคดเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป Pb^{2+} และ Cd^{2+} ซึ่งจะทำการแลกเปลี่ยนประจุกับ Ca^{2+} ในโครงสร้างของถ่านกระดูกดังสมการข้างใต้นี้

$$6Pb^{2+} + Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \longrightarrow Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 6Ca^{2+}$$

$$6Cd^{2+} + Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \longrightarrow Cd_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 6Ca^{2+}$$

ดังนั้นจึงอาจจะสรุปได้ว่าการดูดติดผิวของตะกั่วและแคดเมียม (ซึ่งอาจใช้เป็นตัวแทนของประจุบวก) ด้วยถ่านกระดูกดังกล่าวจะมีการดูดติดผิวทางเคมีหรือแบบเกิดพันธะทางเคมีกับตัวกลาง (chemisorption) ส่วนโครเมียมที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 3 โครเมียมจะอยู่ในรูปของ $Cr_2O_7^-$ ซึ่งเป็นประจุลบ จึงไม่สามารถเกิดพันธะเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ดังเช่นตะกั่วและแคดเมียม แต่จากผลการศึกษาของ GD Irvine และ Mj Knowles (1997) พบว่าถ่านกระดูกที่ผลิตทางการค้าชื่อ Brimac 216 มีคุณสมบัติสามารถกำจัดโลหะหนักได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ เนื่องจากถ่านกระดูกมีความสามารถในการดูดติดผิวทั้งแบบกายภาพ (phisisorption)คือมีการดูดติดเข้าไปในโครงสร้างรูพรุน และแบบทางเคมี (chemisorption) ซึ่งจะเห็นว่าผลจะขัดแย้งกันในส่วนของแคดเมียมซึ่งน่าจะสามารถกำจัดได้ด้วยการดูดติดผิวทางกายภาพ แต่เมื่อดูจากภาพ SEM ของถ่านกระดูกที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 150 และ 5000 เท่าจะเห็นว่ามีช่องว่างและรูพรุนน้อย และผลของพื้นที่ผิวทั้งหมดของถ่านกระดูกที่เตรียมดังแสดงในภาคผนวก ช จะมีค่าเพียง 2.9636 ตารางเมตรต่อกรัมซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับ ถ่านกระดูก Brimac 216 ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดสูงถึง 100 ตารางเมตรต่อกรัม (Irvine GD. และ Knowles Mj., 1997) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ผิวแตกต่างกันมากอาจจะเกิดจากรายละเอียดของขั้นตอนการผลิตถ่านกระดูก

รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 150 เท่า



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซีย เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ส่วนสาเหตุที่พีเอชภายหลังการทดลองมีค่าที่สูงขึ้นนั้น เนื่องเมื่อเติมถ่านกระดูกซึ่งมีโครงสร้างเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ลงในน้ำตัวอย่าง แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทท์บางส่วนจะละลายน้ำ ทำให้ค่าพีเอชในน้ำสูงขึ้นนั่นเอง

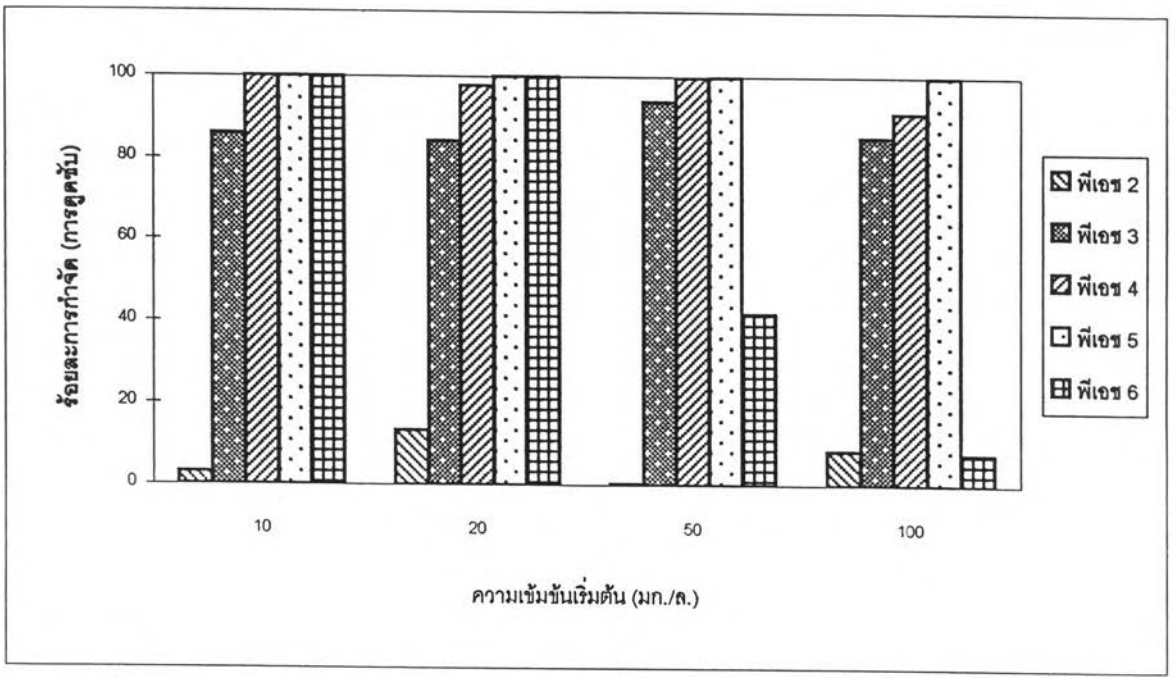
สำหรับเวลาที่เหมาะสมเลือกใช้สำหรับการกำจัดโลหะหนักที่จะใช้การทดลองในส่วนต่อไป จากผลการทดลองในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และโครเมียมจากข้างต้น สังเกตได้ว่าความเข้มข้นของโลหะหนักจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาแรกๆ หลังจากนั้นความเข้มข้นของโลหะหนักจะค่อนข้างคงที่ โดยที่เวลาที่สภาวะสมดุลในการกำจัดจะเป็นเวลาที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ 90 เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดทั้งหมด ซึ่งสำหรับตะกั่วจะเลือกใช้เวลาที่ 12 ชั่วโมงเป็นเวลาที่เหมาะสมแคดเมียมจะเลือกใช้เวลาที่ 24 ชั่วโมง

4.2 ผลการศึกษาของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก

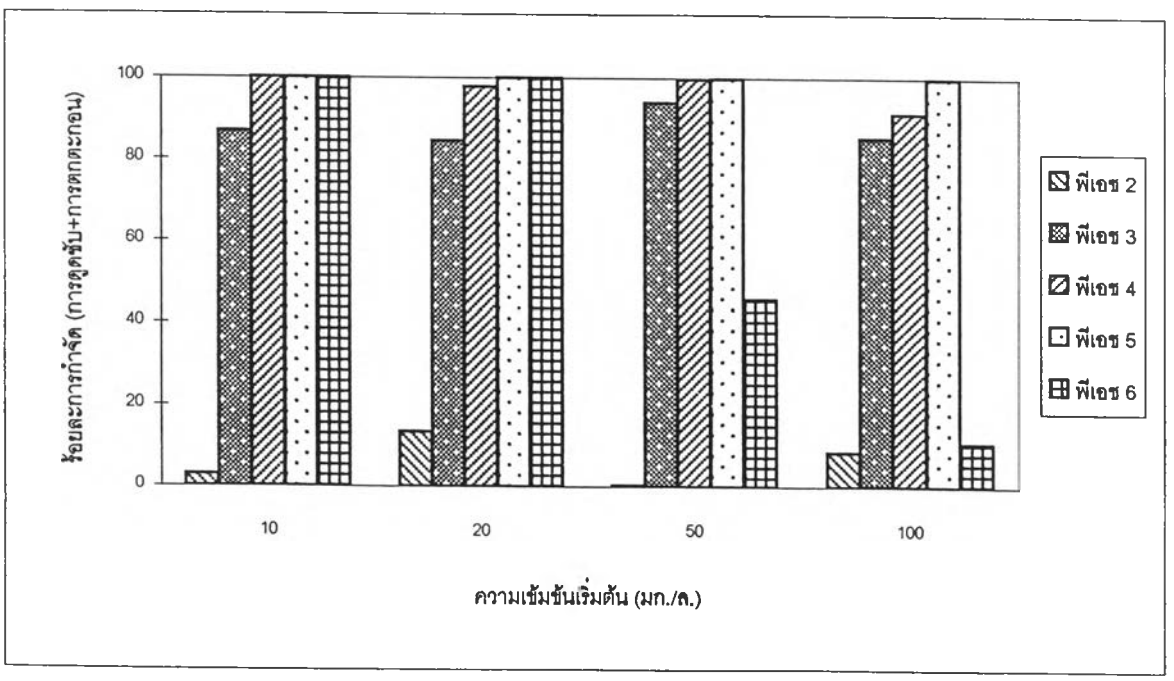
4.2.1 ผลการศึกษาของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดตะกั่ว

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 20, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 2 ถึง 6 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเผาเป็น 12 ชั่วโมง ปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยทำการเขย่าเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17-4.19 และภาคผนวก ข1

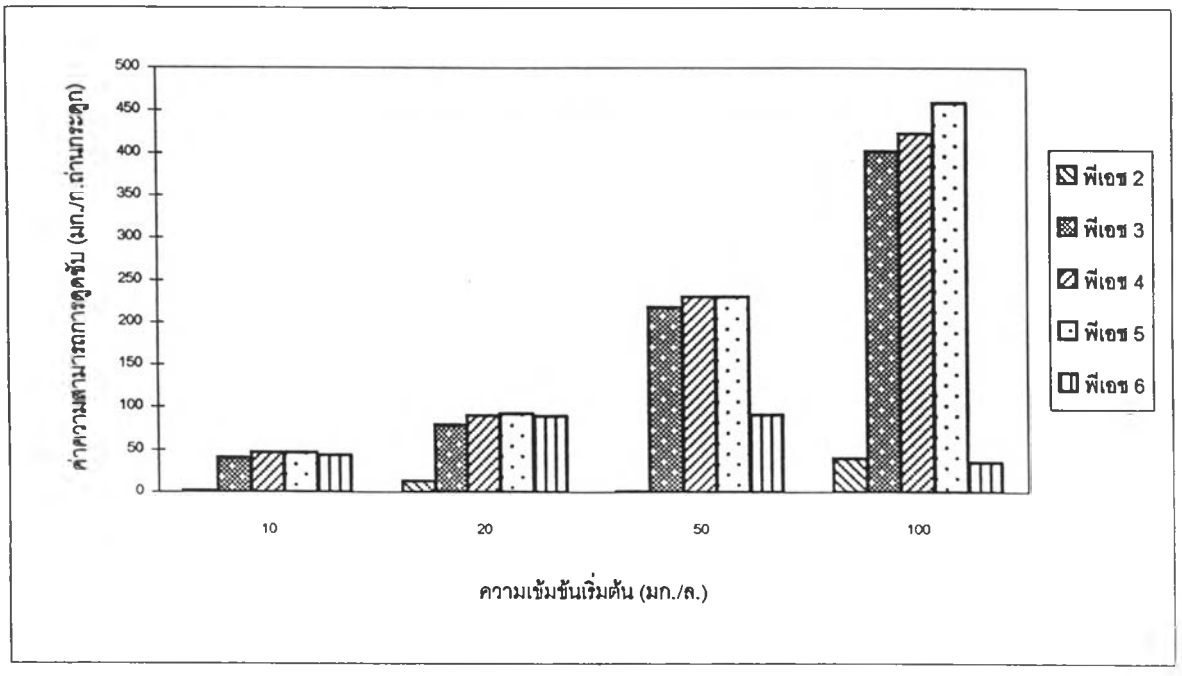
ซึ่งผลที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้งจากการดูดติดผิวเพียงอย่างเดียวและจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน มีค่าร้อยละการกำจัดที่ใกล้เคียงกันมากในช่วงพีเอชที่ทำการทดลอง (พีเอช 2-6) เนื่องจากที่ช่วงพีเอชดังกล่าว เมื่อพิจารณาจากกราฟการละลายน้ำของตะกั่วดังรูปที่ 4.20 ตะกั่วจะตกตะกอนในรูป $Pb(OH)_{2(S)}$ ในช่วงพีเอช 10 ถึง 12 จึงวิเคราะห์ได้ว่าที่พีเอช 2 ถึง 6 การกำจัดตะกั่วจะเกิดจากกลไกการดูดติดผิวเพียงอย่างเดียวโดยไม่เกิดกลไกการตกตะกอนร่วมด้วย และจากผลการทดลองยังพบว่า สำหรับที่ความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 2 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดคือมีร้อยละการกำจัดเป็น 2.95 และ 13.33 และประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นในค่าที่ใกล้เคียงกันมากในช่วงพีเอช 4 ถึง 6 คือ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีร้อยละการกำจัดเป็น 100 และที่ความเข้มข้น 20



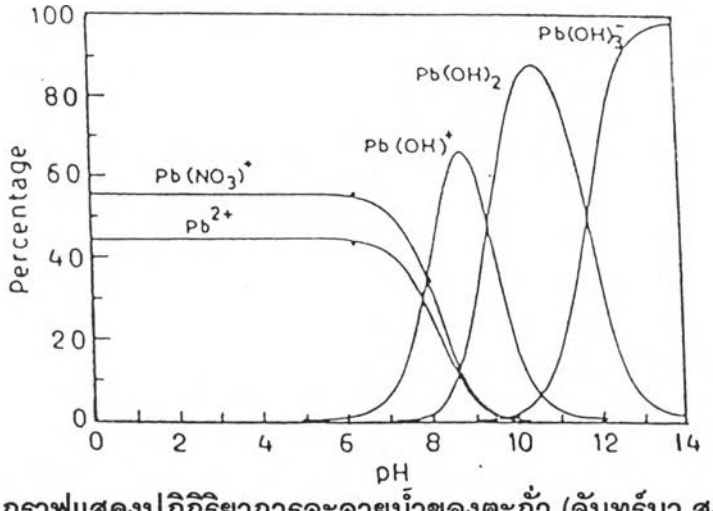
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัด (จากการดูดซับ) ของถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัด (จากการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.19 ค่าความสามารถการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงปฏิกิริยาการละลายน้ำของตะกั่ว (จันทร์นา สงวนรุ่งวงศ์, 2539)

มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดเป็นระหว่าง 97.74 ถึง 100 ส่วนที่ความเข้มข้นตะกั่ว 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุดคือมีร้อยละการกำจัดเป็น 0.32 และ 8.47 และประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นในช่วงพีเอช 3 ถึง 5คือ ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดระหว่าง 93.92 ถึง 99.78 และที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีร้อยละการกำจัดอยู่ระหว่าง 85.26 ถึง 99.27 และประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงอีกเมื่อพีเอชสูงขึ้น โดยที่พีเอช 6 มีร้อยละการกำจัดเป็น 41.96 และ 8.47 ที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสาเหตุที่ในช่วงพีเอชต่ำๆ ถ่านกระดูกกำจัดตะกั่วได้น้อย อาจ

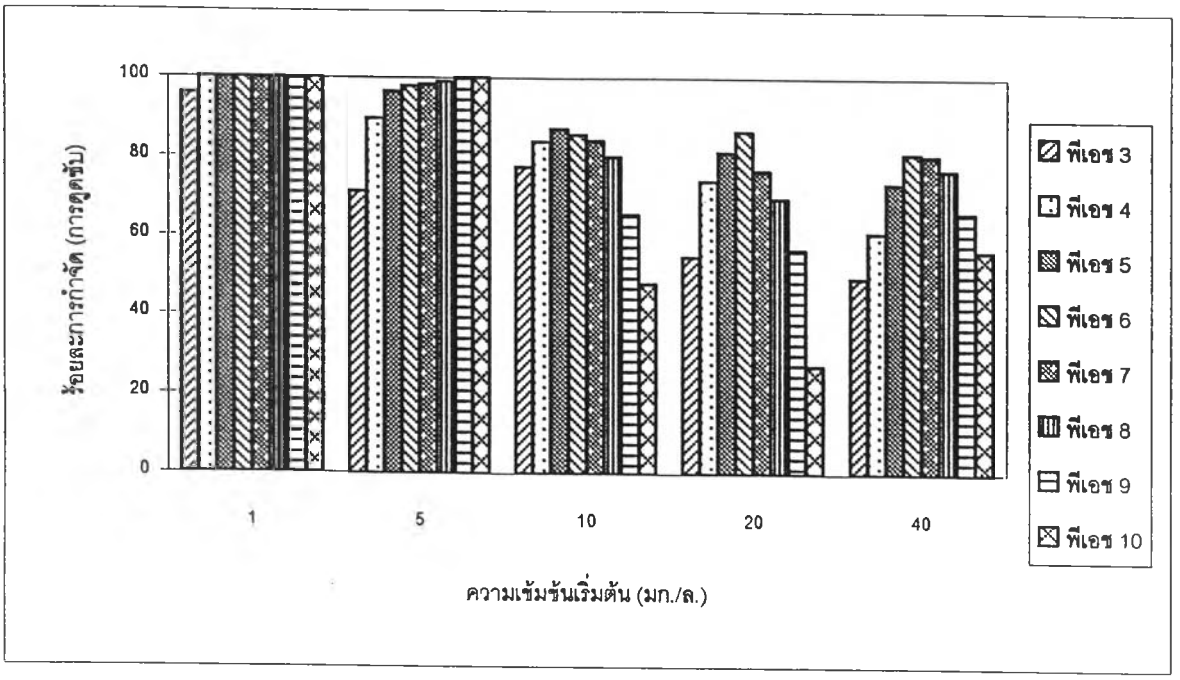
เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชต่ำหรือมีความเป็นกรดสูง ซึ่งแสดงว่าในน้ำมีปริมาณไฮโดรเจนไอออนสูง ซึ่งจะรบกวนการเกิดพันธะทางเคมีระหว่างตะกั่วในรูป Pb^{2+} กับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไตต์ในถ่านกระดูก และในช่วงพีเอช 4 ถึง 5 ถ่านกระดูกมีประสทธิภาพการกำจัดสูง เนื่องจากในช่วงพีเอช 4 ถึง 5 จะมีปริมาณตะกั่วในรูป Pb^{2+} สูงดังแสดงในกราฟแสดงการละลายน้ำของตะกั่วดังรูปที่ 4.17 ซึ่งทำให้เกิดพันธะทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไตต์ และหลังจากพีเอช 5 ปริมาณ Pb^{2+} จะลดลง ก็จะทำให้เกิดพันธะทางเคมีลดลงด้วย ซึ่งก็สนับสนุนว่าการดูดติดผิวของตะกั่วด้วยถ่านกระดูกเป็นการดูดติดผิวด้วยการเกิดพันธะทางเคมีหรือเรียกว่าการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ดังกล่าวแล้วข้างต้น

และเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเทียบกับปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้พบว่า ที่ค่าความเข้มข้นสูง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเป็น 5 จะมีความสามารถในการกำจัดของถ่านกระดูกสูงที่สุดคิดเป็น 458.55 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก ซึ่งจะเลือกใช้ค่านี้สำหรับการทดลองศึกษาสมการการดูดซับในส่วนต่อไป

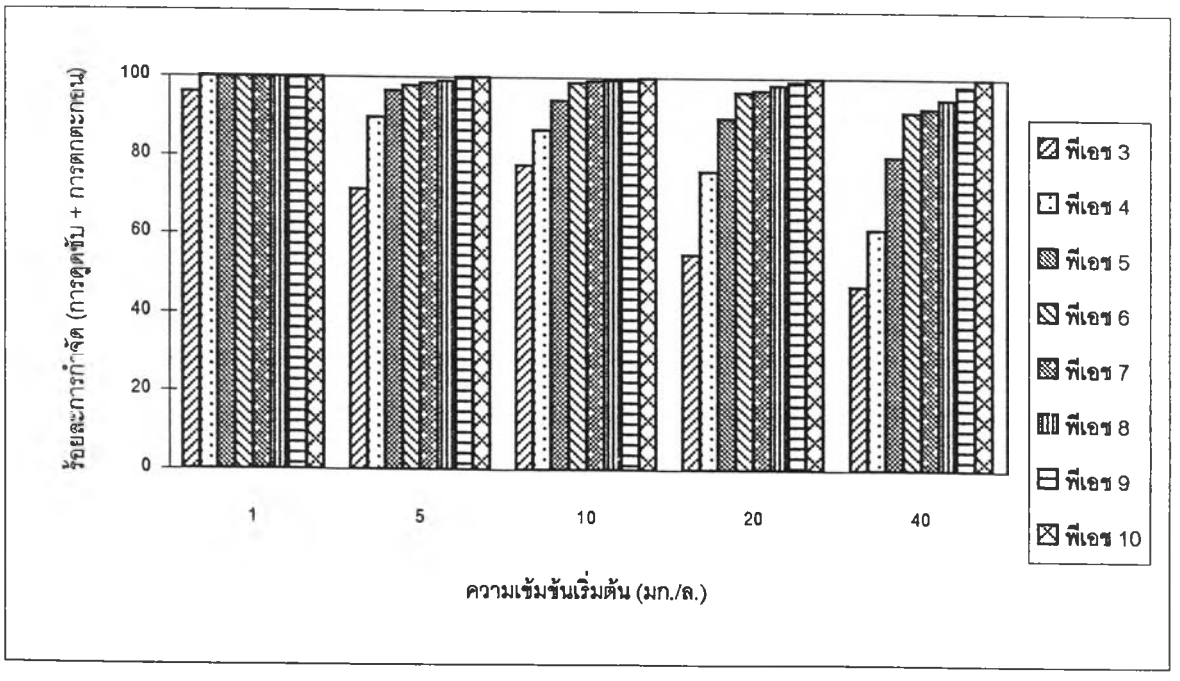
4.2.2 ผลการศึกษาของความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดแคดเมียม

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1, 5, 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 3 ถึง 10 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผา 600 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาในการเผา 12 ชั่วโมง ปริมาณ 1 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยทำการเขย่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองดังรูปที่ 4.21-4.23 และภาคผนวก ข2

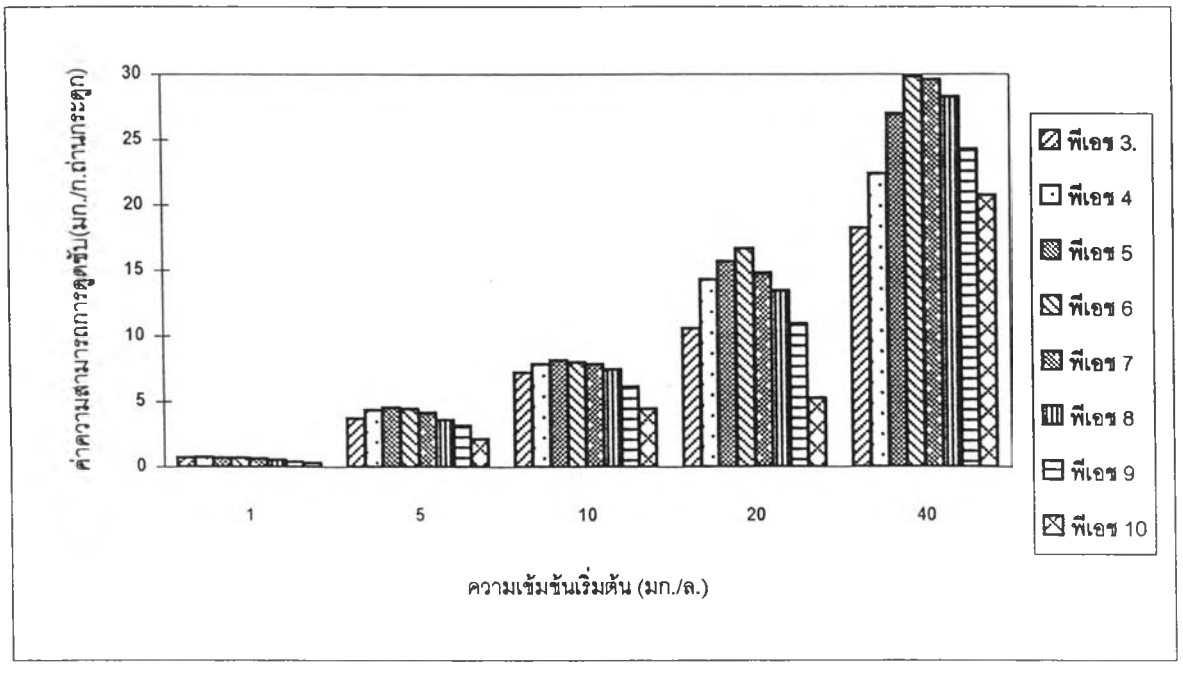
จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเนื่องจากการดูดติดผิวและจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอนจะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงพีเอช 3 ถึง 6 แต่ในช่วงพีเอชสูงขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอนจะมีค่าสูงกว่าจากการดูดติดผิวเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟความสามารถการละลายน้ำของแคดเมียมดังรูปที่ 4.24 พบว่า ในช่วงพีเอชน้อยกว่า 6 แคดเมียมละลายน้ำได้ดี แต่ในช่วงพีเอช 6 ถึง 11 แคดเมียมจะเกิดเป็นตะกอนในรูป $Cd(OH)_2$ จึงทำให้ผลการทดลองในช่วงพีเอชสูงกว่า 6 มีประสิทธิภาพการกำจัดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอนสูง ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการกำจัดแคดเมียมในส่วนของ



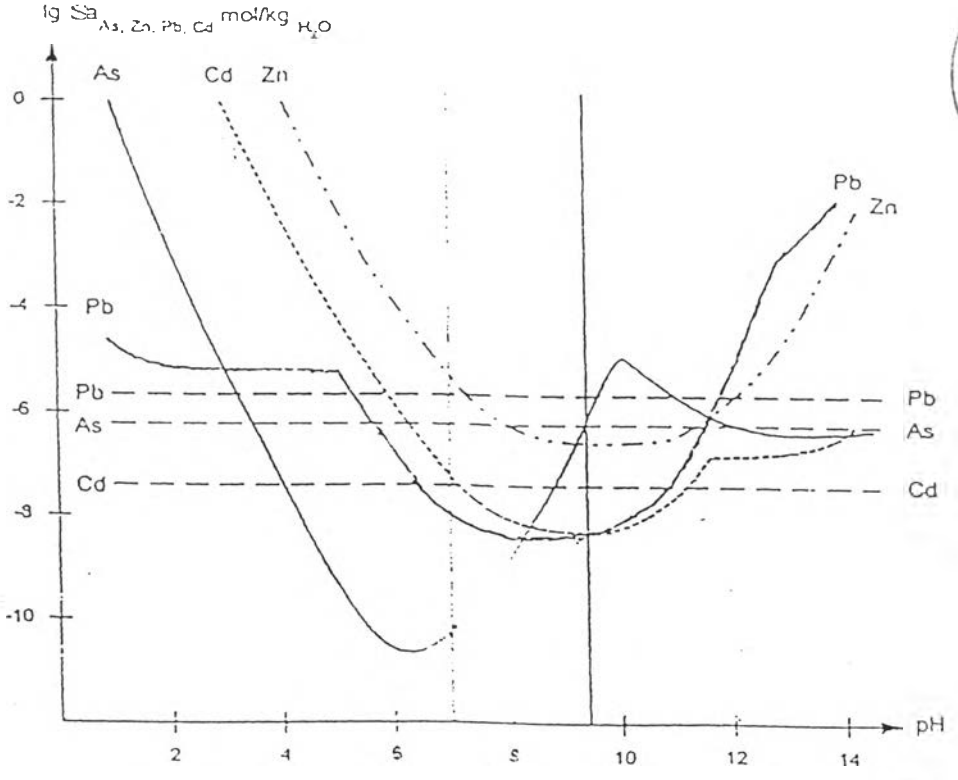
รูปที่ 4.21 **ประสิทธิภาพการกำจัด (จากการดูดซับ) ของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ**



รูปที่ 4.22 **ประสิทธิภาพการกำจัด (จากการดูดซับร่วมกับการตกตะกอน) ของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ**



รูปที่ 4.23 ค่าความสามารถการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล.น้ำตัวอย่างในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักชนิดต่างๆ (Barth, 1985 อ้างถึงใน ชาญวิทย์, 2543)

ประสิทธิภาพเนื่องจากการดูดติดผิวอย่างเดียว พบว่า ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงพีเอช 3 ถึง 5 แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงพีเอช 5 ถึง 10 แต่สำหรับที่ความเข้มข้น 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงขึ้นในช่วงพีเอช 3 ถึง 6 และจะเริ่มลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น โดยในช่วงพีเอช 5 ถึง 6 จะเป็นช่วงที่ถ่านกระดูกสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกซึ่งเกิดกลไกการดูดติดผิวทางเคมีเช่นเดียวกัน แต่ถ้าพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดเนื่องจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน พบว่าที่ค่าพีเอชสูงหรือน้ำเสียมีสภาพเป็นด่าง ถ่านกระดูกก็สามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีเนื่องจากใช้กระบวนการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน

และเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับเทียบกับปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้พบว่า ที่ค่าความเข้มข้นสูง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเป็น 6 จะมีความสามารถในการกำจัดของถ่านกระดูกสูงที่สุดคิดเป็น 29.80 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูก ซึ่งจะเลือกใช้ค่านี้สำหรับการทดลองศึกษาสมการการดูดซับในส่วนต่อไป

4.3 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก เพื่อใช้ทำการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

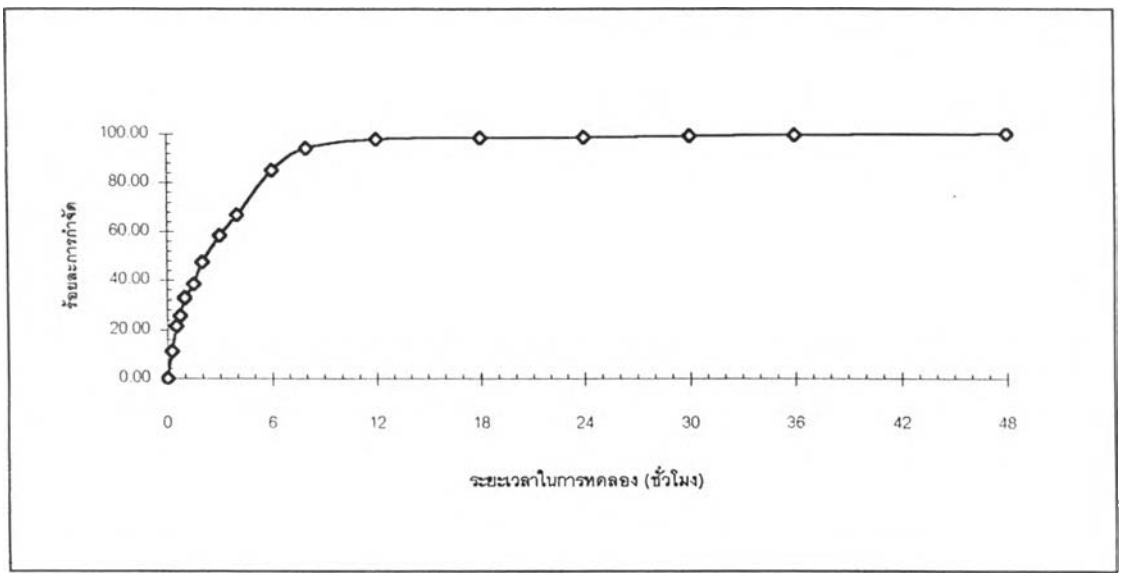
การทดลองขั้นนี้จะทำการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำการทดลองหาไอโซเทอมการดูดซับ โดยจะเลือกใช้น้ำเสียโลหะหนักที่ความเข้มข้นและพีเอชเริ่มต้นที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากผลการทดลองที่ 3.2 มาทำการทดลอง

4.3.1 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ ค1 พบว่า ช่วงระยะเวลาในการทดลอง 6 ชั่วโมงแรก การกำจัดตะกั่วจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยสามารถกำจัดได้จาก 0 เปอร์เซ็นต์

จนถึง 85.16 เปอร์เซ็นต์ และภายหลังจาก 6 ชั่วโมง การกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนค่อนข้างจะคงที่ คือมีร้อยการกำจัดเป็น 85.16 ที่ระยะเวลาในการทดลองเป็น 6 ชั่วโมง จนกระทั่งร้อยละกำจัดเป็น 99.92 ที่ระยะเวลาในการทดลองเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเป็นเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดก็คือ ระยะเวลาที่สามารถกำจัดได้ 90 เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดทั้งหมด ซึ่งระยะเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเหมาะสมของการกำจัดตะกั่วก็คือ 8 ชั่วโมง



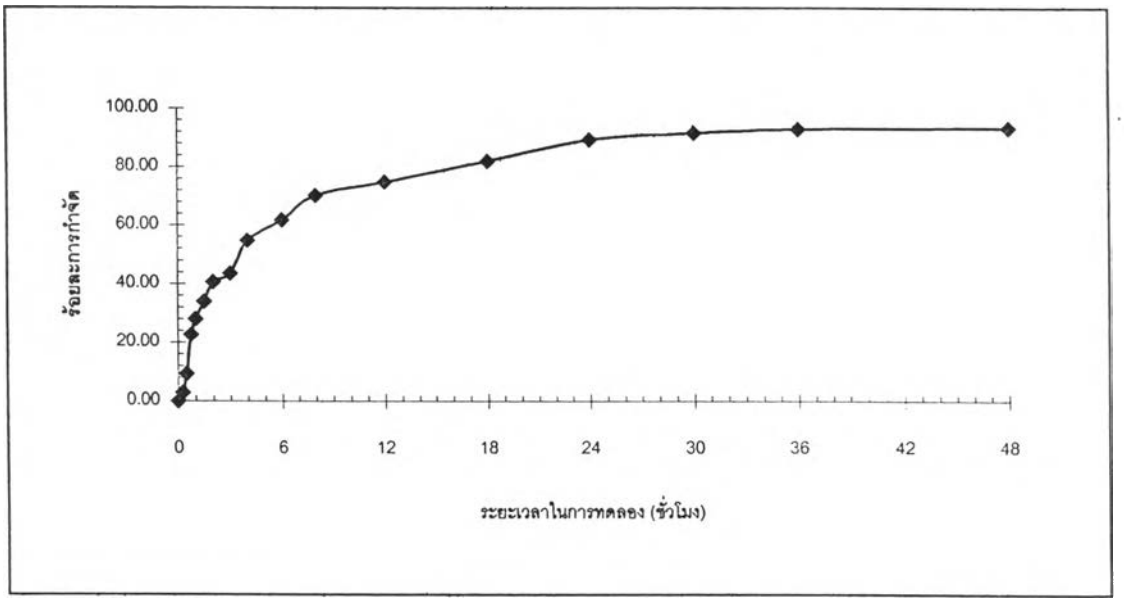
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับร้อยละการกำจัดในการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 0.2 มก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 5

4.3.2 ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 1 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่างๆ

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ ค2 พบว่า ในช่วงระยะเวลาในการทดลอง 8 ชั่วโมงแรก การกำจัดแคดเมียมจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยสามารถกำจัดได้จาก 0 เปอร์เซ็นต์จนถึง 70.24 เปอร์เซ็นต์ และภายหลังจาก 8 ชั่วโมง การกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนค่อนข้างจะคงที่ คือมีร้อยการกำจัดเป็น 70.24 ที่ระยะเวลาในการทดลอง 8 ชั่วโมง จนกระทั่งร้อย

ละกำจัดเป็น 93.45 ที่ระยะเวลาในการทดลองเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเป็นเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดก็คือ ระยะเวลาที่สามารถกำจัดได้ 90 เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดทั้งหมด ซึ่งระยะเวลาที่สภาวะสมดุลหรือเหมาะสมของการกำจัดตะกั่วก็คือ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการทดลองกับร้อยละการกำจัดแคดเมียมในการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ 1 มก./ล.น้ำตัวอย่าง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 40 มก./ล. ที่พีเอช 6

4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)ในการกำจัดโลหะหนัก

4.4.1 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น 0.04, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 และ 0.30 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1และตารางที่ ง1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ด้วยถ่านกระดูกที่ปริมาณต่างๆ

ปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ (ก./ล.น้ำตัวอย่าง)	ปริมาณตะกั่วที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.ถ่านกระดูก)
0.04	31.40	785.00
0.10	71.70	717.00
0.15	89.70	598.00
0.20	95.92	479.60
0.25	98.44	393.76
0.30	99.27	330.90

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดตะกั่วลดลง และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาที่ค่า R-square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ พบว่าค่า R-square ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่าสูงกว่าแบบแลงมัวร์มากคือมีค่าเป็น 0.9929 และ 0.7691 ตามลำดับ ดังนั้นการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกจึงสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yadava และคณะ (1989) ที่สรุปการกำจัดตะกั่วด้วยขี้เถ้าลอยเป็นไปตามไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชเช่นเดียวกัน โดยไอโซเทอมกำจัดตะกั่วแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกการทดลองนี้เป็นดังสมการ

$$\log(x/m) = 0.1704 \log Ce + 2.5948$$

หรือ

$$x/m = 393.3689 Ce^{0.1704}$$

โดยมีค่า 1/n เท่ากับ 0.1704 ซึ่งจาก Samuel D. และ Osman M. (1987) พบว่าสำหรับสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ที่ค่า 1/n น้อยกว่า 1มากมาก (1/n <<1) แสดงว่าความสามารถในการกำจัดจะค่อยค่อยลดลงเมื่อความเข้มข้นมีค่าน้อยลง

4.4.2 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดแคดเมียม

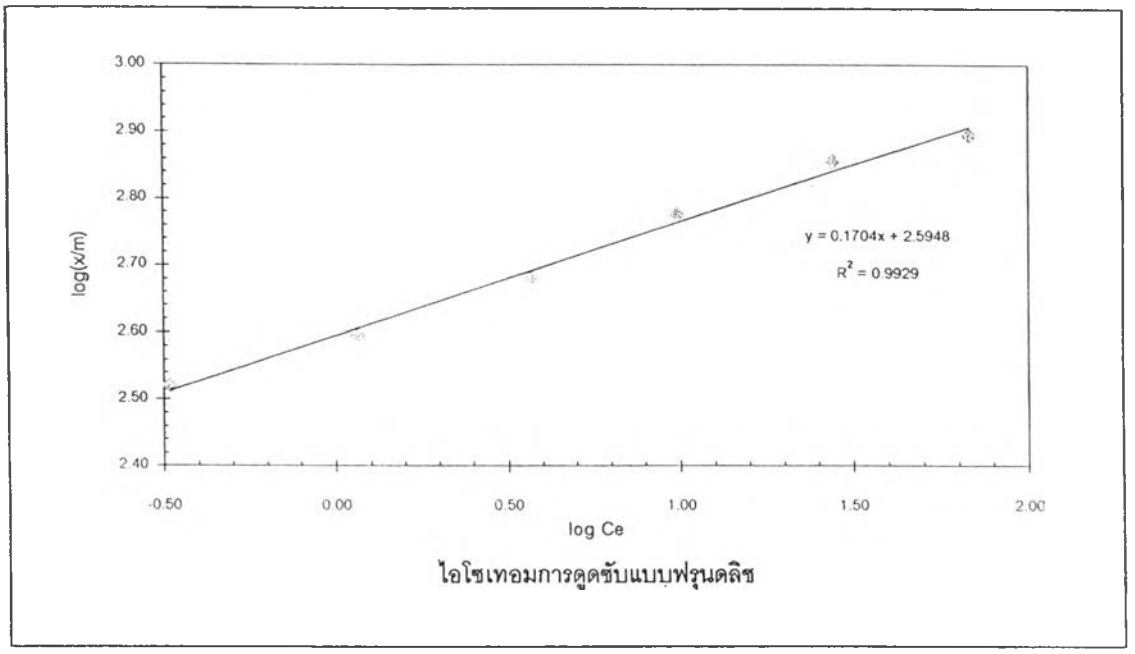
การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5 และ2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2และตารางที่ ง2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ด้วยถ่านกระดูกที่ปริมาณต่าง ๆ

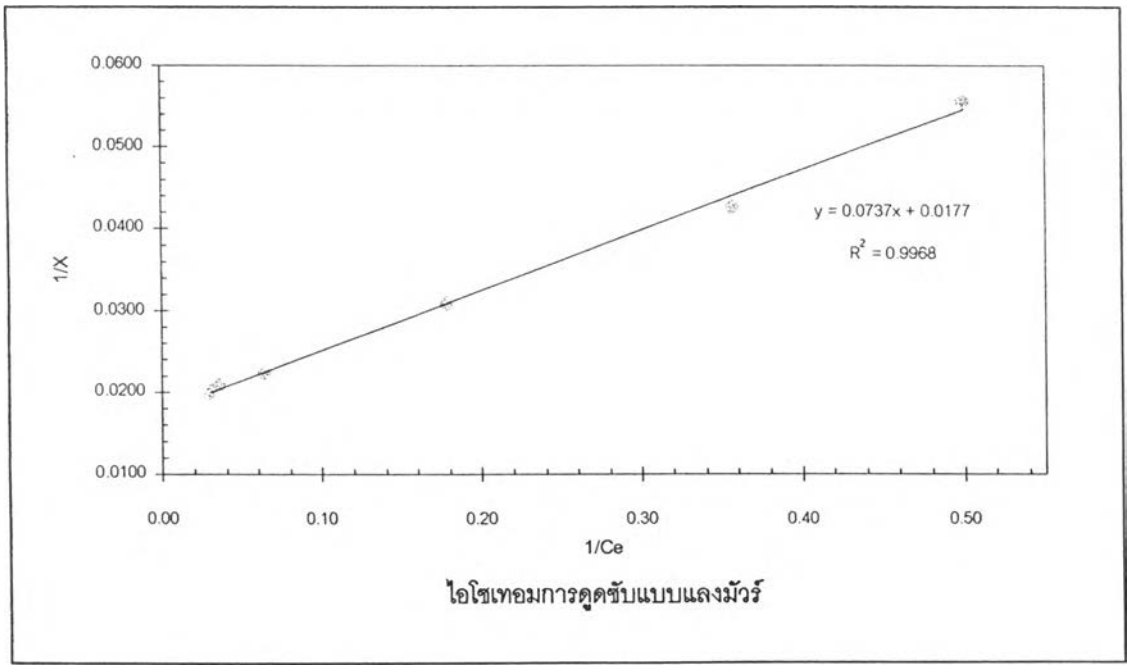
ปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้ (ก./ล.น้ำตัวอย่าง)	ปริมาณแคดเมียมที่ถูกกำจัด (มก./ล.)	ค่าความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.ถ่านกระดูก)
0.10	5.00	50.00
0.20	9.60	48.00
0.50	22.40	44.80
1.00	32.40	32.40
1.50	35.20	23.47
2.00	36.00	18.00

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณถ่านกระดูกที่ใช้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการกำจัดแคดเมียมลดลงเช่นเดียวกับตะกั่ว และเมื่อนำข้อมูลผลการทดลองมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาที่ค่า R-square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ พบว่าค่า R-square ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์มีค่าสูงกว่าแบบฟรุนดลิชคือมีค่าเป็น 0.9968 และ 0.9526 ตามลำดับ ดังนั้นการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูกจึงสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ดังรูปที่ 4.28 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Panday และคณะ (1987) ที่สรุปการกำจัดแคดเมียมด้วยขี้เถ้าลอยเป็นไปตามไอโซเทอมแบบแลงมัวร์เช่นเดียวกัน โดยไอโซเทอมกำจัดตะกั่วแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกการทดลองนี้เป็นดังสมการ

$$1/(x/m) = 0.0737(1/Ce) + 0.0177$$



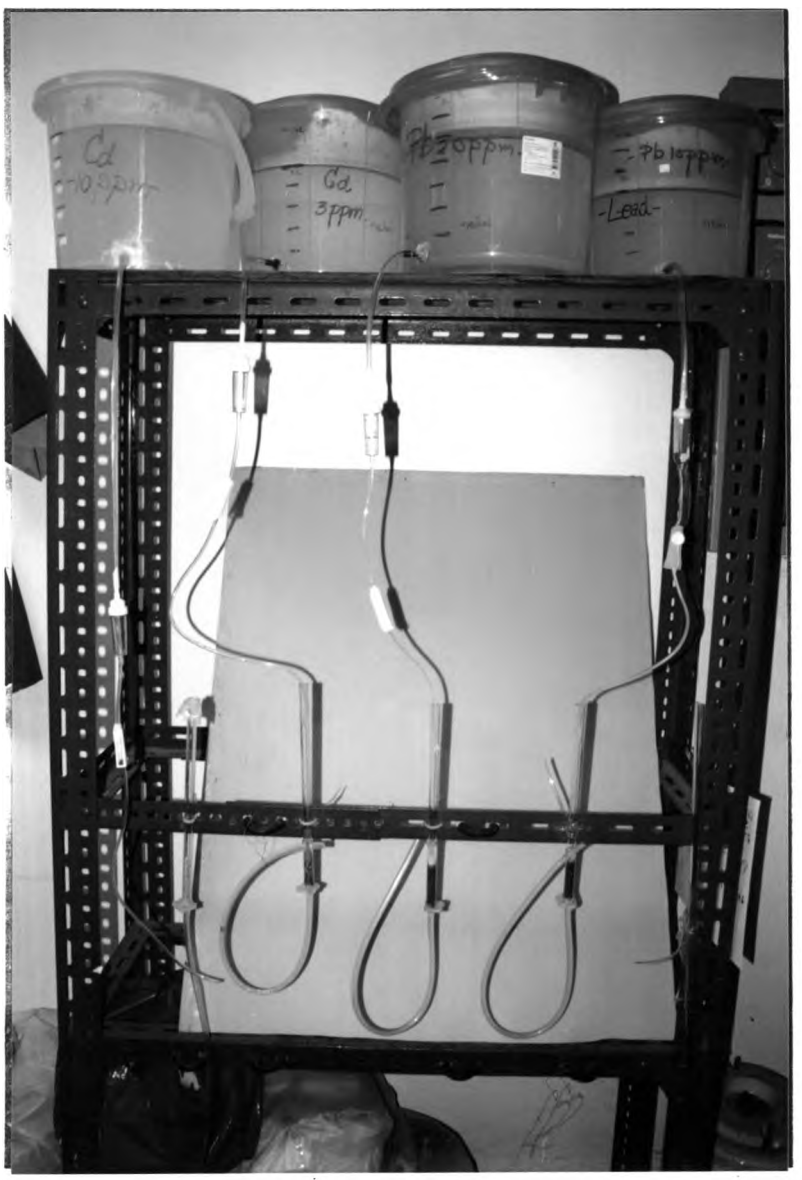
รูปที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 5



รูปที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกระดูกเตรียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มก./ล. พีเอช 6

4.5 ผลการทดลองการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

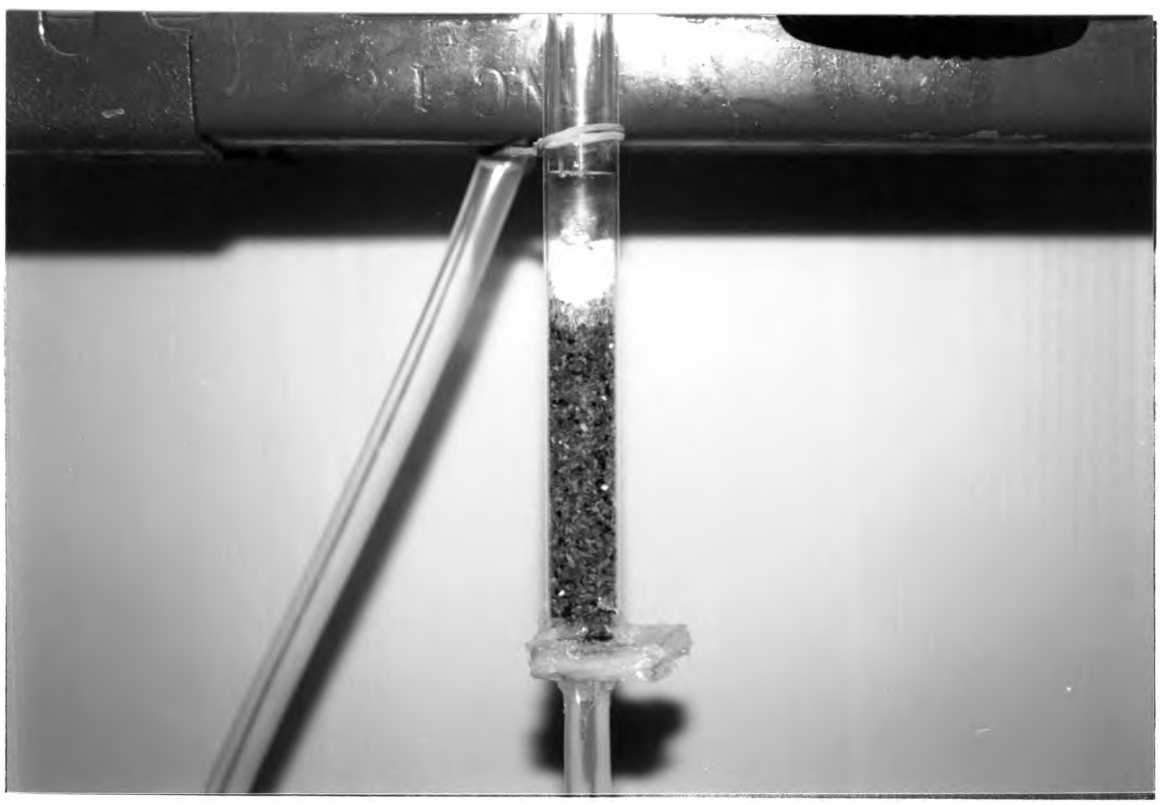
ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 เซนติเมตร ภายในบรรจุถ่านกระดูกปริมาณ 2 กรัม (ความสูงของชั้นถ่านกระดูกเป็น 8 เซ็นติเมตรหรือประมาณ 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางคอลัมน์) กำหนดอัตราการไหลของน้ำเสียผ่านคอลัมน์เป็น 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง หรือประมาณ 17 เท่าของปริมาตรเบด (bed volume)ต่อชั่วโมง ชุดอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ชุดอุปกรณ์การทดลองแบบคอลัมน์

4.5.1 ผลการทดลองการศึกษาการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 4และ 5 ไหลผ่านชุดคอลัมน์การทดลองด้วยอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทุกๆ 12 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นน้ำขาออกต่อน้ำขาเข้ามีค่าเป็น1) โดยกำหนดค่าความเข้มข้นในการเบรกทรูจ์ (breakthrough concentration) คือค่าความเข้มข้นตามมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมคือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับตะกั่ว



รูปที่ 4.30 ลักษณะการอุดตันบนผิวของคอลัมน์ เกิดขึ้นเมื่อน้ำเสียตะกั่วมีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5

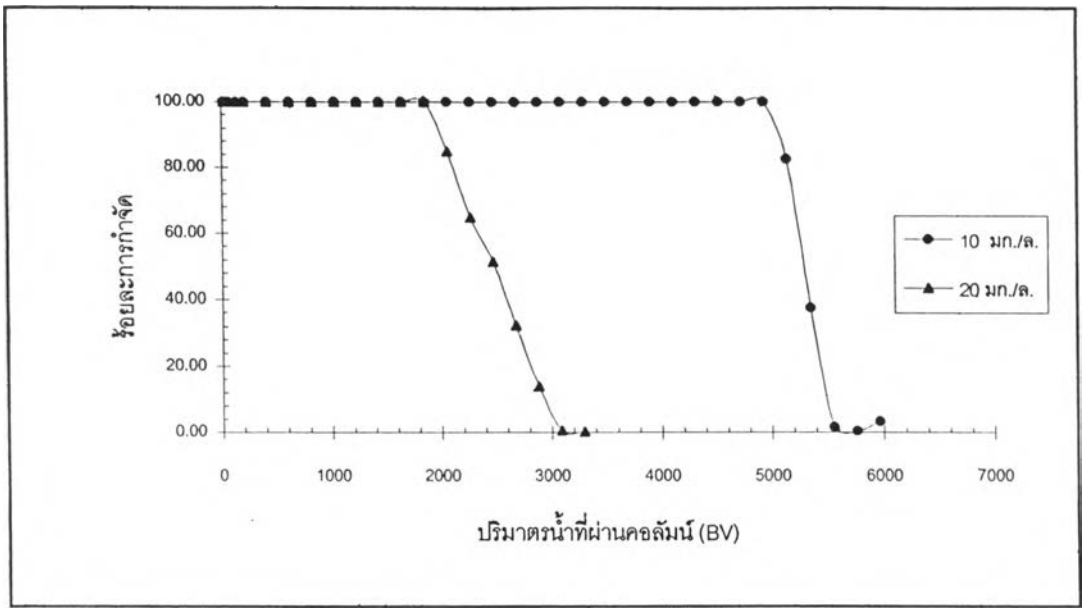
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองพบว่า ที่ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเป็น 5 น้ำเสียตะกั่วที่ไหลผ่านคอลัมน์จะเกิดการอุดตันบนผิวของถ่านกระดูกภายในคอลัมน์แสดงดังรูปที่ 4.30 ทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านคอลัมน์ต่อไปได้ เมื่อปริมาตรน้ำเสียผ่านได้เพียง 3.6 ลิตร (1028.57 BV) และ 0.48 ลิตร (137.14 BV) สำหรับน้ำเสียที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับดังตารางที่ จ1 ซึ่งน่าจะเกิดจากสาเหตุที่เกิดการตกตะกอนของตะกั่วบนพื้นผิวเนื่องจากค่าพีเอชสูง จึงปรับเปลี่ยนมาทำการทดลองที่ต่ำลงมาคือที่พีเอช 4 ซึ่งผลการทดลองพบว่า ปริมาตรน้ำเสียทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์จนกระทั่งอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำขาออกเท่ากับน้ำขาเข้า (C/Co = 1) จะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำลง คือไหลผ่านได้ปริมาตร 5760 และ 3291.43 BV และสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งก็คือ 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ภายในปริมาตร 4937.14 และ 1851.43 BV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังภาพที่ 4.31 และภาพที่ 4.32 โดยค่าความสามารถทั้งหมดในการกำจัดตะกั่วให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งคิดเป็น 85.28 และ 63.08 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

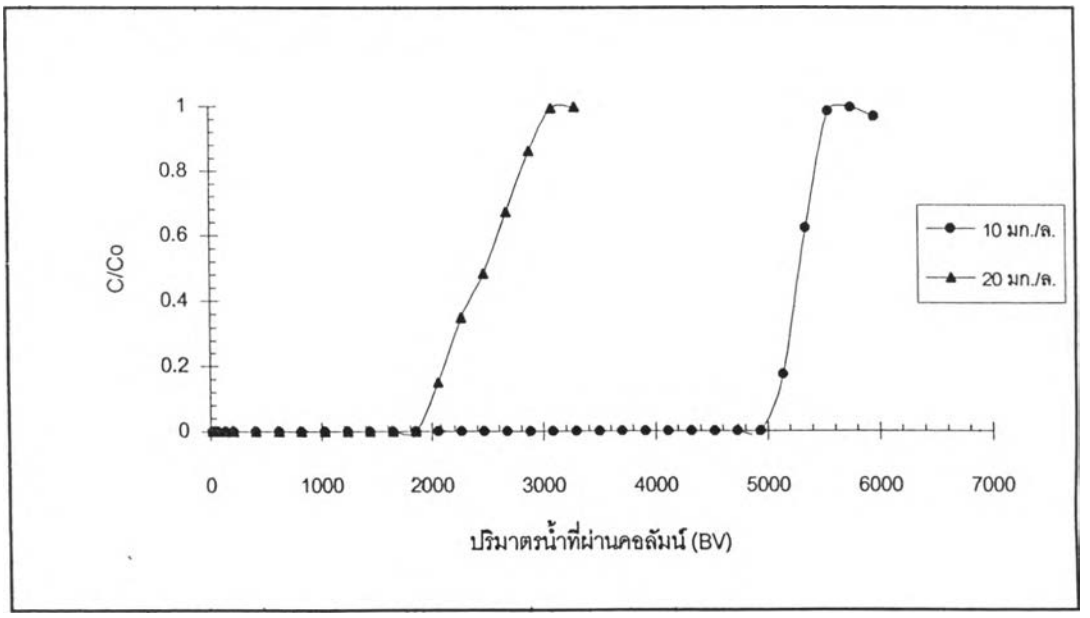
4.5.2 ผลการทดลองการศึกษาการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 5 ไหลผ่านชุดคอลัมน์การทดลองด้วยอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทุกๆ 2 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นก่อนผ่านคอลัมน์ (อัตราความเข้มข้นน้ำขาออกต่อน้ำขาเข้ามีค่าเป็น1) โดยกำหนดค่าความเข้มข้นในการเบรกทรูจ์ (breakthrough concentration) คือค่าความเข้มข้นตามมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมคือ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับแคดเมียม

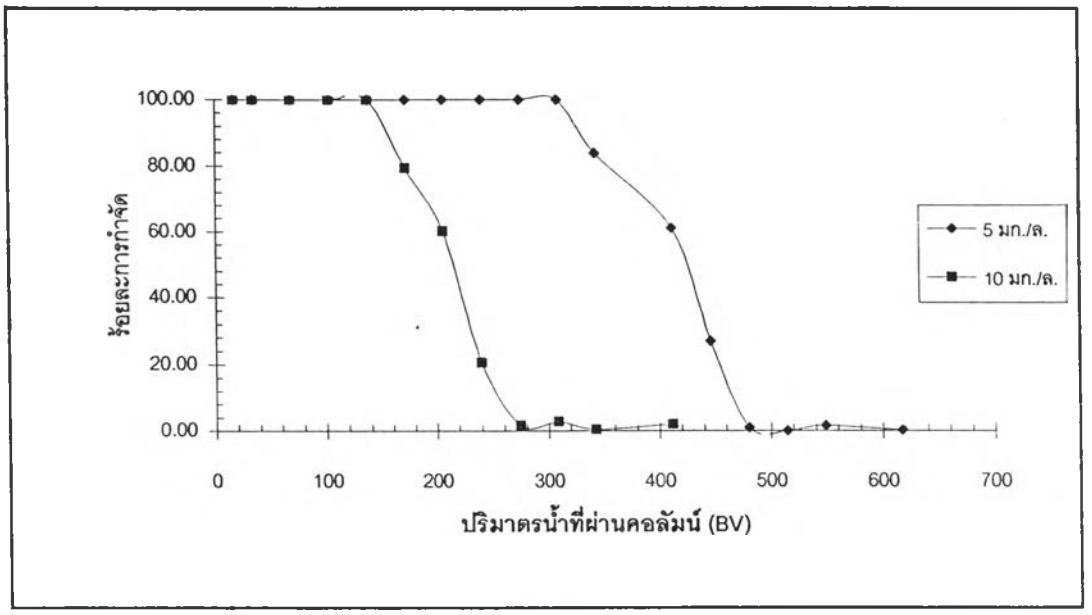
ผลการทดลองพบว่า ปริมาตรน้ำเสียทั้งหมดที่ไหลผ่านคอลัมน์จนกระทั่งอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำขาออกเท่ากับน้ำขาเข้า (C/Co = 1) จะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำเสียต่ำลง คือไหลผ่านได้ปริมาตร 514.29 และ 342.86 BV และสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีค่าความเข้มข้นต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งก็คือ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ภายในปริมาตร 308.57 และ 137.14 BV ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังภาพที่ 4.33 และภาพที่ 4.34 โดยค่าความสามารถทั้งหมดในการกำจัดแคดเมียมให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งคิดเป็น 2.62 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกระดูกที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ



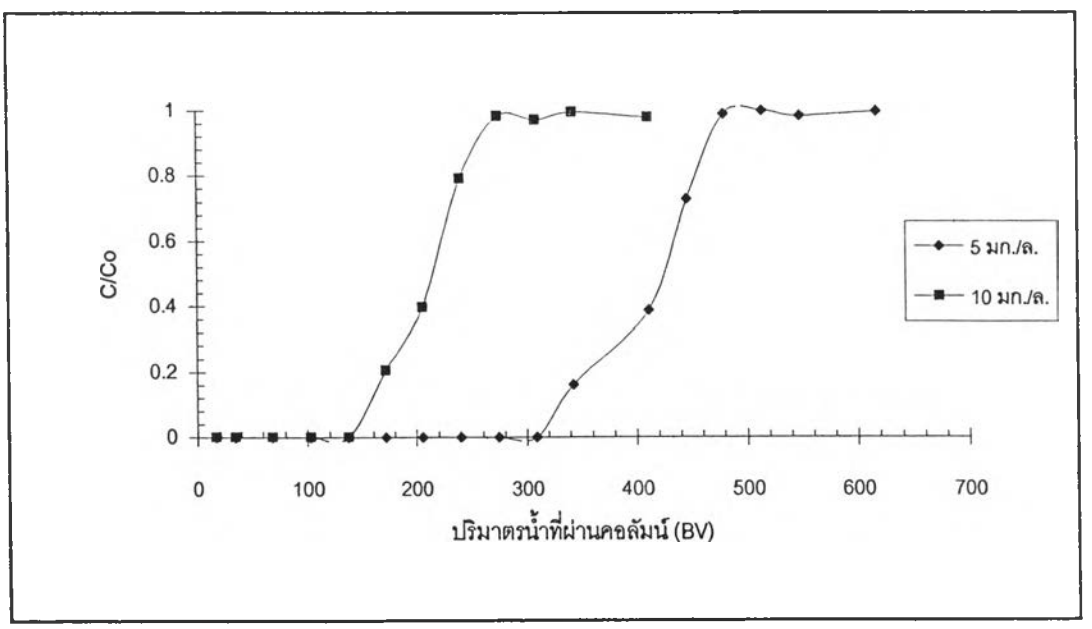
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 และ 20 มก./ล.พีเอชเริ่มต้นเป็น 4



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับสัดส่วนความเข้มข้นออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นน้ำเสียตะกั่วเริ่มต้น 10 และ 20 มก./ล.พีเอชเริ่มต้นเป็น 4



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัด ที่ความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมเริ่มต้น 5 และ 10 มก./ล.พีเอชเริ่มต้นเป็น 5



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับสัดส่วนความเข้มข้นออกต่อน้ำเข้าที่ความเข้มข้นน้ำเสียแคดเมียมเริ่มต้น 5 และ10 มก./ล.พีเอชเริ่มต้นเป็น 5

เมื่อทำการเปรียบเทียบเวลาในการเบรคทรูจ์จากการทดลองจริงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการ 4.1 (Metcalf&Eddy, Inc., 1991)

$$t_b = (x/m)_b M_c/[Q(C_i-(C_b/2))(8.34\ lb/Mgal*(mg/L))] \quad (4.1)$$

โดยที่ t_b = เวลาที่เบรกทรูจ์ (วัน)

$(x/m)_b$ = ค่าความสามารถในการกำจัดในการใช้งาน (กรัมต่อกรัม) ซึ่งค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 0.25-0.50เท่าของค่าที่คำนวณจากสมการไอโซเทอมการดูดซับ

M_c = ปริมาณตัวกลางที่บรรจุในคอลัมน์ (กรัม)

Q = อัตราการไหล (เมกกะแกลลอนต่อวัน)

C_i = ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_b = ความเข้มข้นที่เบรกทรูจ์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อกำหนดความเข้มข้นที่เบรกทรูจ์ของตะกั่วและแคดเมียมเป็น 0.2 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งค่าระยะเวลาการเบรกทรูจ์ที่คำนวณและค่าจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการเบรกทรูจ์ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณ

ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	เวลาเบรกทรูจ์ (วัน)		สัดส่วนเวลาเบรกทรูจ์จากการทดลองต่อจากการคำนวณ
		คำนวณ*	ทดลอง	
ตะกั่ว	10	81.7	12.0	0.15
ตะกั่ว	20	45.8	4.5	0.10
แคดเมียม	5	8.6	0.75	0.09
แคดเมียม	10	5.6	0.33	0.06

* ทำการคำนวณจากค่าความสามารถการดูดซับที่คำนวณจากสมการการดูดซับ

จากตารางที่ 4.3 พบว่า สัดส่วนของเวลาเบรกทรูจ์จากการทดลองต่อค่าจากการคำนวณมีค่าอยู่ในช่วง 0.10-0.15 สำหรับตะกั่ว และอยู่ในช่วง 0.06-0.09 สำหรับแคดเมียม ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าที่เหมาะสมในการใช้งานจริงของถังดูดติดผิวอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.50 (Metcalf&Eddy,

Inc., 1991) ในการประยุกต์การนำถ่านกระดูกไปใช้บรรจุในถังดูดติดผิว ควรจะศึกษาถึงกระบวนการรีเจนเนอเรตเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด