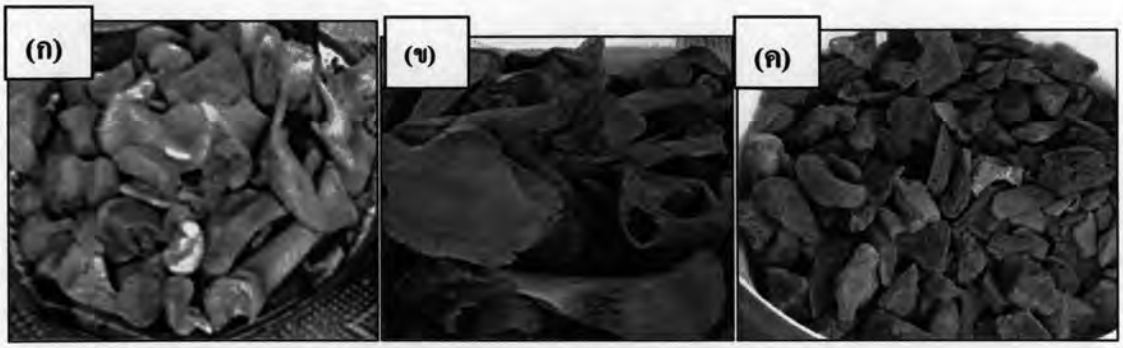
สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้ประกอบด้วยผลการทดลองเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมู ในการกำจัดสารละลายสังเคราะห์ของตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่างกัน โครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับที่เตรียมได้และคุณสมบัติภายหลังการทดลองกำจัด ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนโลหะทั้งสอง การศึกษาพีเอชของสารละลายโลหะทั้งสองภายหลังการกำจัดและผลของพีเอชกับการตกตะกอนของสารละลายตะกั่วและแคดเมียม และไอโซเทอมของการดูดติดผิว การกำจัดไอออนโลหะทั้งสองด้วยเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์ และการฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้ว รวมทั้งการอภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามหัวข้อต่อไปนี้

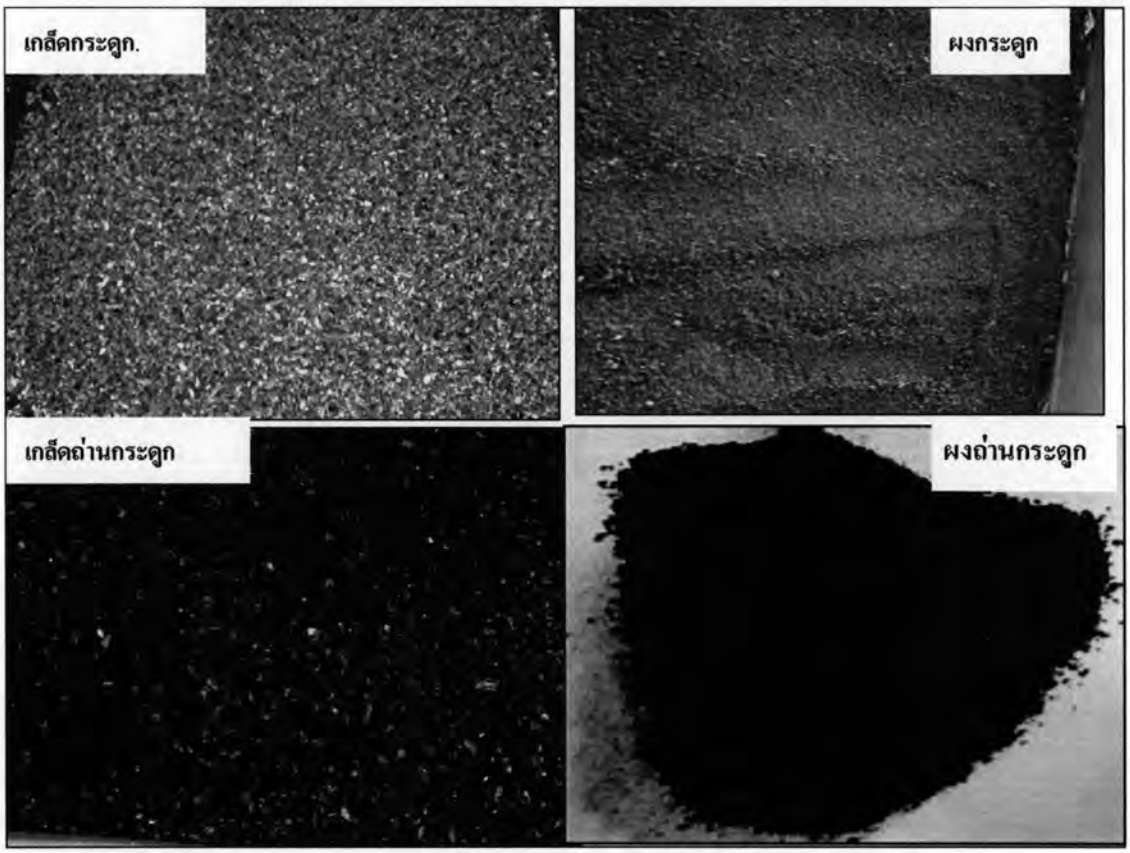
4.1 ผลการเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมู

การเตรียมสารดูดซับจากกระดูกหมูต้มที่ได้จากร้านขายข้าวต้มทรงเครื่องซึ่งเป็นกระดูกส่วนขาคือขาหน้า (picnic shoulder) และขาหลัง (Ham) นำมาล้างทำความสะอาดกำจัดไขมัน เลือด เส้นเอ็น และส่วนประกอบไม่พึงประสงค์ รวมทั้งกำจัดกลิ่นด้วยน้ำเกลือ(ภาพที่ 4.1ก) เมื่อล้างสะอาดแล้วนำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2 เดือน แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นและกำจัดแมลงจะได้วัสดุขั้นต้นสำหรับการเตรียมสารดูดซับต่อไป(ภาพที่ 4.1ข) ซึ่งสามารถเก็บได้นาน และเก็บตัวอย่างอย่างมิดชิดผนึกอย่างดีระวังสัตว์รบกวน นำกระดูกที่เตรียมเบื้องต้นมาบดหยาบด้วยเครื่องมือบดหญ้า-ฟาง (wood - chopper) จะได้เกล็ดกระดูกเป็นก้อนและชิ้นเล็กลงซึ่งยังไม่ได้คัดขนาด(ภาพที่ 4.1ค) นำมาร่อนกำจัดเศษผงและขยะที่ติดมาหลังจากนั้นนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น จะได้สารดูดซับจากกระดูกหมูคัดขนาดเป็น 3 กลุ่ม



ภาพ ที่ 4.1 กระดูกอบที่เตรียมการเบื้องต้น

คือผงกระดูกขนาดร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช หรือ 45 ไมครอน จะได้สารดูดซับผงกระดูกอย่างละเอียด (bone powder) มีสีน้ำตาลเข้ม กลุ่มที่ 2 คือเกล็ดกระดูกร่อนผ่านตะแกรง 8 เมช และค้างบนตะแกรง 20 เมช จะได้เกล็ดกระดูก (bone granule) ขนาด 0.84 – 2.36 มิลลิเมตร สำหรับทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบแท่งต่อเนื่อง (column) ส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นขนาดที่ใหญ่กว่า 8 เมช เก็บไว้เป็นวัสดุสำรองต่อไป โดยเตรียมชนิดผง 5 กิโลกรัม และชนิดเกล็ด 3 กิโลกรัม ภาพที่ 4.2



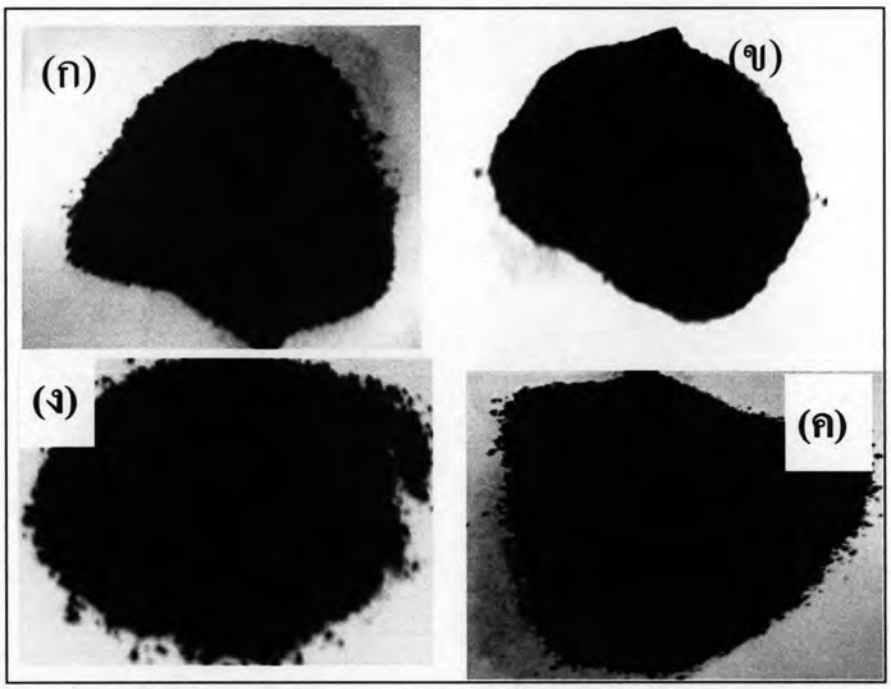
ภาพที่ 4.2 สารดูดซับ : เกล็ดกระดูก ผงกระดูก เกล็ดถ่านกระดูก และผงถ่านกระดูก

นำเกล็ดกระดูกบรรจุในหม้อดินปิดฝาและเผาที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านกระดูก (bone char) 3 ชนิด BC 300-1, BC 350-1 และ BC 400-1 โดยนำไปบดละเอียดด้วยโกร่งเซอร์โกเนียมและคัดขนาดให้เล็กกว่า 325 เมช ภาพที่ 4.3

นำเกล็ดกระดูกชนิด BC 400-1 มาแช่ในสารละลายเกลือแกงอิ่มตัวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง กรองแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำให้สะอาดโดยแช่น้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วเปลี่ยนน้ำใหม่ ทำเช่นนี้เรื่อยไปและทดสอบการล้างด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต 0.01 M จนแน่ใจว่าล้างเกลือออกหมดแล้ว นำไปอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส 3

ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่คงที่จะได้ถ่านกัมมันต์กระดูก (activated bone char: ABC) 2 ชนิด คือ ABC 350-1 และ ABC 400-1

ลักษณะภายนอกของถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูก ถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง(BC 300-1) และ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง(BC 350-1)จะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลเข้ม แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง(BC 400-1) จะเป็นผงละเอียดสีดำ ส่วนถ่านกัมมันต์กระดูกเป็นผงละเอียดสีดำ ภาพที่ 4.3 สำหรับถ่านกระดูก BC 300-1(ก), BC 350-1(ข) และ BC 400-1(ค) และ ถ่านกัมมันต์กระดูก(ง)



ภาพที่ 4.3 ลักษณะภายนอกของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่างกันและถ่านกัมมันต์กระดูก

การเตรียมสารดูดซับควบคุมเพื่อทำหน้าที่เปรียบเทียบกับสารดูดซับกระดูกที่ได้จากร้านอาหาร โดยซื้อกระดูกหมูสดส่วนที่เป็นขาหน้าและขาหลังซึ่งเป็นกระดูกหมูบริเวณ เดียวกันนำมาเตรียมด้วยสภาวะเหมือนกันกับสารดูดซับจากร้านอาหารโดยต้มประมาณ 10 ชั่วโมงแล้วบดให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ผงกระดูกสดที่ได้ลักษณะภานอกสีเหลืองน้ำตาลคล้ายกับผงกระดูกที่เตรียมจากกระดูกหมูต้มจากร้านอาหาร

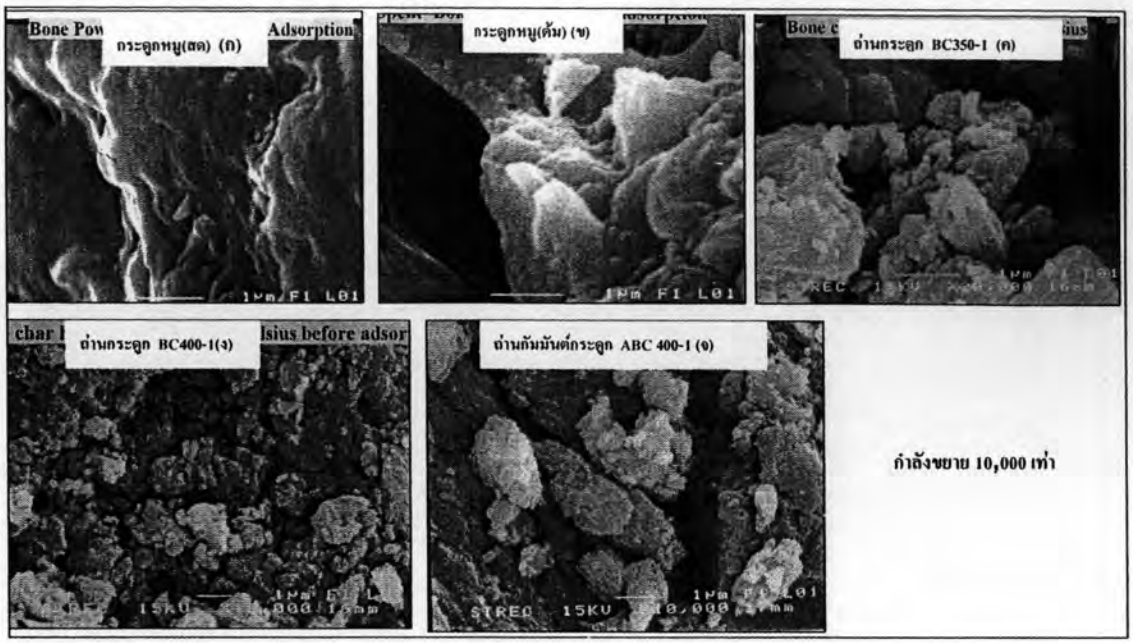
4.2 การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับที่เตรียมได้และภายหลังการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม

นำสารดูดซับที่เตรียมได้ คือ ผงกระดูก (bone powder : BP)ทั้งกระดูกต้มและกระดูกสดที่ทำหน้าที่สารดูดซับควบคุม ส่วนถ่านกระดูกนั้นเลือกศึกษาถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เพราะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงสุดเท่ากัน และถ่านกัมมันต์กระดูกไปทดสอบดูโครงสร้างทางกายภาพเพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิว และการกระจายตัวของโพรงทางภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEMs; TEOL, JSM-6400) ขยาย 10,000 ท่า และทดสอบหาปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรทั้งหมดของโพรง และองค์ประกอบทางเคมีด้วย BET Surface Area Analyzer ต่อไป (ข้อ 4.2.3)

การศึกษานี้ได้ศึกษาลักษณะพื้นผิวและลักษณะของโพรงของสารดูดซับกระดูกทั้งก่อนและภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียมเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของผิวและลักษณะของโพรงสารดูดซับ

4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว ลักษณะของโพรงและการกระจายตัวของโพรงของสารดูดซับก่อนการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม

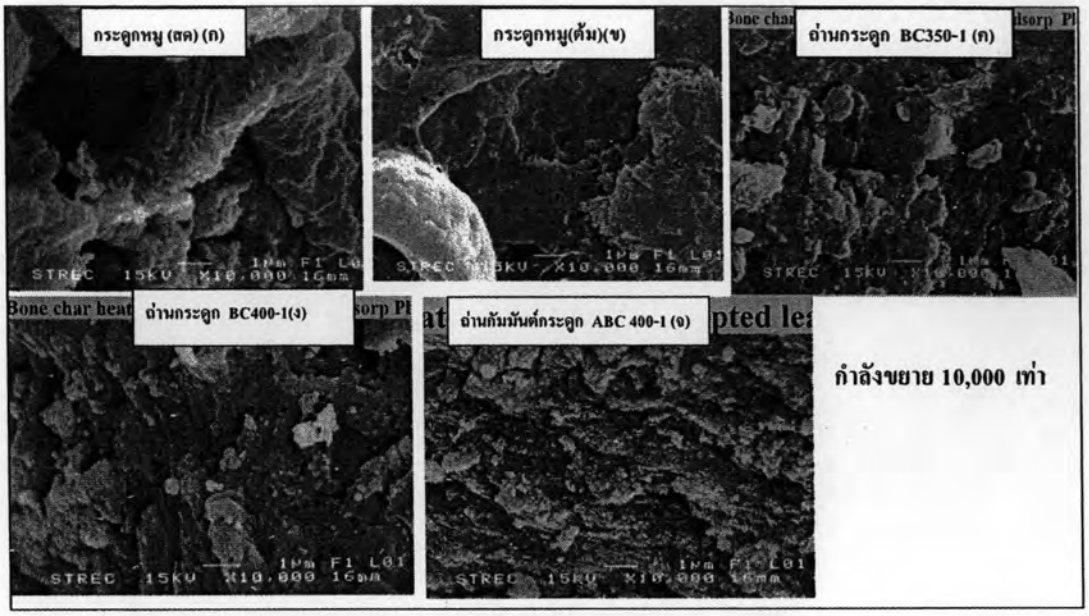
นำผงกระดูกอบ(ต้ม) ผงกระดูกอบ(สด) ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกไปเตรียมเบื้องต้นโดยทำเป็นแผ่นฟิล์มบางๆบนเซลและเคลือบทองเพื่อให้มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเมื่อนำไปสแกนด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEMs; TEOL, JSM-6400) ขยาย 10,000 เท่า พบว่าผงกระดูก (สด) มีพื้นที่ผิวขรุขระ ผิวแน่นมีปริมาณโพรงน้อยมากและโพรงขนาดเล็ก ภาพที่ 4.4 (ก) ส่วนกระดูก(ต้ม) มีโพรงมากขึ้น ผิวขรุขระ ดูโปร่งฟูกว่ากระดูกสด ภาพที่ 4.4 (ข) ส่วนถ่านกระดูกเผาที่ 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง มีพื้นผิวขรุขระ มีปริมาณโพรงมากกระจายทั่วไปมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกสดและกระดูกต้มภาพที่ 4.4(ค)และภาพที่ 4.4(ง) ส่วนถ่านกัมมันต์กระดูกจะเห็นโพรงชัดเจนกว่าถ่านกระดูกรวมทั้งโพรงมีปริมาณมากขึ้นและใหญ่ขึ้น ภาพที่ 4.4(จ)



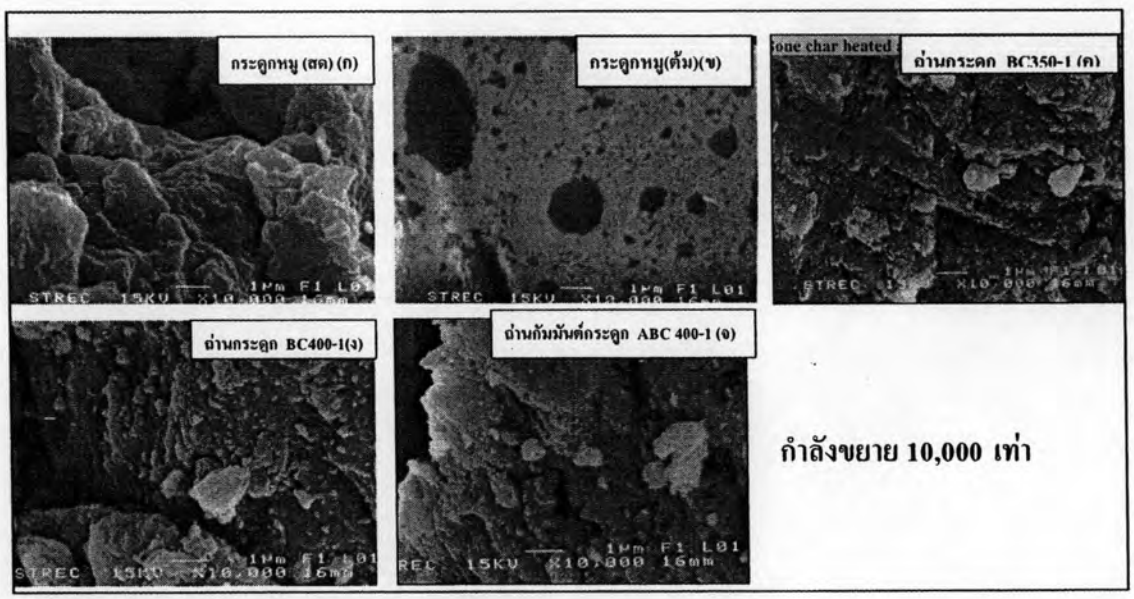
ภาพที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวและโพรงของสารดูดซับที่เตรียมได้ จากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า

4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิว ลักษณะของโพรงและการกระจายตัวของโพรงสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม

นำผงกระดูกอบ(ต้ม) ผงกระดูกอบ(สด) ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกที่ดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียมและผ่านการอบแห้งแล้วไปเตรียมเบื้องต้น โดยทำเป็นแผ่นฟิล์มบางๆบนเซลและเคลือบทองเพื่อให้มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และนำไปสแกนด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEMs; TEOL, JSM-6400) ขยาย 10,000 เท่า การดูดซับตะกั่วพบว่าผงกระดูก (สด) มีพื้นที่ผิวขรุขระพื้นผิวโปร่งและฟูมีโพรงมากขึ้นและใหญ่ขึ้น ภาพที่ 4.5 (ก) ส่วนกระดูก(ต้ม) มี ผิวขรุขระพื้นผิวแน่นขึ้นมีมิติเป็นชั้นๆซ้อนกันและมีจุดดำกระจายทั่วไป ภาพที่ 4.5 (ข) ส่วนถ่านกระดูกเผาที่ 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง มีพื้นผิวขรุขระ มีสารที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวกระจายปิดทับที่ผิว ทำให้ดูผิวแน่นขึ้นและสารถูกดูดซับบางส่วนเข้าไปอยู่ในโพรงทำให้ปริมาณโพรงน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบถ่านกระดูกที่ยังไม่ดูดซับ ภาพที่ 4.4(ค)และภาพที่ 4.4(ง) ส่วนถ่านกัมมันต์กระดูกจะเห็นผิวแน่นมาก เป็นชั้นๆของสารถูกดูดซับซ้อนกันและมีโพรงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์กระดูกก่อนการดูดซับ ภาพที่ 4.5(จ) สำหรับการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวและโพรงของสารดูดซับภายหลังการดูดซับแคดเมียมจากภาพถ่ายอิเล็กตรอนไมโครสโคปกำลังขยาย 10,000 เท่า มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่ว ภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวและโพรงสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า



ภาพที่ 4.6 ลักษณะพื้นผิวและโพรงสารดูดซับภายหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียมจากกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป ขยาย10,000 เท่า

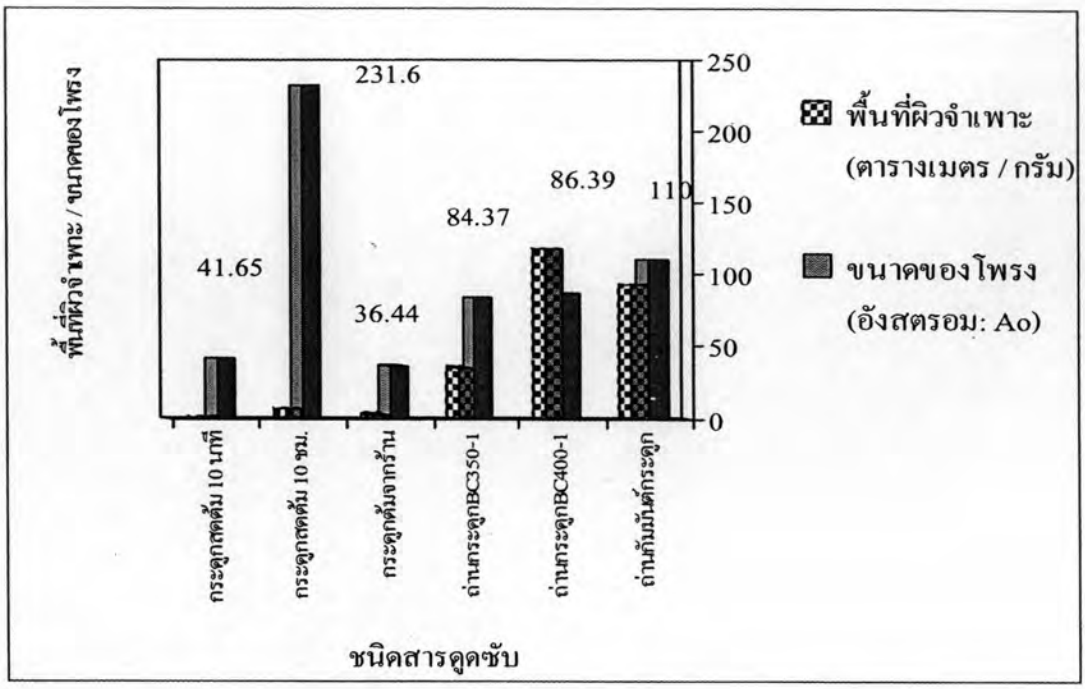
4.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับกระดูกหมู

การทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรทั้งหมดของโพรง และขนาดเฉลี่ยของโพรงของผงกระดูกสด กระดูกต้ม ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูกด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer (Quantachrome Autosorb-1) สรุปผลตามตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับกระดูกที่เตรียมในสภาวะต่างกัน

ชนิดสารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร / กรัม)	ปริมาตรทั้งหมดของโพรง(ลบ.ซม./กรัม)	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรง (อังสตรอม: A°)
กระดูก(สด)ต้ม 10 นาที	0.860	0.0009	43.65
กระดูก(สด)ต้ม 10 ชั่วโมง	6.488	0.0376	231.60
กระดูก(ต้ม)จากร้านอาหาร	2.780	0.0025	36.44
ถ่านกระดูก BC350-1	35.08	0.0740	84.37
ถ่านกระดูก BC400-1	117.51	0.2538	86.39
ถ่านกัมมันต์กระดูกABC400-1	92.79	0.2553	110.00

จากผลวิเคราะห์ตารางที่ 4.1 พบว่าผงกระดูกสดต้ม 10 นาทีมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำที่สุดและมีปริมาตรทั้งหมดของโพรงน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกต้ม, ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูกโดยถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงจะมีพื้นที่ผิจำเพาะมากที่สุด ขนาดและปริมาตรโพรงมากกว่าถ่านกระดูกเผาที่ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สำหรับถ่านกัมมันต์ กระดูก (ABC400-1)ที่ได้จากการนำถ่านกระดูก BC400-1 ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเกลือแกงอิ่มตัว 6 ชั่วโมง แล้วเผา ที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง จะมีปริมาตรทั้งหมดของโพรงมากที่สุดและขนาดของโพรงใหญ่รองลงมาจากกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง แต่พื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (BC400-1) กระดูกต้มจากร้านอาหารและกระดูกสดต้ม 10 นาทีจะมีขนาดโพรงเป็นโพรงขนาดกลาง ส่วนกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมงมีโพรงขนาดใหญ่มากที่สุด สรุปคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับกระดูกหมูที่เตรียมได้ 6 ชนิด ภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกในสภาวะต่างๆ

เมื่อศึกษาเปรียบเทียบสารดูดซับจากกระดูกหมู กับ สารดูดซับจากกระดูกโคกระบือ (จักรพงษ์, 2548) พบว่ากระดูกโค-กระบือ นึ่งด้วยไอน้ำมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของโพรงมากกว่าและสูงกว่ากระดูกหมู (ต้มและสด) และเมื่อนำกระดูกโค-กระบือไปเผาที่ 400, 500, 600, 800, 1,000 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิยิ่งสูงพื้นที่ผิวจำเพาะจะลดลง ปริมาตรของโพรงลดลง แต่ขนาดของโพรงใหญ่ขึ้น (อุบลรัตน์, 2544**; ศุภกิจ, 2545*) ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ของสารดูดซับจากกระดูกหมูและกระดูกโค-กระบือ

ชนิดสารดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร / กรัม)	ปริมาตรทั้งหมดของโพรง(ลบ.ซม. / กรัม)	ขนาดของโพรง (อังสตรอม : A°)
กระดูกหมูเผาที่350 °C 1 ชม.	35.0800	0.0740	84.37
กระดูกหมูเผาที่400 °C 1 ชม.	117.5100	0.2538	86.39
*กระดูกโค-กระบือเผาที่400 °C 1 ชม.	120.0070	0.3625	120.83
*กระดูกโค-กระบือเผาที่500 °C 1 ชม.	85.1261	0.3277	153.69
**กระดูกโค-กระบือเผาที่600 °C 1 ชม.	43.4530	0.1998	183.97
**กระดูกโค-กระบือเผาที่800 °C 1 ชม.	2.1507	0.0061	114.02
**กระดูกโค-กระบือเผาที่1,000 °C 1 ชม.	1.8423	0.0030	65.27

ตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ถ่านกระดูกจะมีคุณสมบัติทางกายภาพทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรทั้งหมดของโพรงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส

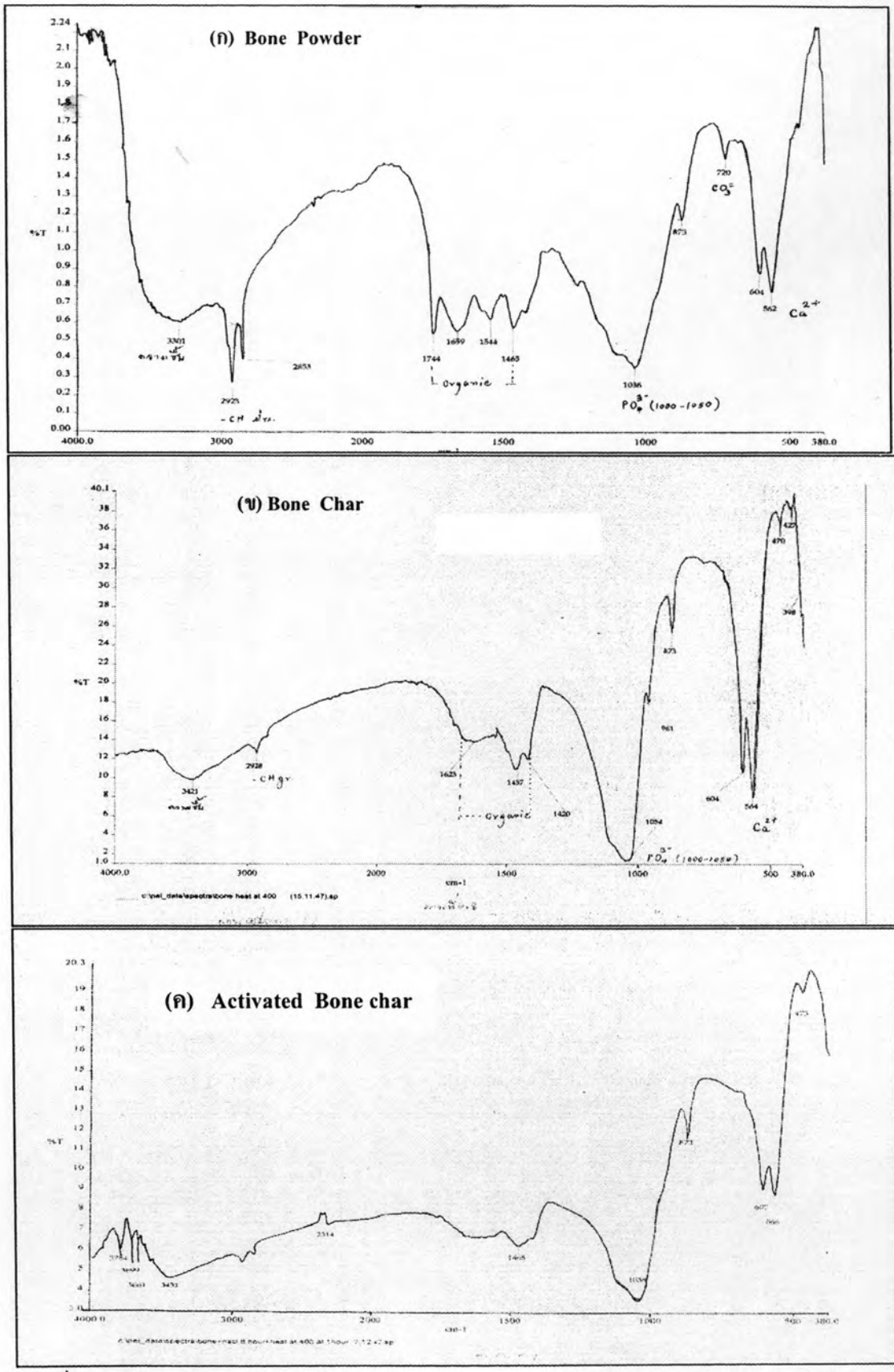
4.2.4 การศึกษากลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูกที่เตรียมได้ก่อนและภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม ด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรด-สเปคโตรมิเตอร์ (Fourier Transforms Infrared Spectrometer: FTIR)

4.2.4.1 กลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูกก่อนการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียม

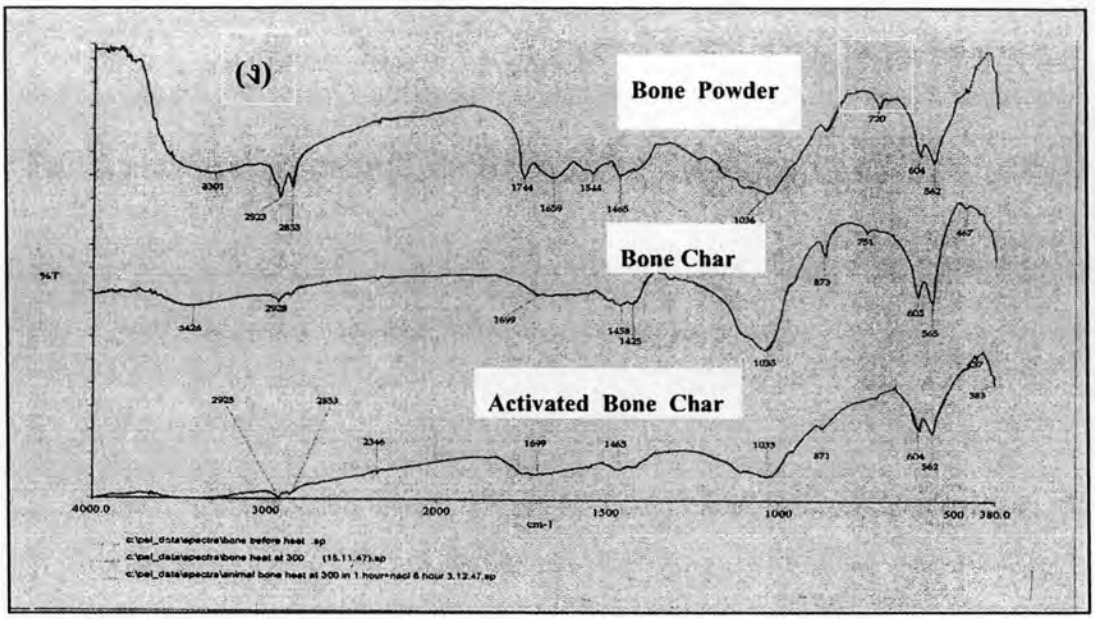
การหากลุ่มองค์ประกอบทางเคมี(Functional group) ด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรด-สเปคโตรมิเตอร์จะแสดงเป็นกราฟที่ความยาวคลื่นในช่วง 450-4000 cm^{-1} ช่วงที่มีความสูงของกราฟ(peak)จะบอกถึงกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับนั้น ผลการศึกษากลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก(ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-1ถึง ภาพที่ ก-5) จะพบว่าผงกระดูก(ต้ม)ก่อนการดูดซับมีองค์ประกอบหลักคือ ความชื้น(3301cm^{-1}) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (2853 , 2923 cm^{-1}) สารประกอบอินทรีย์เล็กน้อย (1744 , 1659 , 1544 , 1465 cm^{-1}) กลุ่มฟอสเฟต (1036 cm^{-1}) คาร์บอเนต (720 cm^{-1}) และแคลเซียม (562 , 604 cm^{-1}) (ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-1) ภาพที่ 4.8(ก)

ถ่านกระดูกที่เตรียมโดยการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง กลุ่มคาร์บอเนต และ กลุ่มอินทรียสาร(1465 – 1744 cm^{-1}) จะลดน้อยลง กลุ่มไฮโดรคาร์บอน 2853 – 2923 cm^{-1})จะหายไป ความชื้นน้อยลง (3301 – 3421 cm^{-1}) ส่วนกลุ่มหลัก คือ ฟอสเฟต (1036 cm^{-1}) และ แคลเซียม(562 - 604 cm^{-1}) ยังคงอยู่ (ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-2) ภาพที่ 4.8(ข)

ถ่านกัมมันต์กระดูกที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยเกลือแกงอิ่มตัวและเผาซ้ำที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง กลุ่มองค์ประกอบทางเคมีที่หายไปคือ กลุ่มอินทรียสาร คาร์บอเนต และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีความชื้นเล็กน้อย กลุ่มหลักคือฟอสเฟต และแคลเซียมยังคงอยู่ (ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-3) ภาพที่ 4.8(ค)



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูก(ก) ถ่านกระดูก(ข) และถ่านกัมมันต์กระดูก(ค)



ภาพที่ 4.8(ต่อ) เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก

เมื่อนำกราฟของผงกระดูก(ต้ม) ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูกมาศึกษาเปรียบเทียบ จะเห็นชัดเจนของกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณลดน้อยลงคือความชื้น กลุ่มอินทรียสาร คาร์บอเนตและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กลุ่มหลักที่คงอยู่คือ แคลเซียมและฟอสเฟต ภาพที่ 4.8(ง) (ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-4)

4.2.4.2 กลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูกภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียม

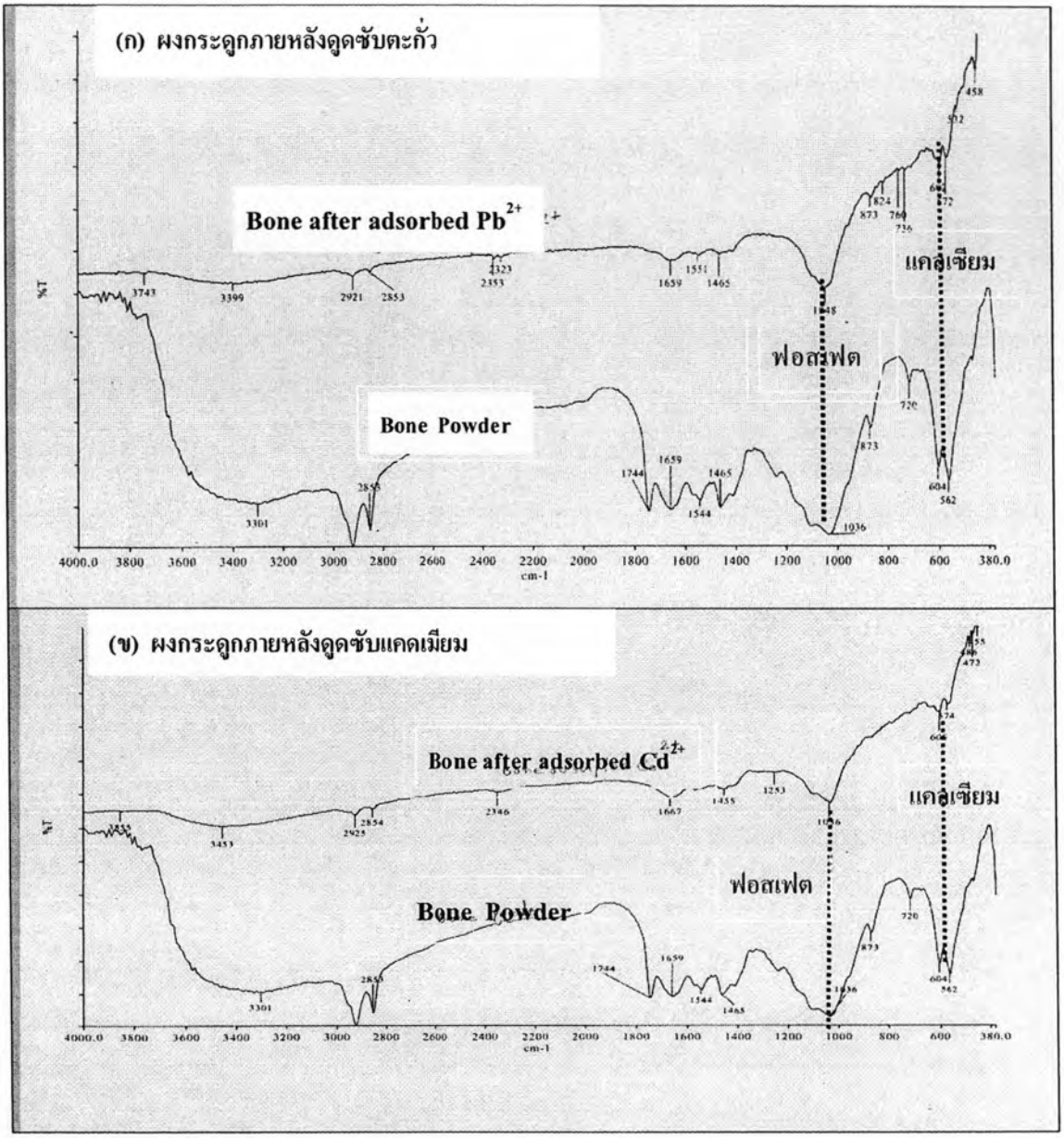
ภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด โดยนำผง กระดูก ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมงและนำไปตรวจสอบกลุ่มฟังชันนัลด้วย FTIR ผลการตรวจสอบ(ภาคผนวก ก., ภาพที่ ก-6 ถึง ภาพที่ ก-13) จะพบว่ากลุ่มอินทรียสาร แคลเซียม คาร์บอเนตและฟอสเฟตลดน้อยลง ซึ่งให้ผลการทดสอบที่เหมือนกันกับสารดูดซับทั้งสามชนิดทั้งการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียม ผงกระดูกภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม ภาพที่4.9(ก) และภาพที่4.9(ข)

ถ่านกระดูกภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม ภาพที่ 4.10(ก)และภาพที่ 4.10(ข) เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มอนินทรียสารที่เปลี่ยนแปลงไปของถ่านกระดูกภายหลังการดูดซับตะกั่วกับกลุ่มอนินทรียสารที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการดูดซับแคดเมียมพบว่ากลุ่มแคลเซียมและกลุ่ม

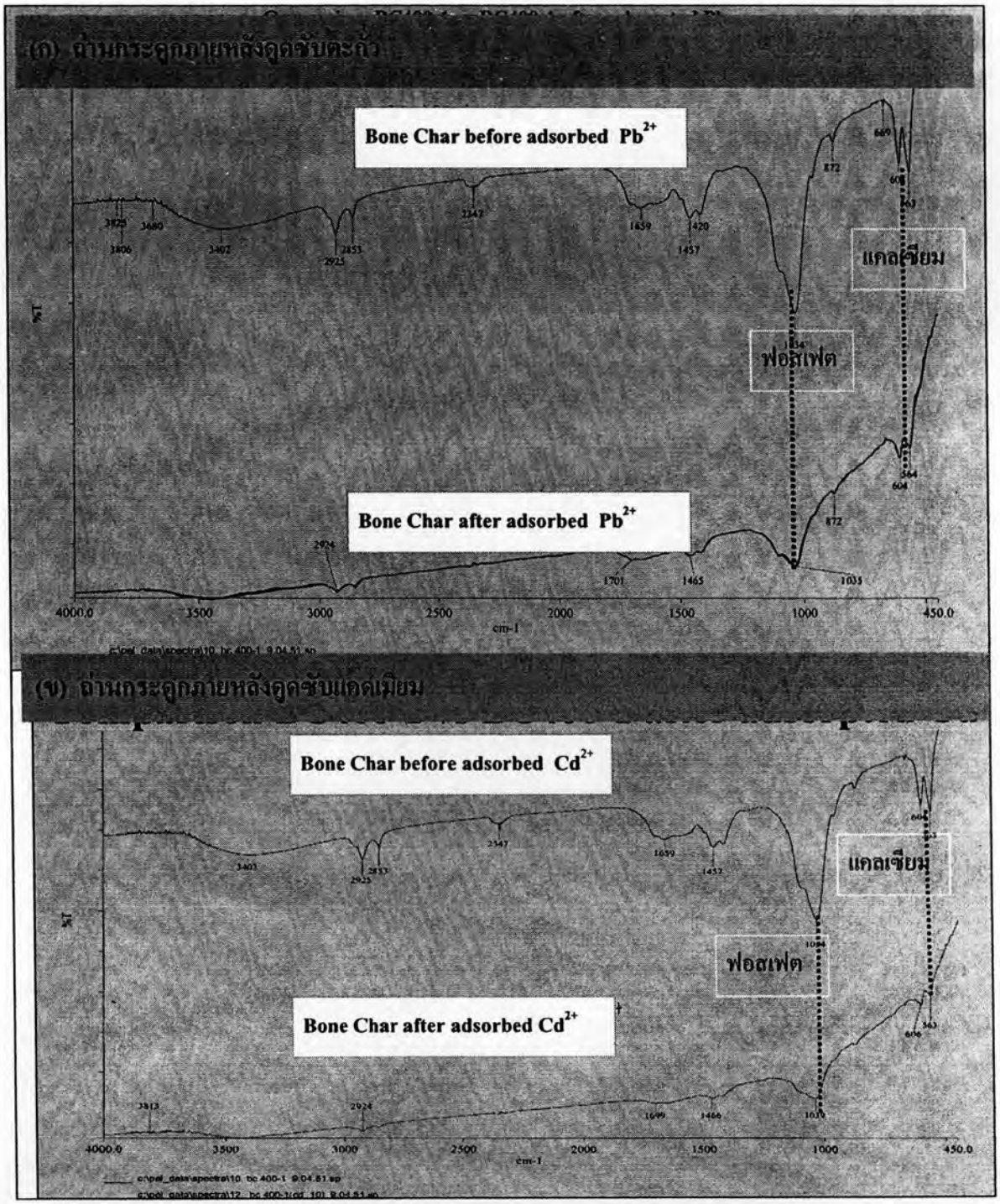
ฟอสเฟตลดน้อยลงเนื่องจากการเข้าแทนที่ของไอออนตะกั่วหรือไอออนแคดเมียมในโครงสร้างขององค์ประกอบของถ่านกระดูก (ภาพที่ 4.11)

ถ่านกัมมันต์กระดูกภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมการแทนที่ ของไอออนตะกั่วหรือไอออนแคดเมียมในโครงสร้างขององค์ประกอบของถ่านกัมมันต์กระดูกให้ผลใกล้เคียงกันมากกับถ่านกระดูกคือกลุ่มของแคลเซียมและฟอสเฟตลดน้ออยลงเมื่อเปรียบเทียบกับผงกระดูกก่อนการดูดซับ (ภาพที่ 4.12(ก) และภาพที่4.12(ข))

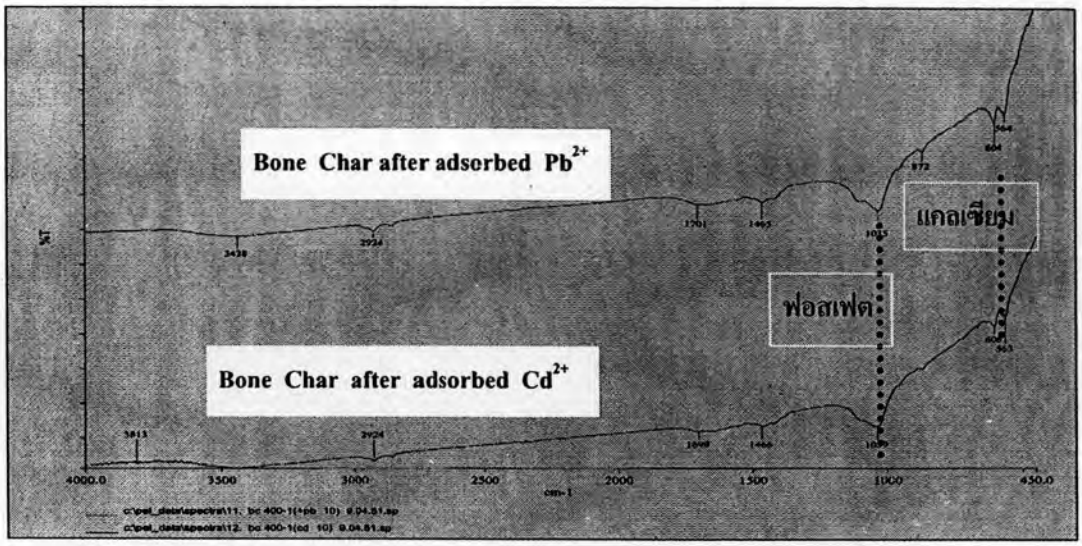
การศึกษานี้จะเห็นว่าเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น(ion-exchange)ในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม สามารถสรุปกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีที่ลดน้อยลงเนื่องจาก ไอออนตะกั่วและไอออนแคดเมียมส่วนหนึ่งเข้าแทนที่ไอออนแคลเซียมในองค์ประกอบของสารดูดซับกระดูกทั้งสามชนิดซึ่งยืนยันได้จากการตรวจพบปริมาณแคลเซียมในสารละลายฟิลเตรทภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมที่ช่วงเวลาต่างกัน ซึ่งจะได้ศึกษาปริมาณแคลเซียมที่ถูกแทนที่ด้วยไอออนตะกั่วและไอออนแคดเมียมใน ข้อ 4.5 ต่อไป



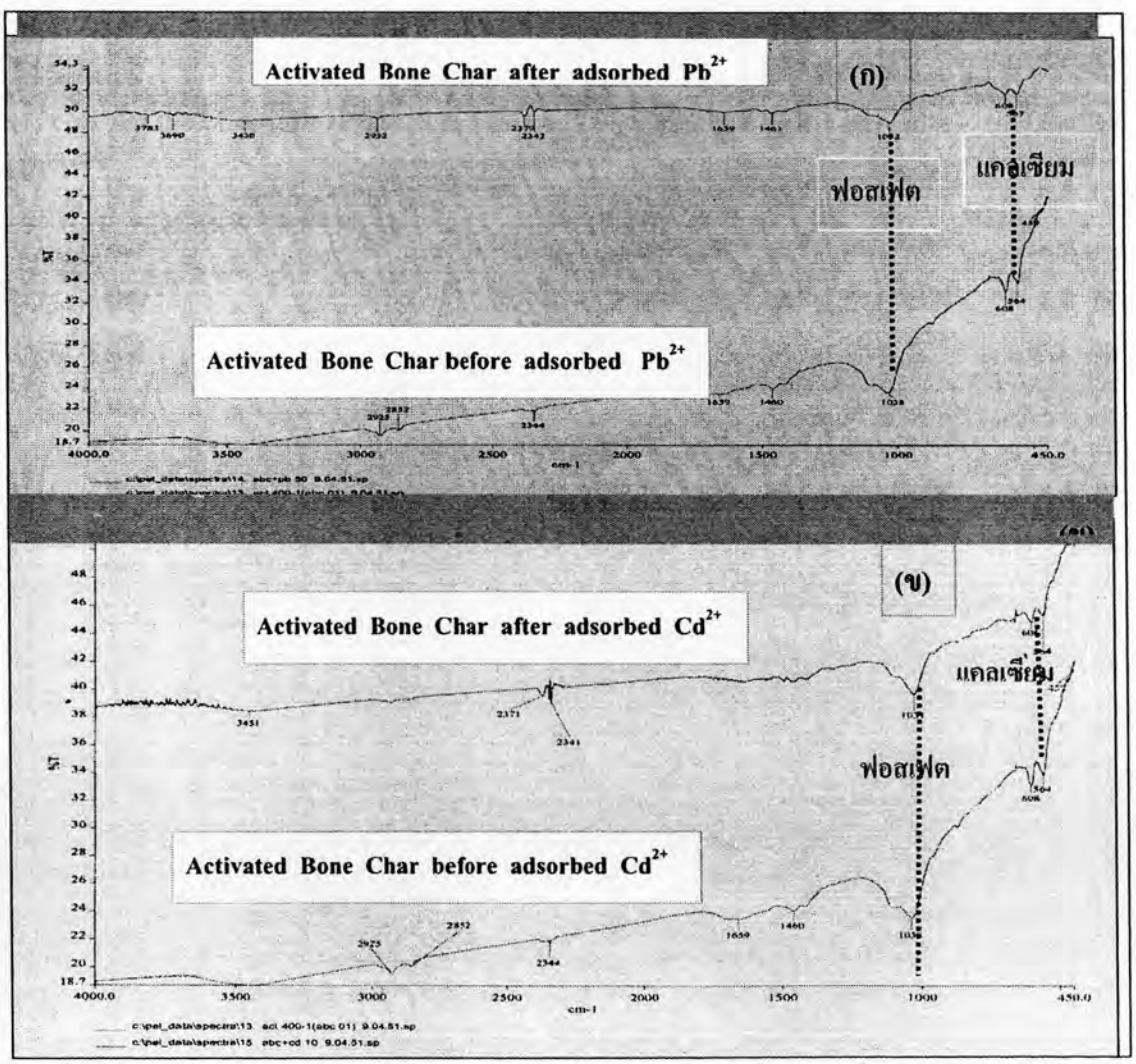
ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของผงกระดูกก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข)



ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกระดูกก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข)



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกระดูกภายหลังการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบกลุ่มองค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์กระดูกก่อนและหลังการดูดซับตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข)

4.2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารดูดซับกระดูกด้วยเครื่องเอกซเรย์ ดิฟเฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer: XRD;Bruker AXS-D8 Discover)

การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารดูดซับกระดูกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคโตมิเตอร์ ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียมเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก และผลึกของสารประกอบใหม่ที่เกิดขึ้น(ภาคผนวก ข)

4.2.5.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารดูดซับกระดูกก่อนการดูดซับ สารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียม

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของสารดูดซับที่เตรียมจากกระดูกหมูจากร้านอาหาร กระดูกหมูสดจากตลาด ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก ที่เตรียมจากกระดูกจากร้านอาหาร โดยใช้เครื่อง XRD (Bruker AXS-D8 Discover) (ภาคผนวก ข) พบว่าสารดูดซับทั้งหมดมีองค์ประกอบหลักเป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ สูตรเคมี $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ เป็นผลึกรูปหกเหลี่ยม (hexagonal) โดยค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส(Ca/P)แตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างชนิดสารดูดซับ กระดูกสดและกระดูกต้มจากร้านอาหารมีค่าอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส(Ca/P) เป็น 1.70±0.01 ซึ่งมีมิติของผลึกด้าน a และ b เท่ากัน เท่ากับ 9.418 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.884 อังสตรอม (ภาคผนวก ข., ภาพที่ ข-1 และภาพที่ ข-2) เมื่อเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกและขนาดผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ของกระดูกหมูกับกระดูกวัว จะเห็นว่าโครงสร้างผลึกและองค์ประกอบหลักทางเคมีและอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของกระดูกหมูกับ กระดูกโค-กระบือใกล้เคียงกันมากและใกล้เคียงกับโครงสร้างของแร่ฟลูออโรอะพาไทต์ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$ โดยกระดูกวัวมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีโครงสร้างผลึกเป็นรูปหกเหลี่ยม มีมิติของผลึกด้าน a และ b เท่ากัน เท่ากับ 9.423 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.875 อังสตรอม สูตรเคมีเป็น $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส(Ca/P) เป็น 1.67 ถึง 2.0 ขึ้นอยู่กับวิธีเตรียม(Aoki, 1991 อ้างใน วรรณา โฆสิตมงคล, 2538)

สำหรับถ่านกระดูกเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและถ่านกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง รวมทั้งถ่านกัมมันต์กระดูกมีสูตรทางเคมี และมิติของผลึกเหมือนกันกับของกระดูกหมูสดและกระดูกหมูต้ม (ภาคผนวก ข., ภาพที่ข-3 , ภาพที่ ข-4 และ ภาพที่ ข-5 ตามลำดับ) ต่างกันที่ปริมาณแคลเซียม คาร์บอนและฟอสฟอรัส เมื่อกระดูกผ่านการเผาจะมีปริมาณร้อยละของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิที่เผา แต่อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสค่อนข้างคงที่คือยังคงอยู่ในช่วง 1.71- 1.72 (ตารางที่ 4.3)

4.2.5.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของสารดูดซับกระดูกภายหลังการดูดซับ สารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียม

กระดูกสด กระดูกต้ม ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกเมื่อดูดซับสารละลายตะกั่วแล้วนำไปอบแห้งและนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าเกิดผลึกเฮกซา โกนัลของเลดฟอสเฟต ($Pb_3(PO_4)_2$) ซึ่งมีขนาดผลึกใหญ่กว่าผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูกหมู คือมีด้านทั้งสามยาวกว่าเดิมโดย ด้าน a เท่ากับด้าน b เท่ากับ 9.8260 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 7.3570 อังสตรอม(ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ของกระดูกหมูก่อนการดูดซับมีมิติของผลึกด้าน a และ b เท่ากัน เท่ากับ 9.4180 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.8840 อังสตรอม) ได้กราฟของ XRD ของสารดูดซับกระดูกทั้งห้าชนิดภายหลังการดูดซับสารละลายตะกั่ว (ภาคผนวก ข. ภาพที่ ข-6, ภาพที่ ข-8, ภาพที่ ข-10, ภาพที่ ข-12 และ ภาพที่ ข-14 ตามลำดับ)

กระดูกสด กระดูกต้ม ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกเมื่อดูดซับสารละลายแคดเมียมแล้วนำไปอบแห้งและนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย XRD พบว่าเกิดผลึกเฮกซาโกนัลของแคลเซียมแคดเมียมฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ ($Ca3.9(Ca4.7Cd0.7)(PO_4)_6(OH)1.8$) ที่มีขนาดผลึกใกล้เคียงกันมากกับผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์คือมีด้าน a และ b เท่ากัน เท่ากับ 9.4100 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.8750 อังสตรอม(ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ของกระดูกหมูก่อนการดูดซับมีมิติของผลึกด้าน a และ b เท่ากัน เท่ากับ 9.4180 อังสตรอม ด้าน c เท่ากับ 6.8840 อังสตรอม) ได้กราฟของ XRD ของสารดูดซับกระดูกทั้งห้าชนิดภายหลังการดูดซับสารละลายแคดเมียม (ภาคผนวก ข. ภาพที่ ข-7, ภาพที่ ข-9, ภาพที่ ข-11, ภาพที่ ข-13 และ ภาพที่ ข-15 ตามลำดับ)

4.2.6 การศึกษาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับกระดูก

จากการศึกษาใน 4.2.4 และ 4.2.5 ด้วยวิธี FTIR และ XRD ทำให้ทราบชนิดของกลุ่มฟังก์ชันนัล (functional groups) ว่ามีกลุ่มอะไรบ้างในโครงสร้างของสารดูดซับที่การเตรียมสภาวะต่างๆ รวมทั้งจากการศึกษา XRD ทำให้คาดคะเนว่ามีผลึกของสารอะไรบ้างที่เกิดขึ้น ในปริมาณสูงหรือต่ำและขนาดของผลึกมีขนาดเท่าเดิมหรือใหญ่ขึ้น แต่ไม่ทราบปริมาณที่แน่นอน

ดังนั้นการหาปริมาณสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของผงกระดูก (ต้มและสด) รวมทั้งถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูกด้วย CHNSO Analyser (Perkin Elmer OE 2400 Series II) จะบอกปริมาณ ร้อยละของคาร์บอน ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุฟอสฟอรัส แคลเซียม ตะกั่ว และ

แคดเมียม ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescent Diffractometer (Oxford – ED 2000) ผลการทดลองได้วิเคราะห์ 3 ครั้งและรายงานเป็นค่าเฉลี่ย สรุปผลตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารดูดซับกระดูก

ชนิดสารดูดซับ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					Ca / P
	ฟอสฟอรัส(P)	แคลเซียม (Ca)	ตะกั่ว (Pb)	แคดเมียม (Cd)	คาร์บอน (C)	
กระดูก(สด)	10.43	17.88	< 0.01	< 0.01	24.602	1.71
กระดูก(ต้ม)	9.96	16.95	< 0.01	< 0.01	31.173	1.70
ถ่านกระดูก(BC350-1)	12.84	22.14	< 0.01	< 0.01	22.866	1.72
ถ่านกระดูก(BC400-1)	12.98	22.42	< 0.01	< 0.01	22.693	1.72
ถ่านกัมมันต์กระตุ้นด้วยเกลือแกง(ABC400-1)	13.61	23.21	< 0.01	< 0.01	22.306	1.71

จะเห็นว่าปริมาณร้อยละของธาตุองค์ประกอบของสารดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นรวมทั้งการกระตุ้นทำให้ปริมาณสารดูดซับมีร้อยละของฟอสฟอรัสและแคลเซียมเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณธาตุคาร์บอนลดลง เนื่องจากการเตรียมที่อุณหภูมิสูงขึ้นและการเผาซ้ำ(เมื่อสารดูดซับผ่านการกระตุ้น) ทำให้การสูญเสียปริมาณคาร์บอนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาด้วย FTIR คืออุณหภูมิการเตรียมสูงขึ้น ปริมาณอินทรียสาร สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และปริมาณคาร์บอนลดลง

องค์ประกอบของสัดส่วนธาตุแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส(Ca/P) ของสารดูดซับ5 ชนิดที่เตรียมจากกระดูก มีอัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส (Ca/P) เป็น 1.71 ± 0.01 ซึ่งองค์ประกอบนี้สูงกว่าสัดส่วนของ Ca/P ของกระดูกโค-กระบือเล็กน้อย มีค่า 1.67 ถึง 2.0 (อ้างใน วรรณา โฆสิตมงคล , 2538)

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมที่ความเข้มข้นต่างกันโดยการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Test) ด้วยสารดูดซับที่เตรียมได้ในข้อ 4.1

การทดลองหาประสิทธิภาพหรือความจุในการดูดซับ(adsorptive capacity)ของการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของสารดูดซับจากกระดูกหมู โดยหาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสม เช่น เวลาสัมผัส ปริมาณสารดูดซับ และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ โดยเลือกพีเอชของสารละลายเริ่มต้น เป็น 5.0±0.1 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับสารดูดซับกระดูกในการกำจัด

ตะกั่วและแคดเมียม จากการศึกษาและทบทวนผลงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับกระดูกวัวสรุปว่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4-6 (Sameer, 1999 ; Danny, 2003; Aklil, et al , 2004; Keith, et al, 2005 ; อุบลรัตน์ 2544; ศุภกิจ 2545; จักรพงษ์ 2548)

4.3.1 การทดลองหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับสารดูดซับกระดูกในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมโดยการทดลองแบบแบตช์

การทดลองนี้ได้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของผงกระดูกและถ่านกระดูกเผาที่ 300 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เท่านั้น เนื่องจากเป็นสารดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วตามลำดับ

4.3.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว

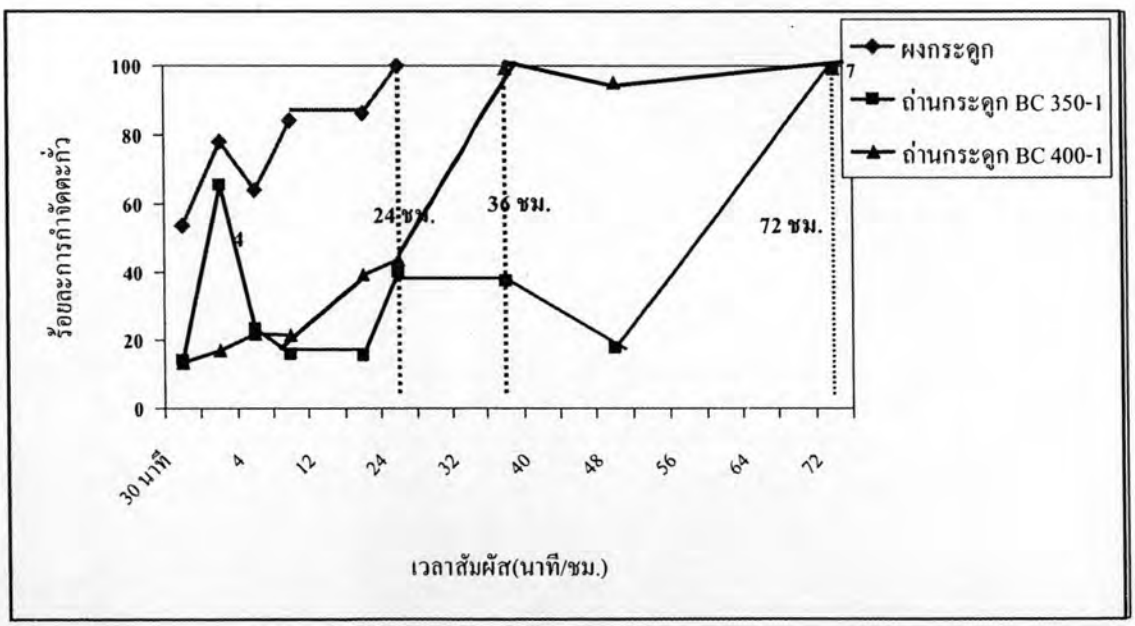
ชั่งผงกระดูก(ต้ม) 0.02, 0.05, 0.10 และ 0.20 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่างใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5.0±0.1 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที (shaker VRN – 360, Japan) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา 10 นาที , 20 นาที, 30 นาที, 1 , 4 , 8 , 16 , 24 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง No. 42 (0.45 ไมครอน) และนำไปหาปริมาณตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วย AAS (shimadzu AA – 6800 F, Japan) ผลการทดลองภาคผนวก ค. ตารางที่ค-1 ถึง ตารางที่ ค-2 และสรุปผลตามตารางที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.13

ถ่านกระดูก (BC 350-1) และ ถ่านกระดูก(BC400-1) ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.006, 0.015, 0.02, 0.05 และ 0.10 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง และทำการทดลองใช้สภาวะเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ผงกระดูก แต่ใช้เวลาเขย่า 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลาดังนี้ 10, 20, 30 นาที 1, 4, 8,16,24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง ผลการทดลอง ภาคผนวก ค. ตารางที่ค-3 ถึง ตารางที่ ค-7 และสรุปผลตามตารางที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.13

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองหา เวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยสารดูดซับกระดูก

ปัจจัยที่ทดสอบ	ผงกระดูกต้ม (BP) 0.020 ก./ล.	ถ่านกระดูก (BC350-1) 0.006 ก./ล.	ถ่านกระดูก (BC400-1) 0.006 ก./ล.
ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหลือ(มก./ล.)	0	5.53	0.080
ร้อยละการกำจัด	100	99.28	99.26
ประสิทธิภาพในการกำจัด (x/m)	417	1828.73	1828.38
เวลาสัมผัส (ชม.)	24	72	72

เวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วของกระดูกต้มพบว่าเวลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณสารดูดซับที่ใช้ และชนิดของสารดูดซับ หากใช้สารดูดซับปริมาณมาก จะเข้าสู่ภาวะสมดุลยเร็ว เช่น กระดูกต้ม ถ้าใช้ปริมาณ 0.2 กรัมต่อลิตรจะเข้าสู่สมดุลใน 10 นาที สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99.9 (ตารางที่ ค-2) เมื่อลดปริมาณผงกระดูกต้มลงมาเหลือ 0.02 กรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลใน 24 ชม. โดยกำจัดได้ร้อยละ 100 (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-1)



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูก

สำหรับถ่านกระดูกเตรียมโดยการเผาที่ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เวลาสัมผัสขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านที่ใช้เช่นเดียวกัน หากใช้ปริมาณถ่านมาก การเข้าสู่สมดุลจะใช้เวลาน้อย เมื่อใช้

ปริมาณถ่าน 0.1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 ภายใน 24 ชม.(ตารางที่ ค-7) แต่ถ้าลดปริมาณถ่านลงมาเหลือ 0.006 กรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลภายใน 72 ชั่วโมง สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 (ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-3)

ถ่านกระดูกเตรียมโดยการเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เวลาสัมผัสขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านที่ใช้เช่นเดียวกัน หากใช้ปริมาณถ่านมาก การเข้าสู่สมดุลจะใช้เวลาน้อย เมื่อใช้ปริมาณถ่าน 0.05 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 ภายใน 36 ชม.(ตารางที่ ค-6) แต่ถ้าลดปริมาณถ่านลงมาเหลือ 0.006 กรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลย์ภายใน 72 ชั่วโมง สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 (ตารางที่ ค-3)

ดังนั้นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วโดยทั่วไปอยู่ที่ 24 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ใช้ถ่านกระดูกโค-กระบือในการกำจัดตะกั่ว (อุบลรัตน์, 2544; ศุภกิจ, 2545)

4.3.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียม

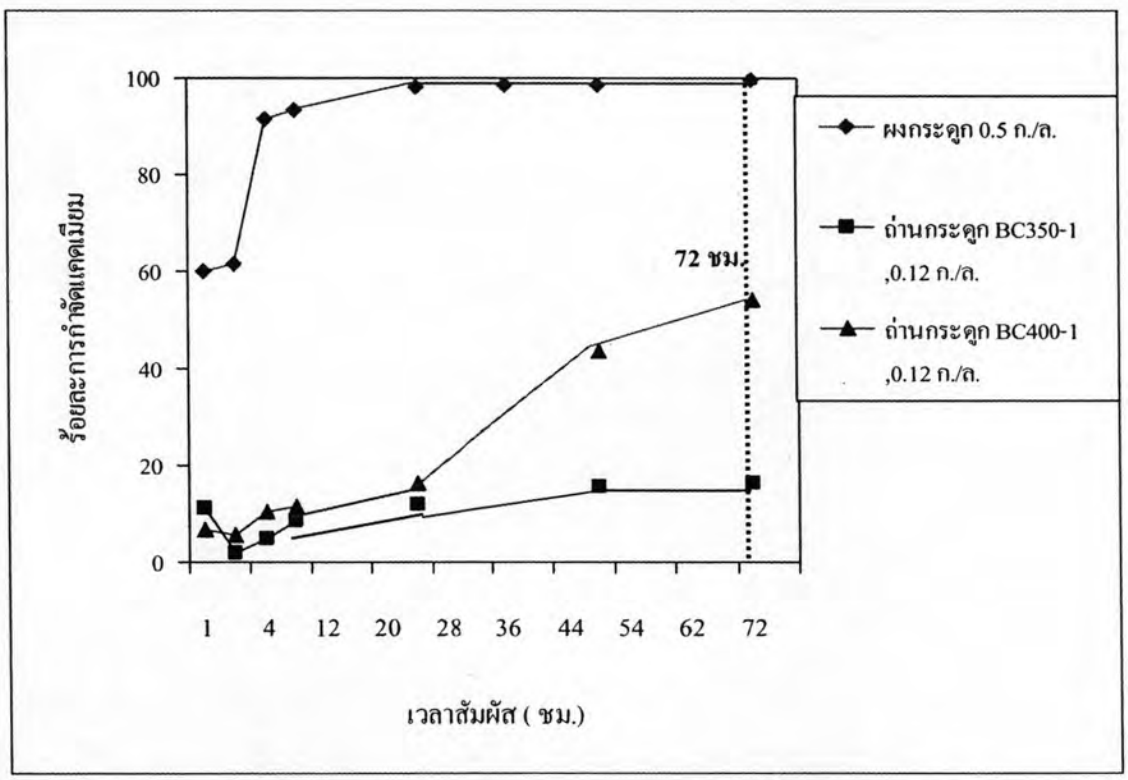
ชั่งผงกระดูก(ต้ม) ปริมาณ 0.02, 0.05,0.10,0.50,0.8 และ 1.2 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่างลงในขวดพลาสติก 120 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ แคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 50 มิลลิลิตร ที่พีเอช 5.0±0.1 เขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลาคือ 30 นาที 1, 4, 8, 24, 36, 48 และ 72 ชั่วโมง นำไปกรองผ่านกระดาษกรอง No.42 (0.45ไมครอน) และนำไปหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือในสารละลายด้วย AAS ผลการทดลองภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-8 ถึง ตารางที่ ค-10 และสรุปผลตามตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14

ถ่านกระดูก BC350-1 ใช้ปริมาณ 0.02, 0.06, 0.08, 0.10 และ 0.12 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ส่วนถ่านกระดูก BC400-1ใช้ปริมาณ 0.02, 0.06 และ 0.12 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใช้สภาวะการทดลองเหมือนกับการทดลองหาเวลาสัมผัสโดยใช้ผงกระดูก ผลการทดลองภาคผนวก ค. ตารางที่ ค-11 ถึง ตารางที่ ค-15 และสรุปผลตามตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.14

เวลาที่เหมาะสมของการกำจัดแคดเมียมโดยใช้ปริมาณสารดูดซับมากหรือน้อยไม่มีผลต่อเวลาการเข้าสู่สภาวะสมดุล เวลาที่เหมาะสมคือ 72 ชั่วโมงสำหรับผงกระดูกและถ่านกระดูก ผลการทดลองนี้แสดงอย่างชัดเจนสำหรับแคดเมียม ซึ่งต่างจากเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการกำจัดตะกั่วที่ปริมาณสารดูดซับเป็นปัจจัยกำหนดเวลาสัมผัส การทดลองนี้ยืนยันตรงกันกับงานวิจัยที่ใช้สารดูดซับจากกระดูกโคกระบือในการกำจัดแคดเมียม (Danny และคณะ, 2003; จักรพงษ์, 2548)

ตารางที่ 4.5 เวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยสารดูดซับกระดูก

ปัจจัยที่ทดสอบ	กระดูกต้มBP (ก./ล.)		ถ่านกระดูก BC350-1 (ก./ล.)		ถ่านกระดูก BC400-1 (ก./ล.)	
ปริมาณสารดูดซับ	0.02	0.10	0.02	0.10	0.02	0.12
ร้อยละของการกำจัด	85	25	11	15	8	54
ประสิทธิภาพในการกำจัด (x/m)	383	23	48	13	30	38
เวลาสัมผัสที่เหมาะสม (ชม.)	72	72	72	72	72	72



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาสัมผัสกับร้อยละในการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูก

4.3.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมกับประสิทธิภาพการกำจัดของสารดูดซับกระดูก

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะในช่วง 10-40 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ พีเอช 5±0.1 ปริมาณสารดูดซับผงกระดูก 0.02-0.40 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์50 มิลลิลิตรในขวดพลาสติก 120 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ในเวลา 24 และ 72 ชั่วโมง

สำหรับตะกั่วและแคดเมียม ตามลำดับ เก็บตัวอย่างในแต่ละช่วงเวลา 10 นาที, 20 นาที, 30 นาที, 1, 4, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรอง No.42 ไปวัดค่าความเข้มข้นของโลหะที่เหลือในน้ำตัวอย่างภายหลังการกำจัดด้วย AAS การทดลองใช้สารดูดซับผงกระดูก (ต้ม)

4.3.2.1 สารละลายตะกั่ว

ใช้สารละลายตะกั่วเข้มข้น 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณผงกระดูกต้ม 0.02, 0.05, 0.10, 0.20 และ 0.40 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ผลการทดลองภาคผนวก ง, ตารางที่ง-1 ถึง ตารางที่ ง-10 และสรุปผลตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วกับประสิทธิภาพการกำจัดและร้อยละการกำจัดของสารดูดซับกระดูกต้ม ในเวลา 24 ชั่วโมง

ปัจจัยที่ทดสอบ	Co = 10 มก./ล		Co = 20 มก./ล		Co = 40 มก./ล	
	m = 0.02 (ก./ล.)	m = 0.10 (ก./ล.)	m = 0.02 (ก./ล.)	m = 0.10 (ก./ล.)	m = 0.10 (ก./ล.)	m = 0.20 (ก./ล.)
ร้อยละของการกำจัด	100	100	70	100	61	96
ประสิทธิภาพในการกำจัด (มก./ก.)	417	98	736	212	243	191

Co = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

m= น้ำหนักของกระดูก (ต้ม) ที่ใช้ในการดูดซับ หน่วยเป็น กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าที่ปริมาณสารดูดซับน้อยๆ (0.10 กรัมต่อลิตร)สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 100 ที่ความเข้มข้นต่ำๆ (10 และ 20 มก./ล) แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะต้องเพิ่มปริมาณสารดูดซับมากขึ้น (0.20 กรัมต่อลิตร) ร้อยละการกำจัดตะกั่วเป็น 96 ความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว คือที่ความเข้มข้นต่ำ 10-20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.02 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง

ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วเริ่มต้นต่ำ (10 มิลลิกรัมต่อลิตร)มีความจุในการดูดซับดีกว่าที่ความเข้มขั้นสูง ในปริมาณสารดูดซับที่เท่ากันหากแต่ถ้าเพิ่มปริมาณสารดูดซับมากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว เริ่มต้นที่เท่ากัน

4.3.2.2 สารละลายแคดเมียม

ใช้สารละลายแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณผงกระดูกต้มระหว่าง 0.02 ถึง 0.80 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ผลการทดลอง (ภาคผนวก ง, ตารางที่ ง-11 ถึง ตารางที่ ง-27) สรุปผลตามตารางที่ 4.7

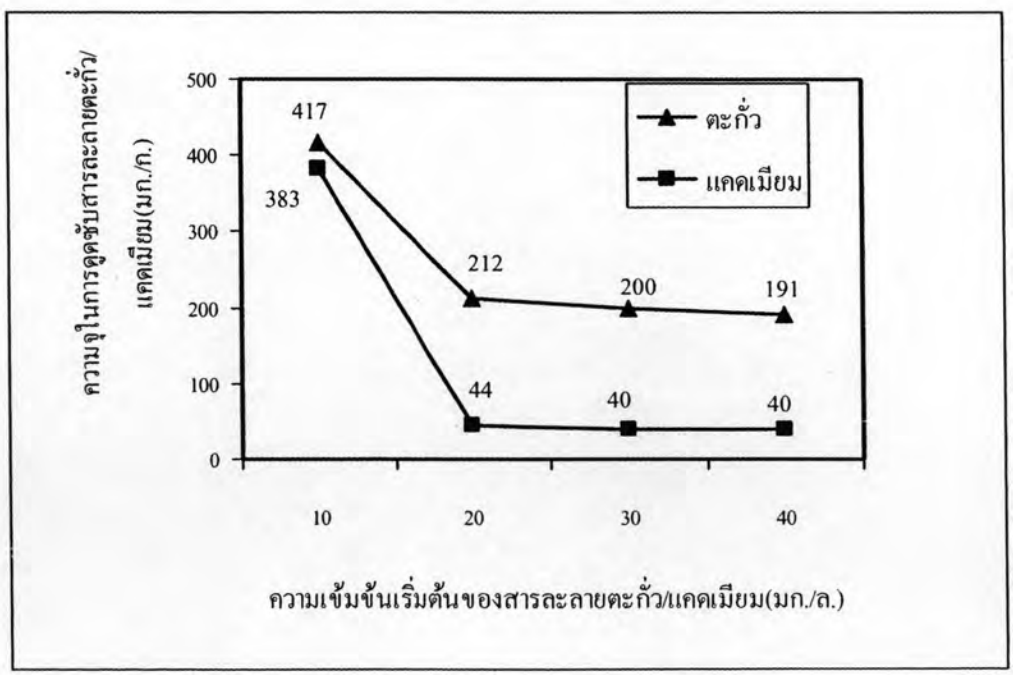
ตารางที่ 4.7 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายแคดเมียม กับประสิทธิภาพการกำจัดและความสามารถในการกำจัดของผงกระดูก (ต้ม) ในเวลา 72 ชั่วโมง

ปัจจัยที่ทดสอบ	Co = 10 มก./ล		Co = 20 มก./ล		Co = 30 มก./ล	
	m=0.02 (ก./ล.)	m=0.50 (ก./ล.)	m=0.20 (ก./ล.)	m=0.50 (ก./ล.)	m=0.02 (ก./ล.)	m=0.70 (ก./ล.)
ร้อยละของการกำจัด	85	99.5	50	100	9	100
ประสิทธิภาพในการกำจัด(มก./ก.)	383	20	56	44	126	40

Co = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียม หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

m= น้ำหนักของกระดูก (ต้ม) ที่ใช้ในการดูดซับ หน่วยเป็น กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง

x/m = ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูก 1 กรัม



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของผงกระดูกกับความเข้มข้นเริ่มต้น

จากผลการทดลองในตาราง 4.7 และภาพที่ 4.15 จะเห็นว่าการกำจัดแคดเมียมด้วยผงกระดูกจะให้ผลดีที่สุดทั้งร้อยละการกำจัดสูงสุดและประสิทธิภาพการกำจัด(ความจุในการดูดซับ) สูงสุดที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 72 ชั่วโมง ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.50 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ประสิทธิภาพการกำจัด 44 มิลลิกรัมต่อกรัม สามารถกำจัดแคดเมียมได้ทั้งหมดร้อยละ 100 ความเข้มข้นต่ำหรือสูงไป กำจัดแคดเมียมได้ไม่หมด ที่ความเข้มข้นสารละลายแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แม้จะมีประสิทธิภาพสูง(383 มิลลิกรัมต่อกรัม)แต่กำจัดแคดเมียมได้เพียงร้อยละ 85 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารดูดซับเป็น 0.05 กรัมต่อลิตร จะสามารถกำจัดแคดเมียมได้เกือบหมด(มากกว่าร้อยละ 99) แต่ประสิทธิภาพหรือความจุในการดูดซับลดลงเหลือ 20 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ

4.3.3 การศึกษาสภาวะการเตรียมสารดูดซับกับประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม

การศึกษาใช้ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 10,20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร สารละลายแคดเมียม 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการเขย่า 24 และ 72 ชั่วโมง สำหรับตะกั่วและแคดเมียม อัตราการเขย่า 175 รอบต่อนาที ขนาดสารดูดซับ 325 เมช หรือ 45 ไมครอน ใช้ปริมาณสารดูดซับ 0.02 – 0.30 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง สำหรับกระดูกสดและกระดูกต้ม 0.006-0.60 กรัมต่อลิตรสำหรับถ่านกระดูก และ0.006-1.2 กรัมต่อลิตร สำหรับถ่านกัมมันต์กระดูก สารดูดซับที่ใช้ในการทดลอง 9 ชนิดได้แก่

ก. กระดูกหมูสดต้ม 10 นาที

ข. กระดูกหมูสดต้ม 10 ชั่วโมง

ค. กระดูกหมูต้มจากร้านอาหาร

ง. ผงกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (BC300-1)

จ. ผงกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (BC350-1)

ฉ. ผงกระดูกเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (BC400-1)

ช. ถ่านกัมมันต์กระดูก กระตุ้นด้วยเกลือแกงอิ่มตัว 6 ชั่วโมง และเผาที่ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (ABC 350-1)

ซ. ถ่านกัมมันต์กระดูก กระตุ้นด้วยเกลือแกงอิ่มตัว 6 ชั่วโมง และเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง (ABC 400-1)

ผลการทดลองภาคผนวก จ. ตารางที่ จ-1 ถึงตารางที่ จ-46

สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของกระดูกต้ม, ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูก ตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.11 ตามลำดับ และภาพที่ 4.16

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของกระดูกสดต้ม 10 นาที, ต้ม 10 ชั่วโมง และกระดูกต้มจากร้านอาหาร

ชนิดสารดูดซับ	ร้อยละการกำจัดตะกั่ว			ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว(มก./ก.)		
	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.
กระดูกสดต้ม 10 นาที	20.66	100	52.45	56.49	233.30	54.0
กระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง	6.22	68.42	100	20.45	153.48	102.98
กระดูกต้มจากร้านอาหาร	39.09	100	99.97	102.8	233.30	102.95

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่างกันกับถ่านกัมมันต์กระดูก

	BC300-1	BC350-1	BC400-1	ABC300-1	ABC350-1	ABC400-1
ร้อยละการกำจัด	50.76	99.28	99.28	26.89	24.08	98.94
ประสิทธิภาพการกำจัด(มก./ก.)	123.75	1829	1829	375.35	268.9	690.50

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ของกระดูกสดต้ม 10 นาที, ต้ม 10 ชั่วโมง และกระดูกต้มจากร้านอาหาร

ชนิดสารดูดซับ	ร้อยละการกำจัดแคดเมียม			ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (มก./ก.)		
	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.
กระดูกสดต้ม 10 นาที	91.57	87.73	96.88	10.50	7.43	10.68
กระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง	97.31	90.74	97.77	12.24	7.71	12.96
กระดูกต้มจากร้านอาหาร	84.69	100.00	100.00	382.53	44.06	40.13

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของกระดูกต้ม ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูก

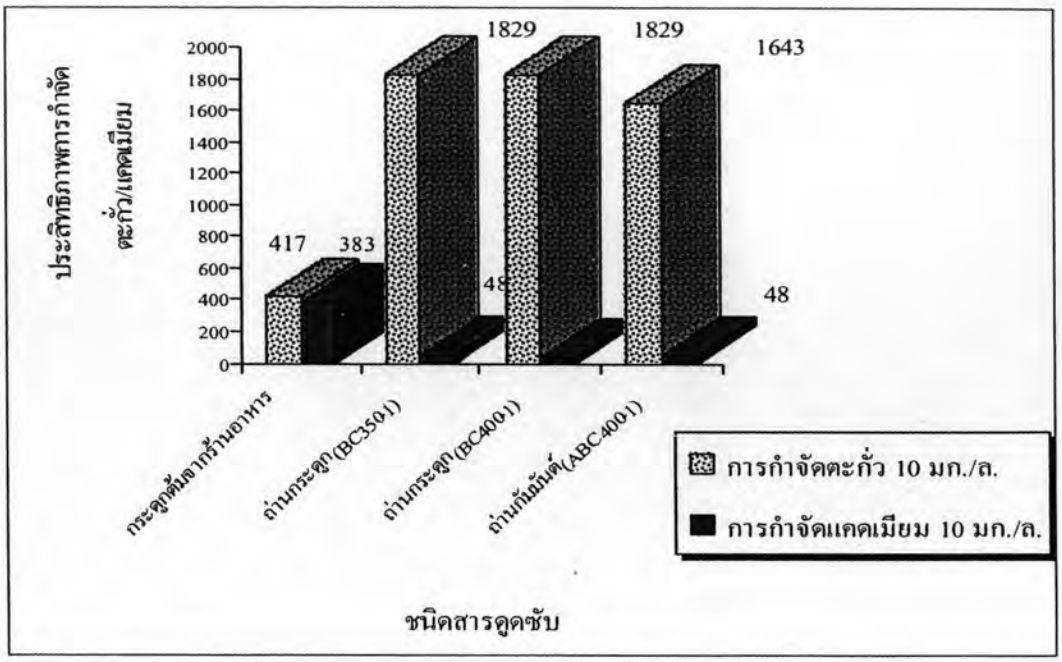
ผลการทดลอง	BP	BC350-1	BC400-1	ABC400-1
ร้อยละการกำจัด	85	16.4	88.6	98.7
ประสิทธิภาพการกำจัด (มก./ก.)	382.5	10.6	11.6	6.5

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร กระดูกสดต้ม 10 นาที สามารถกำจัดสารละลายตะกั่วได้หมดและประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่ากระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง ส่วนกระดูกต้มจากร้านอาหารที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 20และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ร้อยละการกำจัดและประสิทธิภาพการกำจัดได้ดีที่สุด แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีความสามามารถในการกำจัดต่ำและประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว 20-30 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าถ่านกระดูกเผาที่ 300 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วหรือความจุในการดูดซับตะกั่วได้ต่ำที่สุดคือ 124 มิลลิกรัมต่อกรัม และกำจัดตะกั่วได้ไม่หมด สามารถกำจัดได้เพียงร้อยละ 51 ส่วนถ่านกระดูกเผาที่ 350 องศาเซลเซียส หรือ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเท่ากัน และเป็นประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับผงกระดูกและถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์กระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 85

ตารางที่ 4.10 กระดูกต้มจากร้านอาหารและกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมงให้ร้อยละการกำจัดและประสิทธิภาพเท่ากันในการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงกว่าถ่านที่เผาที่ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และสูงกว่าถ่านกัมมันต์กระดูก(ตารางที่ 4.11)

กระดูกต้มจากร้านอาหารมีประสิทธิภาพในการกำจัดและร้อยละการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม คือสามารถกำจัดตะกั่วได้หมดร้อยละ 100 และประสิทธิภาพ 417 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าการกำจัดแคดเมียม โดยสามารถกำจัดแคดเมียมได้เพียงร้อยละ 85 และประสิทธิภาพ 383 มิลลิกรัมต่อกรัม ถ่านกระดูกเผาที่ 350 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ 1,829 มิลลิกรัมต่อกรัม เท่ากัน ส่วนถ่านกัมมันต์กระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ 1,643 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูกกำจัดสารละลายแคดเมียมได้น้อยมาก สรุปตามภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของสารดูดซับกระดูกที่เตรียมในสภาวะต่างกัน

4.3.4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของกระดูกสดที่ต้มในเวลาต่างกัน

การวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยกระดูกต้มที่ใช้งานแล้วจากการต้มทำน้ำซุปกับกระดูกสดที่ซื้อจากตลาดและยังไม่ได้ใช้ทำอาหารมาต้มในเวลาต่างกันโดยมีข้อสมมติฐานว่าระยะเวลาการต้มมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะทั้งสอง เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นของงานวิจัยนี้เป็นกระดูกหมูที่ผ่านการต้มเอาน้ำมาทำซุปจากร้านข้าวต้มทรงเครื่อง โดยได้ข้อมูลจากผู้ปรุงว่าผ่านการต้มด้วยไฟอ่อนๆประมาณ 10 ชั่วโมง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเตรียมกระดูกหมูต้ม 10 ชั่วโมง และต้ม 10 นาที โดยนำกระดูกหมูบริเวณเดียวกันตรงขาหน้าและขาหลังแล้วเตรียมเป็นสารดูดซับกระดูกอบด้วยสภาวะเดียวกัน ขนาดอยู่ในช่วงเดียวกันคือร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช แล้วนำมาทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมเข้มข้น10, 20, 30, มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้สารดูดซับ 3 ชนิด ผงกระดูกต้ม (BP) ผงกระดูกสดต้ม 10 นาที (FBP1) ผงกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง (FBP2) เวลาสัมผัส 24 และ 72 ชั่วโมง สำหรับตะกั่วและแคดเมียมตามลำดับ ใช้ปริมาณสารดูดซับเท่ากันในแต่ละความเข้มข้นคือ 0.04, 0.10 และ 0.4 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง สำหรับสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสารดูดซับปริมาณ 0.04, 0.5 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่างแคดเมียมที่ความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ นำสารละลายโลหะที่เหลือหลังการกำจัดกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42ไปหาปริมาณโลหะที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS ได้ผลตามตารางที่ 4.12, 4.13

ตารางที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารดูดซับกระดูกต้มที่ต้มเวลาต่างกัน

ชนิดสารดูดซับ	ร้อยละการกำจัดสารตะกั่ว			ร้อยละการกำจัดแคดเมียม		
	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.
กระดูกต้มจากร้านอาหาร(BP)	39.1	100	100	97.7	100	100
กระดูกสดต้ม 10 นาที (FBP1)	20.7	100	52	91.6	87.73	96.88
กระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง (FBP2)	6.2	68.4	100	97.3	90.74	97.77

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่วและแคดเมียมความเข้มข้น 10, 20, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารดูดซับกระดูกต้มและกระดูกสดที่ต้มเวลาต่างกัน

ชนิดสารดูดซับ	ประสิทธิภาพการกำจัดสารตะกั่ว (มก./ก.)			ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม (มก./ก.)		
	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.	10 มก./ล.	20 มก./ล.	30 มก./ล.
กระดูกต้มจากร้านอาหาร(BP)	102.8	233.3	103	12.25	44.06	40.13
กระดูกสดต้ม 10 นาที (FBP1)	56.5	233.3	54	10.50	7.43	10.68
กระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง(FBP2)	20.5	153.5	103	12.24	7.71	12.96

การกำจัดตะกั่วด้วยกระดูกต้มจากร้านอาหารให้ผลดีที่สุดในทั้งสามช่วงความเข้มข้น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยให้ประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถกำจัดได้ร้อยละ 100 ส่วนกระดูกต้ม 10 นาทีให้ผลดีที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนกระดูกต้ม 10 ชั่วโมงให้ผลดีที่ความเข้มข้นสูงที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยให้ประสิทธิภาพและร้อยละการกำจัดสูงเท่ากับกระดูกจากร้านอาหาร แต่ที่ความเข้มข้นต่ำคือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร กระดูกต้ม 10 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพและร้อยละการกำจัดต่ำที่สุด เนื่องจากกระดูกต้ม 10 ชั่วโมงมีขนาดโพรงใหญ่(macro pore) ไอออนตะกั่วจึงเคลื่อนที่เข้าและออกจากโพรงของสารดูดซับได้สะดวก ประกอบกับที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่ำจะมีปริมาณไอออนตะกั่วน้อย แต่โพรงมีขนาดใหญ่และมีปริมาตรโพรงมากเมื่อเทียบกับปริมาณไอออนตะกั่วที่จะถูกดูดซับไว้ แต่ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นคือที่ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงขึ้นและสูงเท่ากับกระดูกต้มจากร้านอาหาร(ประสิทธิภาพการกำจัด 103 มิลลิกรัมต่อกรัมสารดูดซับ) เนื่องจากปริมาณของไอออนตะกั่วมีมากขึ้นและไปห้อมล้อมสารดูดซับที่มีปริมาตรโพรงสูง แม้จะมีโพรงขนาดใหญ่ แต่ไอออนตะกั่วมีความหนาแน่นมากขึ้น ถึงแม้จะหลุดออกจากโพรงได้สะดวกแต่อัตราการกลับเข้าไปอยู่ในโพรงมีสูงขึ้นและมากกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วต่ำ

การกำจัดแคดเมียมของกระดูกต้มทั้ง 3 ชนิดพบว่ากระดูกต้มจากร้านอาหารให้ประสิทธิภาพ สูงสุด และสามารถกำจัดแคดเมียมได้มากกว่าร้อยละ 97 ในทุกช่วงความเข้มข้นที่ทดลอง กระดูกต้ม 10 นาทีให้ผลต่ำที่สุดทุกความเข้มข้น(10-30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนกระดูกต้ม 10 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพและร้อยละการกำจัดเท่ากันกับกระดูกต้มจากร้านอาหารที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ที่ความเข้มข้นสูง(20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่ากระดูกต้มจากร้านอาหาร อธิบายได้ว่าการดูดซับตะกั่วที่ผิวของสารดูดซับกระดูกเป็นแบบการดูดซับชั้นเดียว(mono-layer)และถูกดูดซับไว้ที่ผิวกระดูกเฉพาะเจาะจงบางที่เท่านั้นซึ่งพฤติกรรมการดูดซับแคดเมียมด้วยผงกระดูก ถ่านกระดูกและถ่านกัมมันต์กระดูก ไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบแลงมัวร์ จึงต้องการสารดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะปริมาณมาก ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของะกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง และกระดูกต้มจากร้านอาหาร คือมีพื้นที่ผิวมากที่สุดและมากรองลงไป ส่วนกระดูกสดต้ม 10 นาทีมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำที่สุด ดังนั้นกระดูกสดต้ม 10 นาทีจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมงและกระดูกต้มจากร้านอาหารซึ่งประมาณว่าต้มนาน 10 ชั่วโมง

จากผลการทดลองข้างต้นอาจตั้งข้อสมมติฐานว่าระยะเวลาการต้มนานทำให้สารดูดซับมีขนาดโพรงใหญ่ขึ้นอนุภาคของโลหะจึงเคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกระหว่างสารละลายกับโพรงของสารดูดซับ ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดจึงต่ำ

การวิจัยนี้จึงศึกษาต่อไปโดยหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการต้มกระดูกสดและต้มที่อุณหภูมิต่ำที่ 70 องศาเซลเซียสโดยต้มที่ 10นาที 2, 4, 6, 10 ชั่วโมงแล้วนำกระดูกแต่ละช่วงเวลาไปเตรียมเช่นเดียวกับกระดูกต้มจากร้านอาหาร รวมทั้งนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรง 325 เมช แล้วนำตัวอย่างแต่ละช่วงเวลาในการต้มไปทดลองกำจัดสารละลายตะกั่วเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดและร้อยละการกำจัดใช้ปริมาณสารดูดซับแต่ละชนิด 0.10 กรัมต่อลิตร เวลาสัมผัส 24 ชั่วโมง สามารกำจัดสารละลายตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ร้อยละมากกว่า 99 สำหรับสารดูดซับทั้ง 6 ชนิดที่ทำการทดลอง และนำตัวอย่างกระดูกไปหาคุณสมบัติทางกายภาพเพื่อศึกษาเปรียบเทียบได้ผลการทดลองและการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ สรุปตามตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 คุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกต้มจากร้านอาหารและกระดูกสดที่ต้มในเวลาต่างกัน กับประสิทธิภาพ และ ร้อยละการกำจัดตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

คุณสมบัติทางกายภาพ	กระดูกจากร้านอาหาร	กระดูกสดต้ม 10 นาที	กระดูกสดต้ม 2 ชั่วโมง	กระดูกสดต้ม 4 ชั่วโมง	กระดูกสดต้ม 6 ชั่วโมง	กระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมง
พื้นที่ผิวจำเพาะ ($ม^2$/ก.)	2.78	0.86	1.18	1.72	5.17	6.49
ขนาดโพรง(^{o}A)	36.44	43.65	65.03	119.40	121.20	231.60
ปริมาตรโพรง ($ซม^3$./ก.)	0.0025	0.0009	0.0019	0.0052	0.0154	0.0376
ร้อยละการกำจัด	99.54	99.52	99.77	99.78	99.62	99.73
ประสิทธิภาพการกำจัด(มก./ก.)	108.41	106.31	104.56	108.67	106.41	106.53

จากผลการทดลองยังไม่สามารถสรุปว่าระยะเวลาในการต้มกระดูกที่นำมาเตรียมเป็นสารดูดซับกระดูกมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมเนื่องจากให้ประสิทธิภาพการกำจัดและร้อยละการกำจัดตะกั่วไม่แตกต่างกัน และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพดูปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตร และขนาดของโพรง จะเห็นว่ากระดูกสดต้ม 10 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่ากระดูกสดต้ม 10 นาที ปริมาตรของโพรงและขนาดของโพรงก็มากกว่ากระดูกสดต้ม 10 นาที ขนาดของโพรงกระดูกต้ม 10 นาทีเป็นโพรงขนาดกลาง (meso pores) แต่โพรงของกระดูกต้ม 10 ชั่วโมง เป็นโพรงขนาดใหญ่ (macro pores) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการต้มน่าจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับ แต่สำหรับการวิจัยนี้ไม่สามารถสรุปว่าคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับควบคุมที่ต้ม 10 ชั่วโมงแตกต่างกับกระดูกต้มที่ได้จากร้านอาหาร(ผู้ปรุงอาหารให้ข้อมูลว่าต้มประมาณ 10 ชั่วโมง) เนื่องจากไม่ทราบอุณหภูมิของการต้ม จึงไม่สามารควบคุมตัวแปรด้านอุณหภูมิได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถสรุปว่าช่วงระยะเวลาการต้มที่นานทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกระดูกที่ต้ม 10 ชั่วโมงจากร้านอาหารกับกระดูกสดที่ต้ม 10 ชั่วโมง มีคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันมาก เนื่องจากร้านอาหารไม่ได้ระบุอุณหภูมิที่ต้ม ทราบแต่ว่าต้มประมาณ 10 ชั่วโมง นอกจากนี้เครื่องปรุงในน้ำซุปอาจจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของกระดูกที่นำมาเตรียมสารดูดซับ อย่างไรก็ตามการทดลองสรุปเบื้องต้นว่าการต้มไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

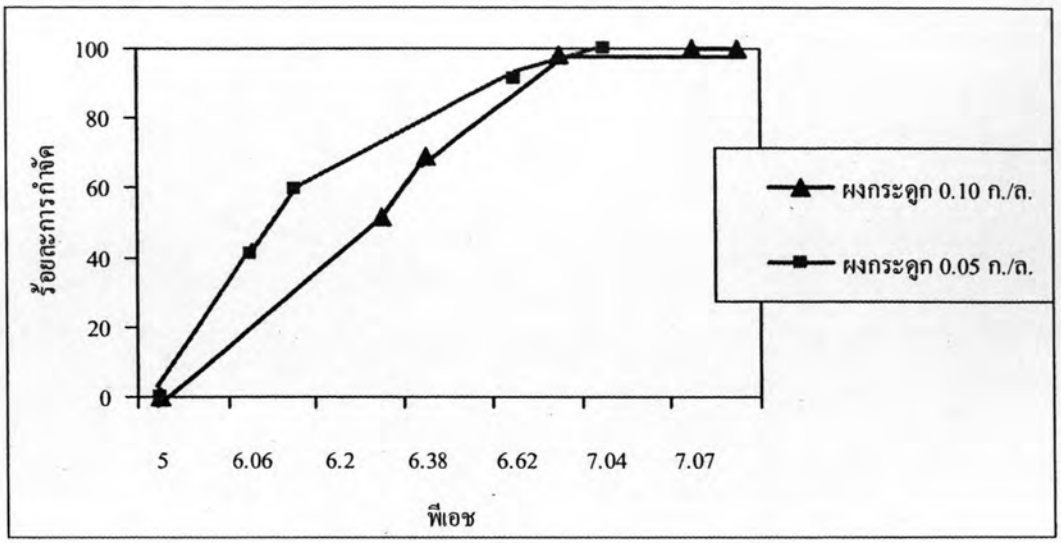
4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายโลหะต่อการตกตะกอนและความ สามารถในการกำจัด

การวิจัยนี้ ได้ศึกษาปัจจัยของพีเอชของสารละลายเริ่มต้นที่เปลี่ยนไปขึ้นกับเวลาสัมผัสและร้อยละของการกำจัด และศึกษาปริมาณการตกตะกอนของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเมื่อพีเอชของสารละลายเปลี่ยนไป โดยเลือกศึกษาในช่วงพีเอช 5 ถึง 7.8 สำหรับสารละลายตะกั่วเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 ถึง 7.2 สำหรับสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นประมาณ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นช่วงพีเอชที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจริงในการทดลองจากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียมในข้อ 4.3

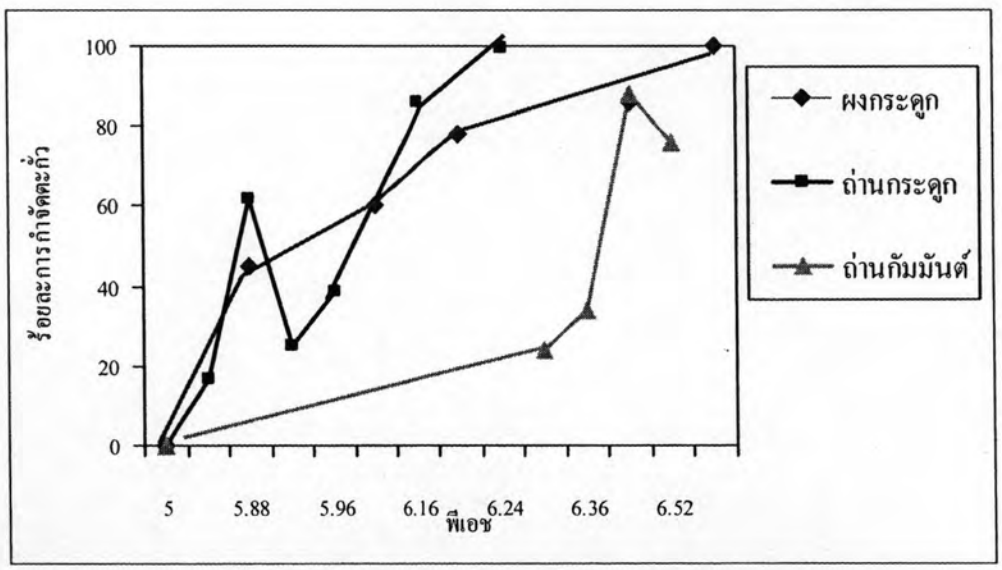
4.4.1 การศึกษาปัจจัยของพีเอชของสารละลายเริ่มต้นที่เปลี่ยนไปขึ้นกับเวลาสัมผัสและร้อยละของการกำจัด

เตรียมสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 10, 20, 30,40 มิลลิกรัมต่อลิตรให้มีพีเอชคงที่เป็น 5.0 ± 0.1 เนื่องจากมีผลงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าสารละลายเริ่มต้นของตะกั่วและแคดเมียมที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมด้วยสารดูดซับกระดูกโค-กระบือ ช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือ 4 ถึง 7 (Azab และคณะ, 1989 ; Ma และคณะ, 1993 ; Aklil และคณะ, 2004 ; จักรพงษ์, 2548 และ ศุภกิจ, 2545) การวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายโลหะทั้งสองในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง และ 72 ชั่วโมง สำหรับตะกั่วและแคดเมียม

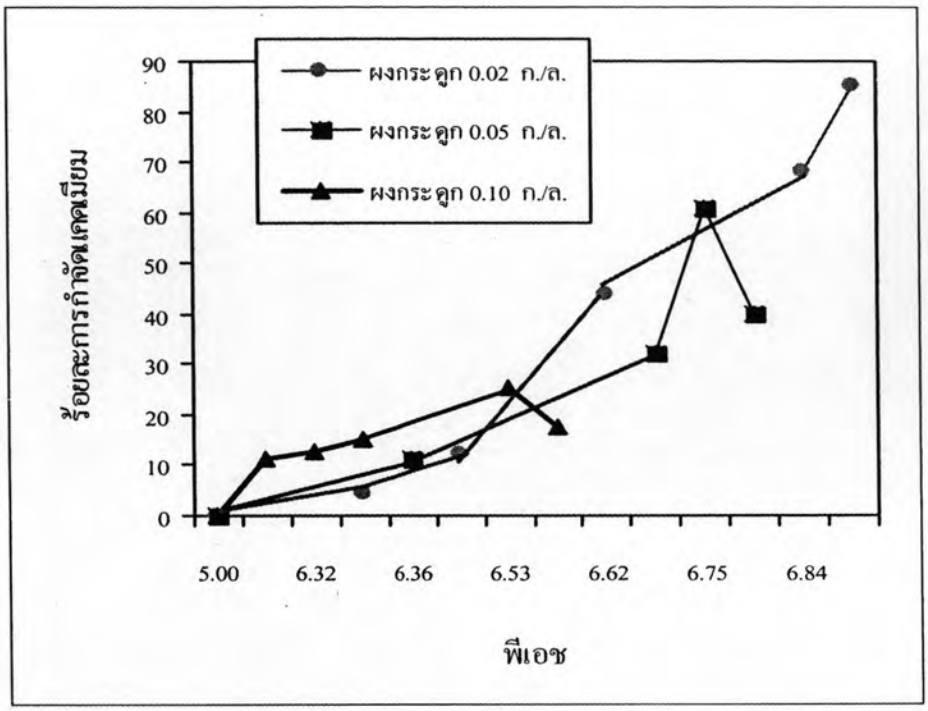
การกำจัดตะกั่วและแคดเมียม พีเอชของสารละลายจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากพีเอชของสารละลายเริ่มต้น โดยแปรผันโดยตรงกับเวลาสัมผัสและร้อยละการกำจัด สำหรับทุกความเข้มข้นของสารละลายโลหะทั้งสอง โดยให้ผลที่เหมือนกันทั้งการกำจัดโดยใช้สารดูดซับผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก กล่าวคือ พีเอชของสารละลายโลหะเริ่มต้นเป็น 5±0.1 ภายหลังการกำจัดพีเอชของสารละลายโลหะจะเข้าใกล้ 7 ถึง 7.5 แสดงว่าการกำจัดเข้าใกล้จุดสมดุลและการกำจัดโลหะทั้งสองเกือบหมด ผลการทดลองภาคผนวก ฉ ตารางที่ ฉ-1 ถึง ตารางที่ ฉ-8 และ ภาพที่ 4.17, ภาพที่ 4.18, ภาพที่ 4.19 และภาพที่ 4.20



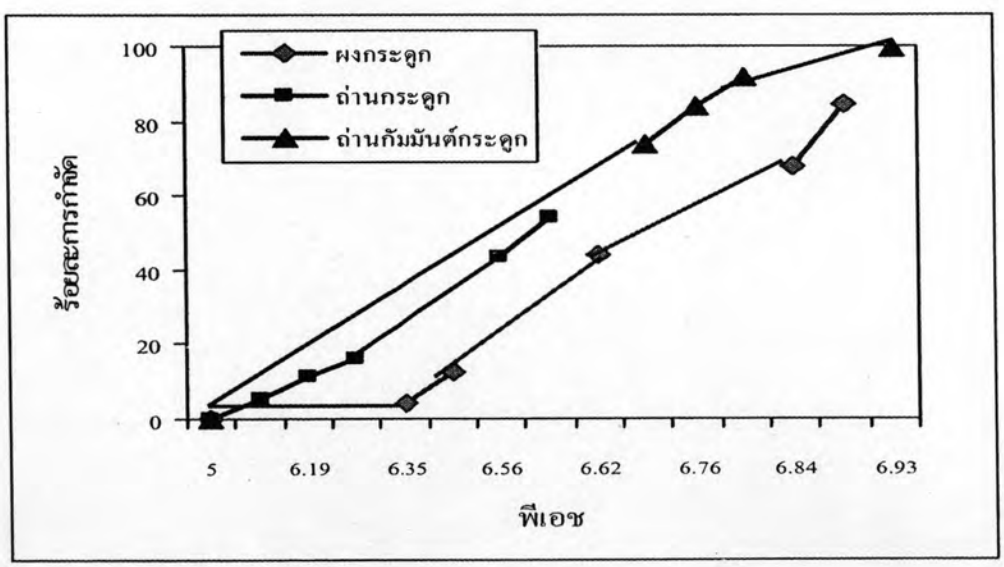
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วภายหลังการกำจัดกับร้อยละของการกำจัดที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกปริมาณต่างกัน



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วภายหลังการกำจัดกับร้อยละของการกำจัดที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกำจัดกับร้อยละการกำจัด เมื่อใช้ปริมาณสารดูดซับผงกระดูกต่างกัน



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกำจัดกับร้อยละการกำจัดที่ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก

4.4.2 ศึกษาปริมาณการตกตะกอนของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเมื่อพีเอชของสารละลายเปลี่ยนไป

4.4.2.1 การตกตะกอนของสารละลายตะกั่ว

เตรียมสารละลายตะกั่วเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอช 5.0±0.1 ใช้ เลดไนเตรท(รีเอเจนต์เกรด)และตวงสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตรใส่บีเกอร์ขนาด100 มิลลิลิตร 12 ใบ ใบละ 50 มิลลิลิตร แล้วปรับพีเอชของสารละลายในแต่ละบีเกอร์ด้วยสารละลายด่างเจือจางโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เพิ่มขึ้นเป็นดังนี้ 5.0, 5.5, 6.0, 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 จะเห็นสารละลายแต่ละบีเกอร์มีการตกตะกอน โดยสารละลายเปลี่ยนจากใสที่พีเอช 5.0 เป็นสาร ละลายขาวขุ่น นำสารละลายแต่ละบีเกอร์ไปกรอง นำสารละลายที่กรองแล้วแต่ละช่วงพีเอชไปหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เหลืออยู่ด้วย AAS ก็จะทราบปริมาณสารละลายตะกั่วที่ตกตะกอนในแต่ละช่วงพีเอชที่เปลี่ยนไป ผลการทดลอง ตารางที่4.15

ตารางที่ 4.15 การตกตะกอนของสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง

พีเอช สารละลายตะกั่ว	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่ว(มก./ล.)	ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วที่ตกตะกอน(มก./ล.)	ร้อยละการตกตะกอน
blank = 5.0	10.3175	0.0000	0.00
5.5	7.1969	3.1206	30.25
6.0	3.4954	6.8219	66.12
6.2	3.4298	6.8877	66.76
6.4	2.4084	7.9091	76.68
6.6	4.7886	5.5289	53.59
6.8	2.2490	8.0685	78.20
7.0	2.2116	8.1059	78.56
7.2	3.2049	7.1126	68.94
7.4	6.7940	3.5235	34.15
7.6	2.0523	8.2652	80.11
7.8	2.7551	7.5624	73.30

จากตารางที่ 4.15 สารละลายตะกั่วจะตกตะกอนสูงสุดร้อยละ 75-80 อยู่ที่พีเอช สามช่วง คือ 6.4, 6.8 และ 7.6 แสดงว่าการกำจัดตะกั่วปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นเป็นการตกตะกอน จึงเห็น

สารละลายขาวขุ่นได้ชัดเจนในการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยสารดูดซับกระดูกทั้งสามชนิดในการทดลองแบบแบทซ์และการทดลองแบบแท่งเกล็ดกระดูก การอธิบายนี้ตรงกันกับผลงานวิจัยกำจัดตะกั่วด้วยกระดูกโค-กระบือของอุบลรัตน์(2544) ได้ให้ความเห็นว่า พีเอชเริ่มต้นของสารละลายตะกั่วในการทดลองแบบแท่งถ่านกัมมันต์กระดูกควรเป็น พีเอช 4 หากใช้สารละลายตะกั่วที่เอช 5 ระบบจะเกิดการตกตะกอนและอุดตันเร็วภายหลังการกรองน้ำเสียได้ปริมาตร 5-6 ลิตร การดูดซับเป็นกระบวนการรองที่เกิดขึ้นซึ่งมีเพียงร้อยละ20-25เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

4.4.2.2 การตกตะกอนของสารละลายแคดเมียม

การศึกษาการตกตะกอนของสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 13, 22 และ 27 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นช่วงความเข้มข้นที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสารละลายแคเมียมสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับเตรียมจากกระดูกหมู การทดลองดำเนินการเช่นเดียวกับการศึกษาการตกตะกอนของสารละลายตะกั่ว แต่ใช้สารละลายกรดเกลือเจือจางและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช ได้ผลการทดลองตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 การตกตะกอนของสารละลายแคดเมียมเข้มข้นประมาณ 13, 22 และ 27 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลง

สารละลายแคดเมียมเข้มข้นประมาณ 13 มก./ล.				สารละลายแคดเมียมเข้มข้นประมาณ 22 มก./ล.			
พีเอช	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ในสารละลาย (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่ตกตะกอน (มก./ล.)	ร้อยละการตกตะกอน	พีเอช	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ในสารละลาย (มก./ล.)	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่ตกตะกอน (มก./ล.)	ร้อยละการตกตะกอน
5.00	13.3720	blank = 0.00	-	5.00	22.4765	blank =0.00	-
5.60	10.8122	2.5598	19.14	5.60	22.2275	0.2490	1.12
6.00	12.4726	0.8994	6.73	6.00	21.7570	0.7195	3.20
6.20	10.0373	3.3347	24.94	-	-	-	-
6.40	12.1405	1.2315	9.21	6.40	22.3520	0.1245	0.55
6.80	12.5279	0.8441	6.31	6.80	20.5671	1.9094	8.50
7.00.	12.8669	0.5051	3.78	7.00.	22.42.00	0.0565	0.25
7.20	12.1128	1.2592	9.42	7.20	22.1445	0.3320	1.48

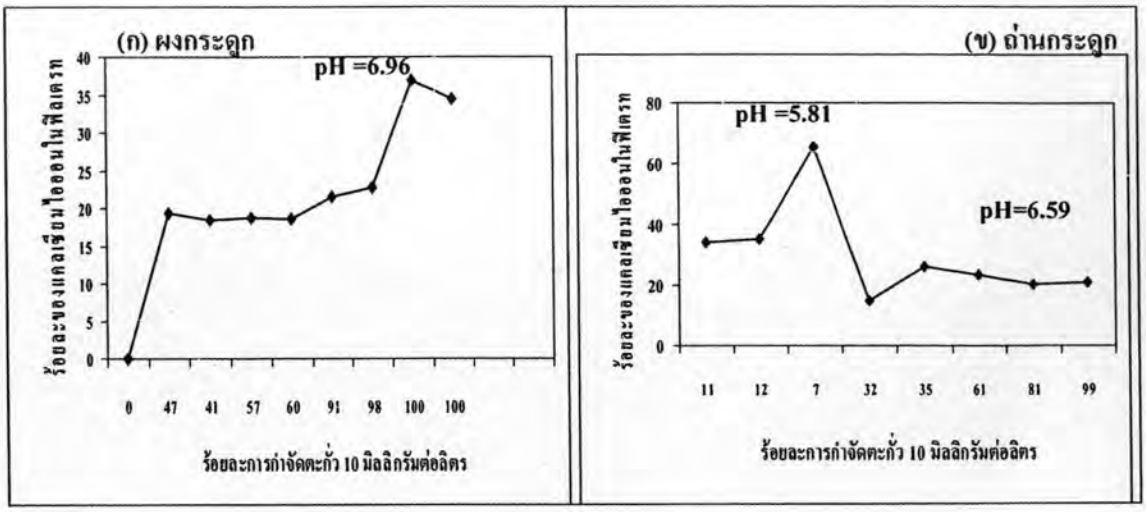
ตารางที่ 4.16(ต่อ) การตกตะกอนของสารละลายแคดเมียมเข้มข้น 27 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลงสูงขึ้น

สารละลายแคดเมียมเข้มข้นประมาณ 27 มก./ล.			
พีเอช	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ในสารละลาย(มก./ล.)	ความเข้มข้นของ Cd^{2+} ที่ตกตะกอน (มก./ล.)	ร้อยละการตกตะกอน
5.00	27.4855	blank =0.00	-
6.20	26.8144	0.6711	2.44
6.51	27.0150	0.4705	1.71
6.80	27.7276	0.2421	0.88
7.00	26.5169	0.8686	3.52

จะเห็นว่าการตกตะกอนของสารละลายแคดเมียมในช่วงการเปลี่ยนแปลงพีเอช 5.0-7.2 มีการตกตะกอนน้อยมากประมาณร้อยละ 0.25 ถึงร้อยละ 8.5 ทั้งนี้ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมสูงขึ้น(30 มิลลิกรัมต่อลิตร) การตกตะกอนจะน้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ(10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองกำจัดแคดเมียมเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยแท่งเกล็ดกระดูกสามารถกำจัดแคดเมียมได้ปริมาตรน้ำถึง 600 ลิตร และระบบเข้าสู่จุดสิ้นสุดสภาพ(breakthrough)โดยไม่มีการอุดตัน(ผลการทดลอง ข้อ4.7 และภาคผนวก ฌ) ซึ่งต่างจากการทดลองกำจัดตะกั่วด้วยแท่งเกล็ดกระดูก จะเกิดการอุดตันของตะกอนก่อนที่ระบบจะเข้าสู่จุดสิ้นสุดสภาพ

4.5 การศึกษาการแทนที่ปริมาณแคลเซียมในองค์ประกอบของสารดูดซับกระดูกภายหลังการกำจัดสารละลายตะกั่วและแคดเมียม

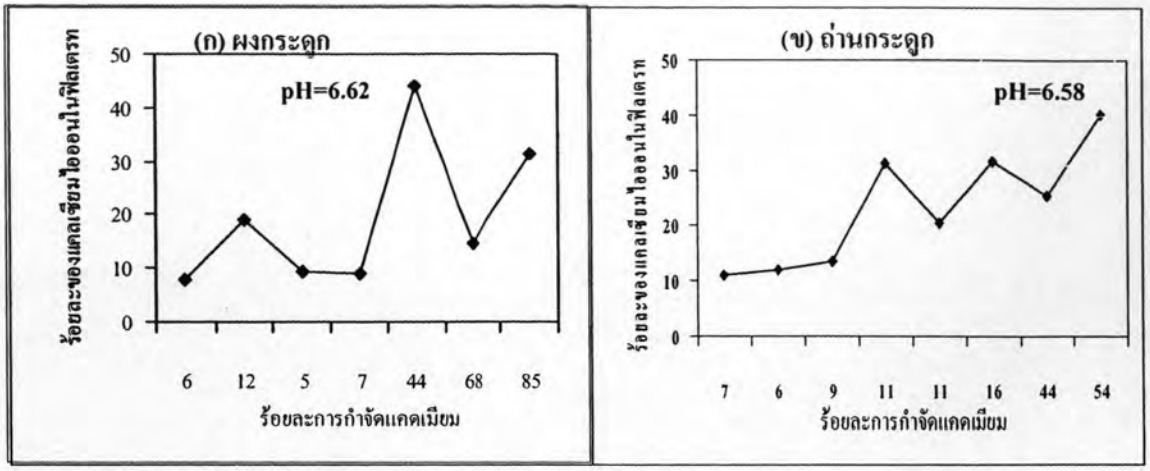
การศึกษาการแทนที่ปริมาณ Ca^{2+} ในโครงสร้างกระดูกของ Pb^{2+} และ Cd^{2+} สำหรับสารดูดซับ ผงกระดูก ถ่านกระดูก และถ่านกัมมันต์กระดูก โดยการทดลองแบบแบทช์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะทั้งสอง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชของสารละลายเริ่มต้น 5.0±0.1 และแบบแท่งเกล็ดกระดูกที่พีเอชเริ่มต้น 4.0±0.1 โดยนำสารละลายภายหลังการกำจัดที่ช่วงเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันไปหาปริมาณ Ca^{2+} ด้วย AAS ได้ผลการทดลองภาคผนวก ช (ตารางที่ ช-1 ถึง ตารางที่ ช-7) และสรุปตามภาพที่ 4.21 ถึงภาพที่ 4.23



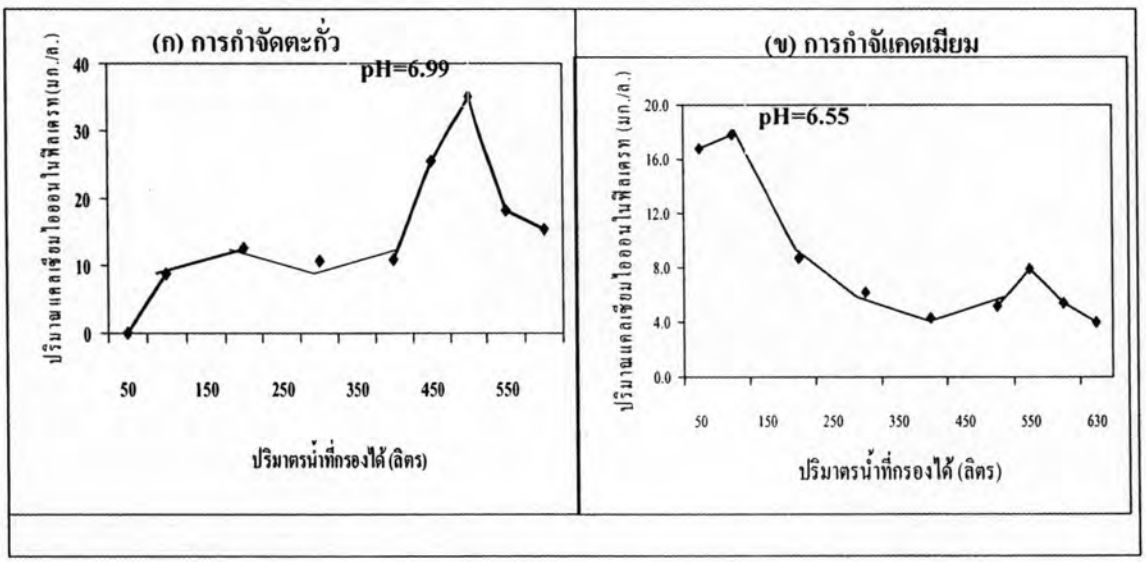
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วของผงกระดูก(ก) และถ่านกระดูก(ข) กับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท

ภาพที่ 4.21(ก) ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ที่ถูกแทนที่ออกมาอยู่ในสารละลายตะกั่วในช่วงเวลาสัมผัสที่ต่างกันด้วยสารดูดซับผงกระดูก(ภาคผนวก ช, ตารางที่ ช-1) มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสจนกระทั่งร้อยละการกำจัดตะกั่วเข้าใกล้ 100 คือสามารถกำจัดตะกั่วได้หมด ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายฟิลเตรทจะค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง ร้อยละ 35-37 เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลแล้วการแทนที่ของไอออนบวกของตะกั่วเข้าแทนที่แคลเซียมไอออนก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมาก

ภาพที่ 4.21(ข) ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ที่ถูกแทนที่ออกมาอยู่ในสารละลายตะกั่วในช่วงเวลาสัมผัสที่ต่างกันด้วยสารดูดซับถ่านกระดูก(ภาคผนวก ช, ตารางที่ ช-2) มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสและปริมาณแคลเซียมไอออนสูงสุดที่เวลาสัมผัส 30 นาที ต่อจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆนิ่งและค่อนข้างคงที่จนกระทั่งร้อยละการกำจัดตะกั่วเข้าใกล้ 100 ปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายฟิลเตรทจะค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง ร้อยละ 20-21 ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ที่ถูกแทนที่ออกมาอยู่ในสารละลายตะกั่วจะมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อใช้ผงกระดูกเป็นสารดูดซับ เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นต่างกัน เพราะผงกระดูกจะเกิดเคมิซอร์บชันมากกว่าฟิซิซอร์บชันเนื่องจากขนาดโพรงของสารดูดซับกระดูกมีขนาดอยู่ระหว่าง 19-36 อังสตรอมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางไอออนตะกั่วไม่มาก(hydrated ionic radii ของ Pb^{2+} = 4.01 อังสตรอม)(Ko และคณะ, 2003) และปริมาตรโพรงน้อยกว่าถ่านกระดูกเป็นร้อยเท่า(ปริมาตรโพรงของผงกระดูก=0.0025ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)ไอออนของตะกั่วจึงหลุดออกจากโพรงของกระดูกได้ไม่สะดวกเท่ากับถ่านกระดูกที่มีขนาดโพรงใหญ่กว่าและปริมาตรโพรงมากกว่า (ขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เป็น 86 อังสตรอม ปริมาตรโพรง 0.2538 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) คุณสมบัติของสารดูดซับกระดูกแต่ละชนิดที่เตรียมได้ ได้ศึกษาแล้วข้อ4.2



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดแคดเมียมของผงกระดูก(ก) และถ่านกระดูก(ข) กับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่ว(ก) และแคดเมียม(ข) ของแท่งเกล็ดกระดูกกับร้อยละของแคลเซียมในฟิลเตรท

สำหรับการแทนที่ปริมาณแคลเซียมไอออนของการกำจัดแคดเมียมด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูก(ภาพที่ 4.22(ก) และภาพที่ 4.22(ข)) ไม่ต่างกันคือปริมาณแคลเซียมไอออนในสารละลายจะแกว่งขึ้นลงตามระยะเวลาสัมผัส คือเมื่อปริมาณแคดเมียมในฟิลเตรทลดลง ร้อยละการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้น ปริมาณแคลเซียมในฟิลเตรทก็เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ทั้งผงกระดูกและถ่านกระดูก คือแคดเมียมจะถูกดูดซับบนผิวผงกระดูกหรือถ่านกระดูกอย่างเฉพาะเจาะจง การดูดซับเกิดขึ้นชั้นเดียว(monolayer) ดังนั้นปริมาณแคลเซียมในฟิลเตรทที่ถูก

แทนที่ออกมาจึงมีปริมาณอยู่ในช่วงจำกัดช่วงหนึ่งเท่านั้น จากภาพที่ 4.22(ก) และภาพที่ 4.22(ข) จะเห็นว่าปริมาณของแคลเซียมในฟิลเตรทแกว่งตัวอยู่ช่วงร้อยละ 30-40 ซึ่งแตกต่างจากปริมาณแคลเซียมในฟิลเตรทของการดูดซับตะกั่วของผงกระดูก(ภาพที่ 4.21(ก)) ปริมาณแคลเซียมในฟิลเตรทมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทิศทางเดียวไม่ได้แกว่งตัวขึ้นลงตามระยะเวลาสัมผัส เมื่อตะกั่วถูกกำจัดมากขึ้นหรือถูกดูดซับไว้มาก ปริมาณแคลเซียมก็ถูกแทนที่ออกมามาก ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนด์ลิช คือตะกั่วเข้าไปอยู่ในโพรงสารดูดซับและจับกับผิวของผงกระดูกเกิดเป็นชั้นหลายชั้นซ้อนๆกัน(multilayer)

ส่วนการแทนที่ปริมาณแคลเซียมไอออนของการกำจัดตะกั่วหรือแคดเมียมด้วยแท่งเกล็ดกระดูก (ผลการทดลองภาคผนวก ช, ตารางที่ ช-3 และตารางที่ ช-7) สรุปตามภาพที่ 4.23(ก) และภาพที่ 4.23(ข)) ซึ่งให้ผลต่างกันสำหรับการกำจัดตะกั่วและการกำจัดแคดเมียม

การกำจัดตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยแท่งเกล็ดกระดูก ปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำที่กรองได้จะค่อยๆเพิ่มขึ้นและสูงสุดเฉลี่ยที่ 35 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อกรองน้ำได้ 500 ลิตร และจะแกว่งขึ้นลงในช่วง 13-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อจากนั้นเมื่อกรองได้ 580 ลิตรซึ่งยังไม่ถึง breakthrough ระบบเกิดการอุดตันซึ่งปริมาณแคลเซียมไอออนอยู่ที่ 13-15 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าปริมาณแคลเซียมที่ถูกแทนที่ออกมาในน้ำที่กรองได้ที่จุดสิ้นสุดสภาพมีปริมาณเท่าใด แต่สามารถทำนายแนวโน้มของปริมาณแคลเซียมในน้ำที่จุดสิ้นสุดสภาพว่าน่าจะมีปริมาณต่ำกว่า 13 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยแท่งเกล็ดกระดูก ปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำที่กรองได้จะสูงอยู่ระหว่าง 16-20 มิลลิกรัมต่อลิตรใน 100 ลิตรแรก จะค่อยๆลดลงและแกว่งอยู่ระหว่าง 5-9 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเข้าใกล้ breakthrough ปริมาณแคลเซียมไอออนจะคงที่ที่ 4 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยเฉลี่ย เนื่องจากเมื่อเข้าใกล้จุดสิ้นสุดสภาพของเกล็ดกระดูกปริมาณแคลเซียมที่ถูกไอออนแคดเมียมเข้าแทนที่จะน้อยลงจนไม่มีการแทนที่แคลเซียมออกมาสู่น้ำที่กรองได้ ปริมาณแคลเซียมในน้ำที่กรองได้จึงค่อนข้างคงที่

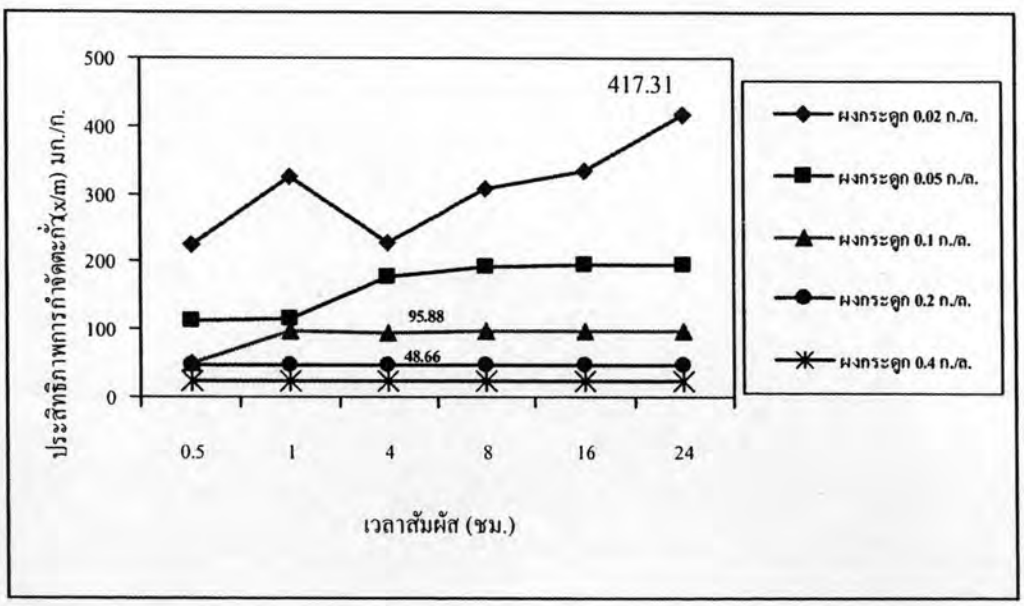
4.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารละลายตะกั่วและแคดเมียม

ไอโซเทอมการดูดซับสารละลายโลหะเป็นสภาวะของระบบการดูดซับที่เข้าสู่สภาวะสมดุล คืออัตราการดูดซับของสารดูดซับเท่ากับอัตราการหลุดออกไปของไอออนโลหะซึ่งเป็นตัวถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ สภาวะนี้ความเข้มข้นของสารละลายในระบบจะคงที่ นิยมอธิบายพฤติกรรมการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอมของฟรุนด์ลิชและแลงมัวร์สำหรับการดูดซับสารละลายตะกั่วและสารละลายแคดเมียมด้วยสารดูดซับกระดูกโค-กระบือ(Cheung และคณะ, 2001; อุบลรัตน์, 2544; ศุภกิจ, 2545; สุชาดา, 2547; จักรพงษ์, 2548)

4.6.1 ไอโซเทอมการกำจัดตะกั่ว

ใช้ผงกระดูกปริมาณ 0.02, 0.05, 0.40, 0.60, 0.80, และ 1.00 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่างเติมน้ำตะกั่วสังเคราะห์เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5±0.1 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที ในเวลา 4 ชั่วโมง (ผลการศึกษาเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของผงกระดูกในการกำจัดสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรใน 4.3.3.1) นำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 หรือขนาด 0.45 ไมครอน นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ผลการทดลองภาคผนวก ซ. ตารางที่ ซ-1 ถึง ซ-8

การทดลองพบว่า เมื่อใช้สารดูดซับมากขึ้น เวลาที่ใช้เพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลจะน้อยลง และประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปริมาณสารดูดซับน้อยจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงแต่ใช้เวลามากขึ้น เวลาที่เข้าสู่สมดุลของระบบภายใน 30 นาทีแรก สามารถกำจัดตะกั่วได้ร้อยละ 99 เมื่อใช้ปริมาณผงกระดูกเท่ากับหรือมากกว่า 0.20 กรัมต่อลิตรน้ำเสีย แต่เมื่อใช้ปริมาณผงกระดูก 0.02 ถึง 0.05กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง จะเข้าสู่สมดุลภายใน 24 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้หมดร้อยละ 100 เมื่อใช้ปริมาณของผงกระดูก 0.02, 0.05, 0.10, 0.20 และ 0.40 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ความสามารถในการกำจัดตะกั่วที่จุดสมดุลใช้ เวลา 4 ชั่วโมง มีค่าเป็น 417, 178, 96, 49 และ 24 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมผงกระดูกตามลำดับ (ภาพที่ 4.24)



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว10 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ปริมาณผงกระดูกต่างกัน

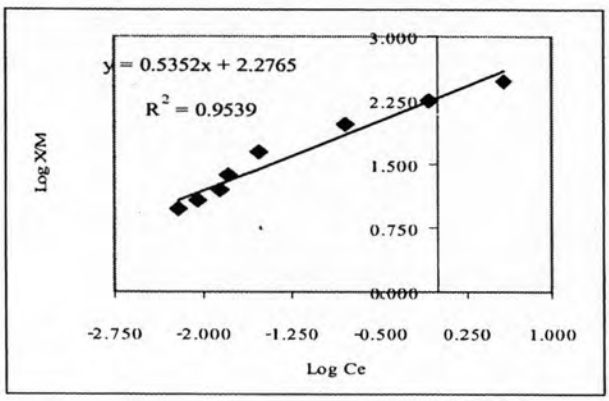
เมื่อพิจารณาไอโซเทอมการกำจัดตะกั่วด้วยผงกระดูกและถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ด้วยสมการคณิตศาสตร์ โดยใช้โมเดลแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมัวร์มาอธิบายจะได้กราฟตามภาพที่ 4.25(ก), ภาพที่ 4.25(ข), ภาพที่ 4.26(ก) และ ภาพที่ 4.26(ข) ตามลำดับ รายละเอียดผลการทดลองในภาคผนวก ซ ตารางที่ ซ-1 ถึง ตารางที่ ซ-4

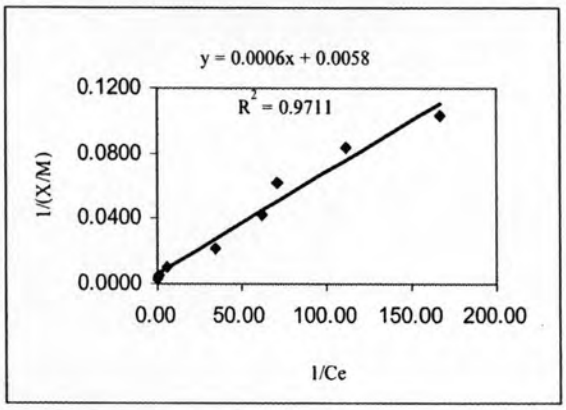
พบว่าการดูดซับของผงกระดูกในการกำจัดตะกั่วใช้โมเดลแบบฟรุนดลิชมาอธิบายจะเหมาะสมกว่าแบบแลงมัวร์เนื่องจากค่าความชัน(1/n) มีค่าเป็น 0.5352 และค่าคงที่ k หรือ log k มีค่าเป็น 2.2765 ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Coefficient of Determination, R^2)ทั้ง 2 แบบจะใกล้เคียงกันมาก คือเข้าใกล้ 1 มาก กล่าวคือ R^2 ของแบบฟรุนดลิชเป็น 0.9539 แต่ R^2 ของแบบแลงมัวร์มีค่า 0.9711 จึงสรุปได้ว่าการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) และเป็นการดูดติดผิวแบบฟิซิซอร์บชัน(Physi-sorption) โดยเกิดแรงยึดแวนเดอร์วาวล์(Vander waals) ระหว่างผิวของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sameer และคณะ (1998) ที่ทดลองใช้กระดูกสัตว์อบที่ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่งโมง ในการกำจัดทองแดงและนิกเกิล และผลงานวิจัยของ Zulkali และคณะ(2005) ที่ใช้แกลบและไคโตซานในการกำจัดตะกั่ว ผลการทดลองไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูก สรุปค่าคงที่ตามตารางที่ 4.17 ภาพที่ 4.25(ก) และภาพที่ 4.25(ข) นอกจากนี้ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของกระดูกต้ม(XRD)ภายหลังการดูดซับตะกั่ว จะมีโครงสร้างผลึกรูปหกเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่กว่าผลึกของผงกระดูกต้มก่อนการดูดซับ กล่าวคือขนาดผลึกของกระดูกต้มก่อนการดูดซับมีมิติผลึก ด้าน a=b = 9.4180 อังสตรอม ด้าน c = 6.8840 อังสตรอม แต่ขนาดของผลึกภายหลังการดูดซับ ด้าน a=b= 9.8260 อังสตรอม ด้าน c = 7.3570 อังสตรอม ทั้งนี้เนื่องจากไอออนตะกั่วเข้าไปแทรกอยู่ในโพรงกระดูก รวมทั้งการยึดเกาะที่ผิวสารดูดซับเป็นหลายชั้นขนาดผลึกจึงใหญ่ขึ้น

สำหรับไอโซเทอมการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง อธิบายด้วยโมเดลของแลงมัวร์จะใกล้เคียงกว่าแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (Coefficient of Determination, R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่า ค่า R^2 ของแบบแลงมัวร์มีค่า 0.9684 ส่วนแบบฟรุนดลิช R^2 มีค่า 0.4988 ผลการทดลองสรุปค่าคงที่ตามตารางที่ 4.18 และภาพที่ 4.26(ก) และภาพที่ 4.26(ข) แสดงว่าการดูดติดผิวตะกั่วของถ่านกระดูกเป็นแบบชั้นเดียว(monolayer) มีการดูดติดผิวเฉพาะพื้นที่บนผิวถ่านกระดูก และเกิดการดูดซับทางเคมี(Chemi-sorption)หรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างถ่านกระดูกกับไอออนตะกั่ว ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของMa และคณะ(1993); จักรพงษ์ (2548) และศุภกิจ (2545) และสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Aklil, และคณะ(2004) ที่ใช้คาลไซน์ฟอสเฟต(calcined phosphate)ในการกำจัดตะกั่ว

ตารางที่ 4.17 ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ของผงกระดูก

	ค่าคงที่ฟรุนดลิชของการดูดซับตะกั่วของผงกระดูก	ค่าคงที่แลงมัวร์ของการดูดซับตะกั่วของผงกระดูก
Linear equation	Log x/m = 0.5352 log Ce+2.2765	1/(x/m) = 0.0006 (1/Ce) + 0.0058
Slope	0.5352	0.0006
Y intercept	2.2765	0.0058
R^2	0.9539	0.9711



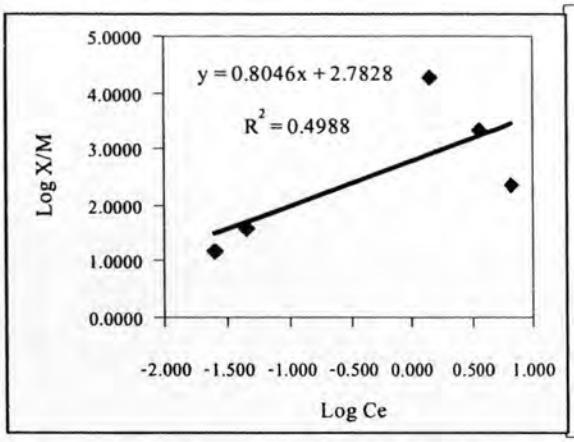


ภาพที่ 4.25 (ก) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกแบบฟรุนดลิช

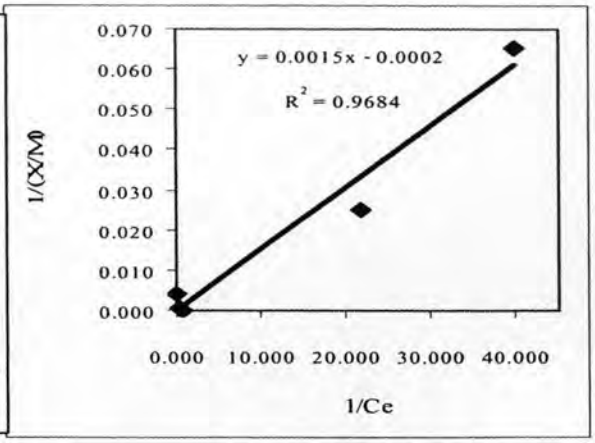
ภาพที่ 4.25(ข) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของผงกระดูกแบบแลงมัวร์

ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ของถ่านกระดูก (BC400-1)

	ค่าคงที่ฟรุนดลิชของการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูก(BC400-1)	ค่าคงที่แลงมัวร์ของการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูก(BC400-1)
Linear equation	Log x/m = 0.8046 log Ce+2.7828	1/(x/m) = 0.0015(1/Ce) - 0.0002
Slope	2.7828	0.0015
Y intercept	0.8046	0.0002
R^2	0.4988	0.9684



ภาพที่ 4.26(ก) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกแบบฟรุนดลิช



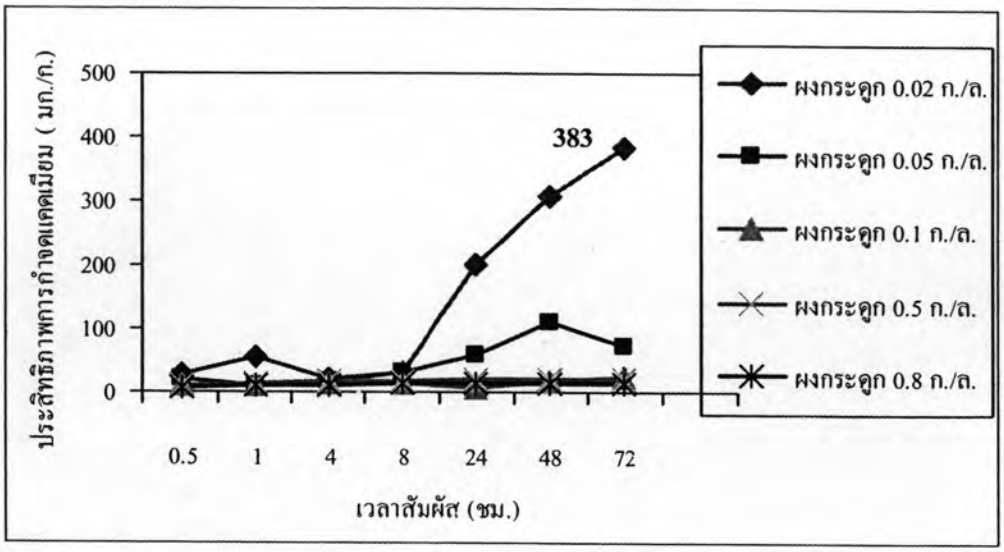
ภาพที่ 4.26(ข) ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกแบบแลงมัวร์

4.6.2 ไอโซเทอมการกำจัดแคดเมียม

ใช้ผงกระดูกปริมาณ 0.02, 0.05, 0.10, 0.50, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5±0.1 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และนำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 หรือขนาด 0.45 ไมครอน นำน้ำที่ผ่านการกรองแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียมที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน ผลการทดลองภาคผนวก ซ ตารางที่ ซ-5 ถึง ตารางที่ ซ-7

เนื่องจากการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมด้วยสารดูดซับจากกระดูกหมูที่เตรียมได้ทั้ง 5 ชนิด คือ ผงกระดูก ถ่านกระดูก 3 ชนิดเตรียมโดยการเผาที่อุณหภูมิ 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์กระดูกที่กระตุ้นด้วยสารละลายอิ่มตัวของเกลือแกงแล้วเผาที่ 400 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง(ผลการศึกษาใน 4.3.3) พบว่าผงกระดูกมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมได้สูงสุด คือ 383 มิลลิกรัมต่อกรัมผงกระดูกในเวลา 72 ชั่วโมง ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูกโดยใช้ปริมาณผงกระดูกต่างๆกัน (ภาพที่ 4.27)

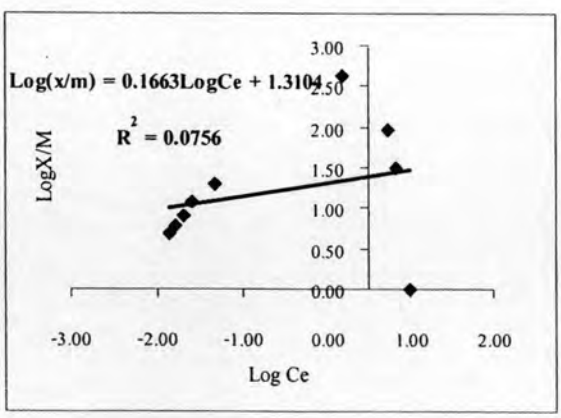
การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยผงกระดูกโดยนำโมเดลแบบฟรุนด์ลิชและแบบแลงมัวร์มาศึกษาเปรียบเทียบ พบว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์เหมาะสมกว่าเนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย, R^2 มากกว่า และค่าความชันของกราฟมากกว่า ตามสรุปผลค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมด้วยผงกระดูก ตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.28(ก) และ ภาพที่ 4.28(ข)



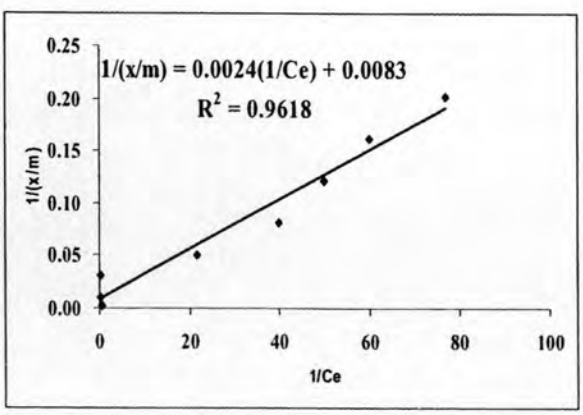
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยผงกระดูกปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.19 ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแคดเมียมแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ของผงกระดูก

	ค่าคงที่ฟรุนดลิชของการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูก	ค่าคงที่แลงมัวร์ของการดูดซับแคดเมียมของผงกระดูก
Linear equation	Log x/m = 0.1663log Ce+ 1.3107	1/(x/m) = 0.0024(1/Ce) + 0.0083
Slope	0.1663	0.0024
Y intercept	1.3104	0.0083
R^2	0.0756	0.9618



ภาพที่ 4.28(ก) ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบฟรุนดลิชของผงกระดูก



ภาพที่ 4.28(ข) ไอโซเทอมการดูดซับแคดเมียมแบบแลงมัวร์ของผงกระดูก

4.7 การศึกษาการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์

นำเกล็ดกระดูกที่เตรียมได้ใน 4.1 ขนาดระหว่าง 0.84-2.36 มิลลิเมตรไปต้มในน้ำเดือดประมาณครึ่งชั่วโมงเพื่อไล่อากาศที่อยู่ในโพรงออกให้น้ำเข้าไปแทนที่และบรรจุเกล็ดกระดูกลงไปในคอลัมน์พลาสติกใสทำด้วยอะคริลิกโพลิเมอร์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.5 เซนติเมตร ยาว 125 เซนติเมตร บรรจุเกล็ดกระดูกสูง 90 เซนติเมตร ในแต่ละช่วงสูง 30 เซนติเมตร จะมีท่อสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลออกตามปริมาตรของน้ำที่ผ่านการกรองที่ต้องการ โดยเกล็ดกระดูกสูง 30 เซนติเมตร มีน้ำหนัก 95.651 กรัม ตัวแปรและพารามิเตอร์ในการทดลองการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมของเกล็ดกระดูกแบบแท่งสรุปตามตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ตัวแปรการทดลองการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแบบแท่งด้วยเกล็ดกระดูกและปริมาณ Bed Volume (BV)

ตัวแปรในการทดลอง	การกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น 10 มก./ล.	การกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้น 10 มก./ล.
ขนาดคอลัมน์(ซม.)	2.5 , 120	2.5 , 120
ความสูงชั้นเกล็ดกระดูก(ซม.)	30, 60,90	30
น้ำหนักเกล็ดกระดูกสูง 30 ซม.(ก.)	95.65	95.65
ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น(มก./ล.)	10.5 ± 0.2	8.4 ± 0.1
พีเอชสารละลายเริ่มต้น	4.0± 0.1	4.0± 0.1
อัตราการไหล(ล./ชม.)	0.6	0.6
ปริมาตรน้ำทั้งหมดที่กรองได้(ล.)	580	683
Bed Volume (BV)	4651	4636
ประสิทธิภาพการกำจัด(มก./ล.)	64.75	60.50
ปริมาตรน้ำที่กรองได้อยู่ในมาตรฐานควบคุม(ล.)	420 (ที่ชั้นเกล็ดกระดูกสูง 30 ซม.)	4.5
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม(มก./ล.)	0.2	0.03

4.7.1 ผลการทดลองกำจัดตะกั่วของเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์

นำสารละลายตะกั่วเข้มข้นประมาณ 10 มิลิกรัมต่อลิตร ปริมาณการเตรียมครั้งละ 100 ลิตร และปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 4.0±0.1 ที่เลือกพีเอชนี้เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่าที่พีเอช 5 จะเกิดการตกตะกอนของสารละลายตะกั่วมากและอุดตันเร็ว สามารถ

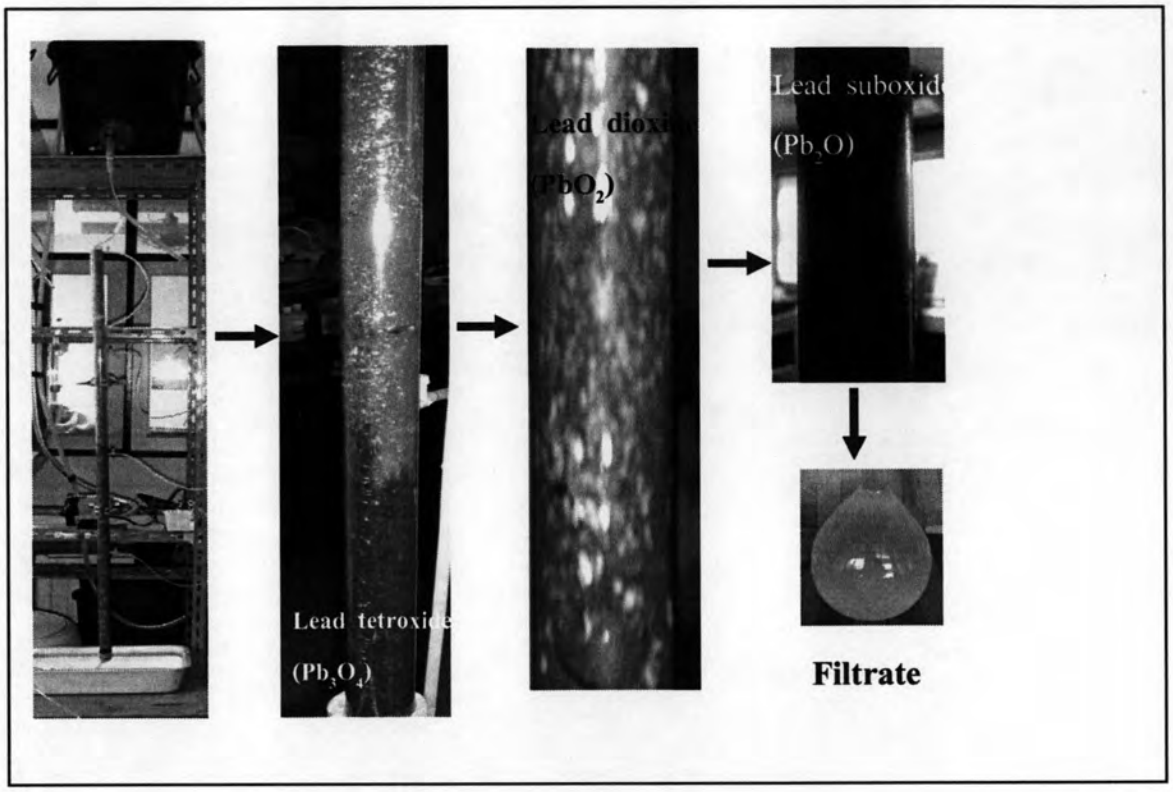
I24485652

บำบัดน้ำได้ปริมาตรน้อยเพียง 3.6 ลิตร(อุบลรัตน์, 2544) จากนั้นปั๊มน้ำขึ้นไปบนถังพักและปล่อยให้น้ำไหลผ่านคอมลัมน์ด้วยอัตราการไหล 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง จากบนลงล่าง และเก็บตัวอย่างที่ระยะชั้นเกล็ดกระดูกสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยเก็บครั้งแรกเมื่อกรองน้ำได้ 100 ลิตรและเก็บตัวอย่างครั้งต่อไปทุก 20 ลิตร นำตัวอย่างน้ำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดพีเอช แล้วนำไปหาปริมาณสารตะกั่วที่เหลือในน้ำของแต่ละช่วงความสูงชั้นเกล็ดกระดูกด้วยเครื่อง AAS ได้ผลการทดลองตารางภาคผนวก ฌ. ตารางที่ ฌ.1 – ฌ.3

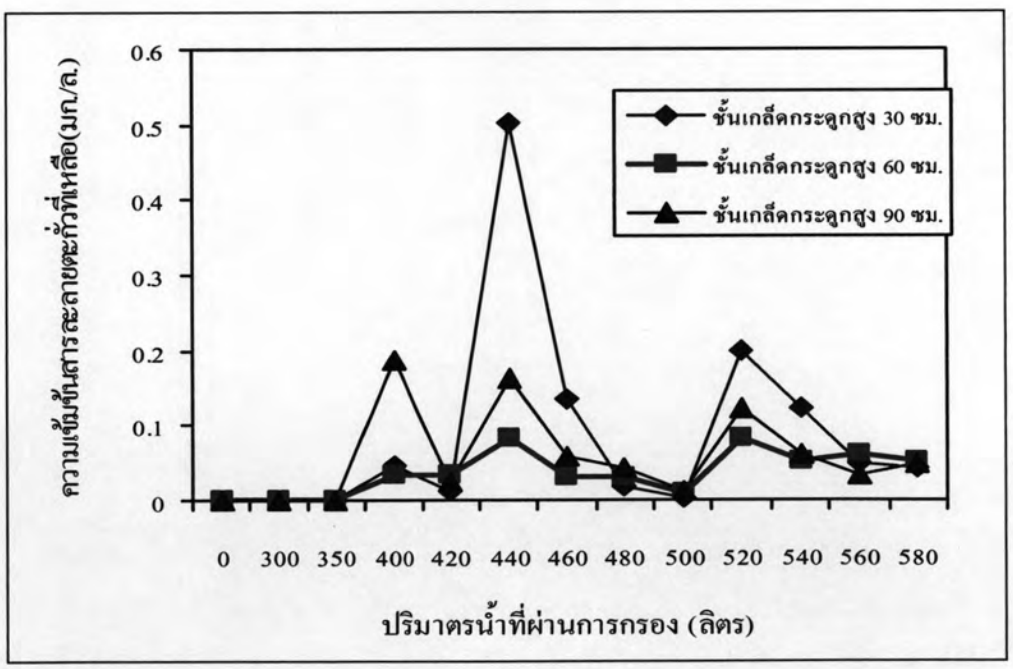
เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์กรองผ่านคอลัมน์ได้ประมาณ 500 มิลลิลิตร การไหลจะช้าลงและเริ่มจะอุดตันและหยุดไหลเมื่อกรองน้ำได้ 580 มิลลิลิตร น้ำที่กรองได้จะขาวขุ่น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสารกรองและน้ำที่กรองได้คือ เมื่อกรองน้ำได้ 5 ลิตรน้ำที่กรองได้จะขาวขุ่น พีเอชของน้ำที่กรองได้จะเพิ่มขึ้น เกล็ดกระดูกในคอลัมน์จะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลแดง (lead tetroxide: Pb_3O_4)โดยไล่ระดับจากชั้นเกล็ดกระดูกข้างบนลงชั้นล่างจนกระทั่งเกล็ดกระดูกเปลี่ยนเป็นสีแดงทั้งหมดและเมื่อกรองไปได้ 2 เดือนสีของเกล็ดกระดูกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลดำ(lead dioxide: PbO_2) บางส่วนสีขาวโดยการเปลี่ยนแปลงเริ่มจากส่วนบนของคอลัมน์ไล่ระดับลงมาข้างล่างและเกล็ดกระดูกเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ(lead suboxide: Pb_2O)ทั้งหมดเมื่อเข้าใกล้ breakthrough (ภาพที่ 4.29) ขนาดเกล็ดกระดูกเล็กลงจนเป็นผง บางส่วนหลุดออกมากับน้ำที่กรองได้ ปริมาณของชั้นเกล็ดกระดูกลดลง จึงหยุดการทดลอง สรุปปริมาณน้ำที่กรองได้ 4,651.51, 2,325.76, 1,550.50 BV. ที่ระยะชั้นเกล็ดกระดูกสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตรตามลำดับ ประสิทธิภาพการกรอง 64.75, 32.38 และ 21.58 มิลลิกรัมต่อกรัมเกล็ดกระดูก สรุปผลการทดลองตารางที่ 4.21 ภาพที่ 4.30 และภาพที่ 4.31

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์

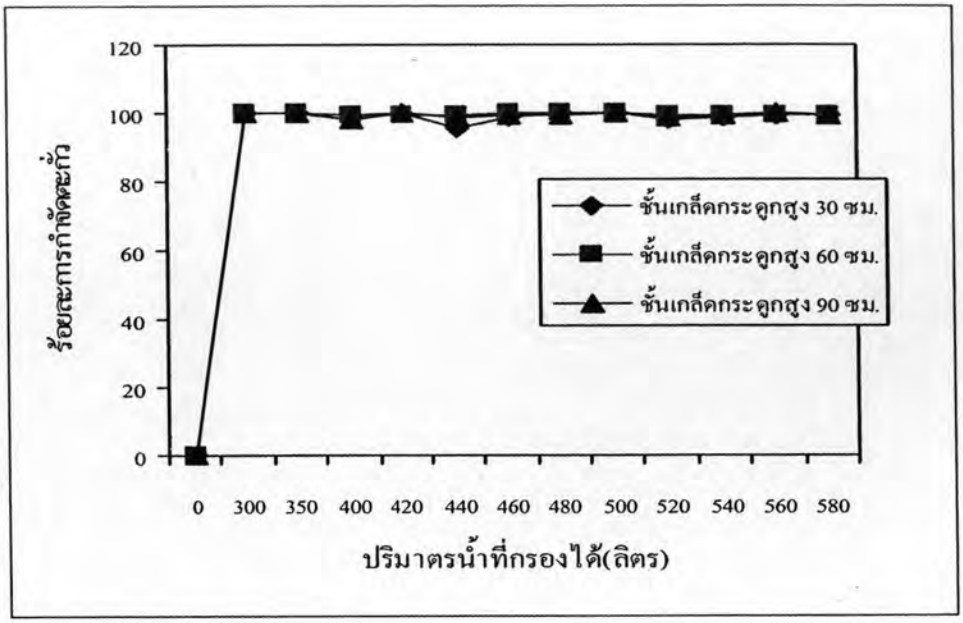
ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว	ความสูงชั้นเกล็ดกระดูก(ซม.)	น้ำหนักเกล็ดกระดูก(กรัม)	ปริมาตรน้ำที่กรองได้(ลิตร)	BV.	ประสิทธิภาพการกรอง(มก./ล.)
10.359, 10.997 เฉลี่ย= 10.678	30	95.651	580	4,651.51	64.75
	60	191.302	580	2,325.76	32.38
	90	286.953	580	1,550.50	21.58



ภาพที่ 4.29 การทดลองกำจัดตะกั่วด้วยเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วภายหลังการกรองกับปริมาตรน้ำที่กรองได้ที่ระดับความสูงของเกล็ดกระดูกต่างกัน



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดตะกั่วกับปริมาตรน้ำที่กรองได้ที่ระดับความสูงของเกล็ดกระดูกต่างกัน

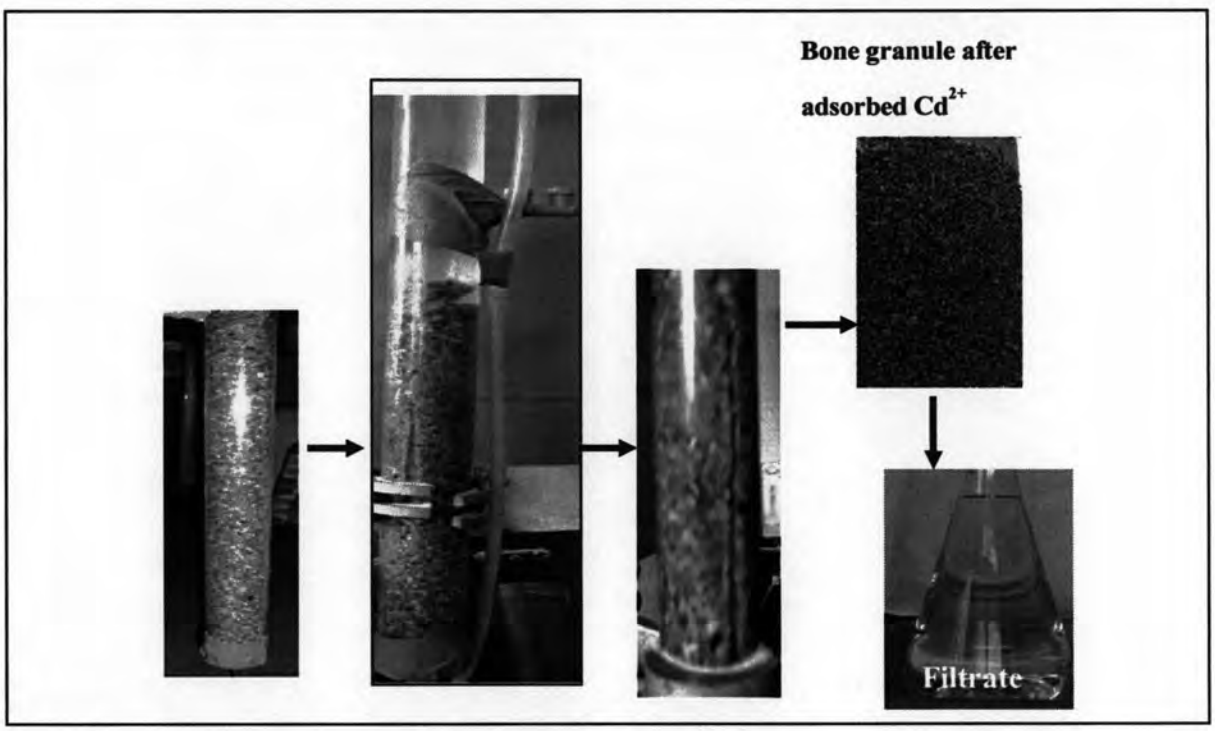
4.7.2 ผลการทดลองกำจัดแคดเมียมของเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์

สำหรับการศึกษาการกำจัดแคดเมียมของเกล็ดกระดูกแบบแท่ง ดำเนินการเช่นเดียวกับการทดลองกำจัดตะกั่ว โดยการเตรียมสารละลายแคดเมียมความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร การปรับพีเอช อัตราเร็วการไหลของน้ำ ดำเนินการเช่นเดียวกับการทดลองกำจัดตะกั่ว โดยศึกษาที่ระดับความสูงของเกล็ดกระดูก สูง 30 เซนติเมตรเท่านั้น เนื่องจากการทดลองกำจัดสารละลายตะกั่วแบบแท่งใช้เกล็ดกระดูก 3 ช่วง ช่วงละสูง 30 เซนติเมตร โดยที่เกล็ดกระดูกมีประสิทธิภาพในการกรองสูงมากใช้เวลาการทดลองถึง 4 เดือน ทำให้เกล็ดกระดูกเปลี่ยนแปลงและกลายเป็นผงไม่สามารถทดลองจนถึงจุด Breakthrough ได้ ดังนั้นการทดลองกำจัดสารละลายแคดเมียมจึงใช้ชั้นเกล็ดกระดูกสูง 30 เซนติเมตรเท่านั้น

การเปลี่ยนแปลงของเกล็ดกระดูกระหว่างการทดลอง เกล็ดกระดูกส่วนใหญ่ยังคงสภาพเป็นเกล็ด และเปลี่ยนเป็นสีชมพูแดง(ภาพที่ 4.32) มีตะกอนใสเป็นเมือกเกาะตามผนังคอลัมน์แต่ไม่อุดตัน พีเอชของน้ำที่ผ่านการกรองจะสูงขึ้นและเมื่อเข้าใกล้เบรคทรู พีเอชจะลดลงแต่ไม่ต่ำเท่ากับ พีเอชของสารละลายเริ่มต้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมภายหลังการกรองจะวิเคราะห์ผลใน 4.7.3

การเก็บตัวอย่าง เก็บทุก 0.5 ลิตรใน 10 ลิตรแรก ต่อไปเก็บทุก1 ลิตรจนถึง 20 ลิตร จากนั้นเก็บทุก 10 ลิตรจนถึง 800 ลิตร และทุกตัวอย่างที่เก็บจะนำไปวัดพีเอชและกรองเพื่อเอาน้ำไป

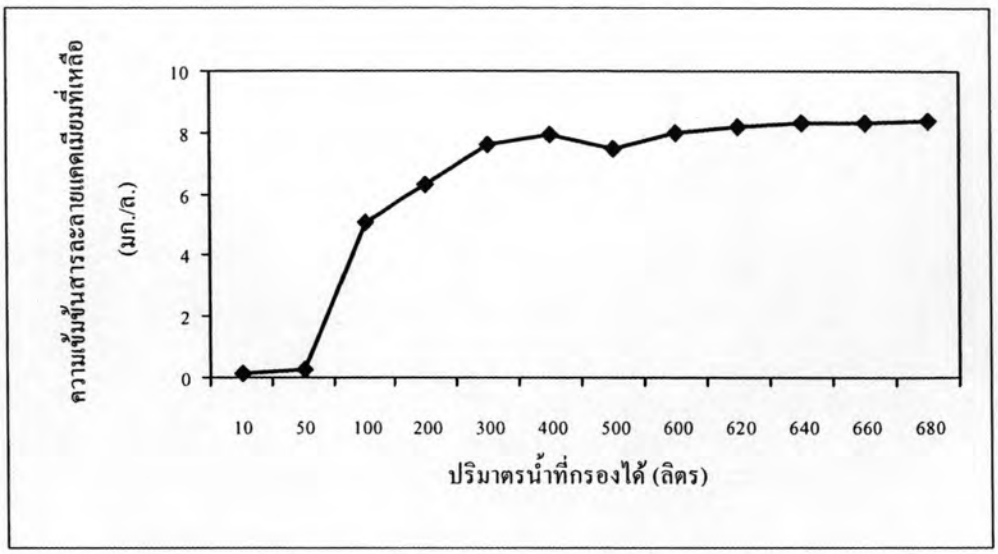
วัดหาความเข้มข้นของปริมาณสารละลายแคดเมียมที่เหลืออยู่เพื่อจะได้ทราบว่าการทดลองถึง Breakthrough หรือยังโดยสุ่มตัวอย่างที่เก็บได้ไปตรวจด้วย AAS เนื่องจากได้ทำการทดลองการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมถึง 3 ครั้ง โดยเปลี่ยนตัวแปรคืออัตราการไหลของน้ำและปริมาตรในการเก็บตัวอย่างและพบว่าอัตราการไหลของน้ำ 0.6 ลิตรเหมาะสมที่สุด เนื่องจากการทดลองครั้งแรกใช้อัตราการไหลของน้ำ 1.2 ลิตร และเก็บตัวอย่างทุก1 ลิตร พบว่าความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมช่วง 1-2 ลิตรแรกมีปริมาณเกินมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม(0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร) จึงทำการทดลองใหม่ได้ผลการทดลองตารางที่ ฌ.4 สรุปปริมาณ Bed Volume ตารางที่ 4.22 และภาพ Breakthrough curve ภาพที่ 4.33 และภาพที่ 4.34



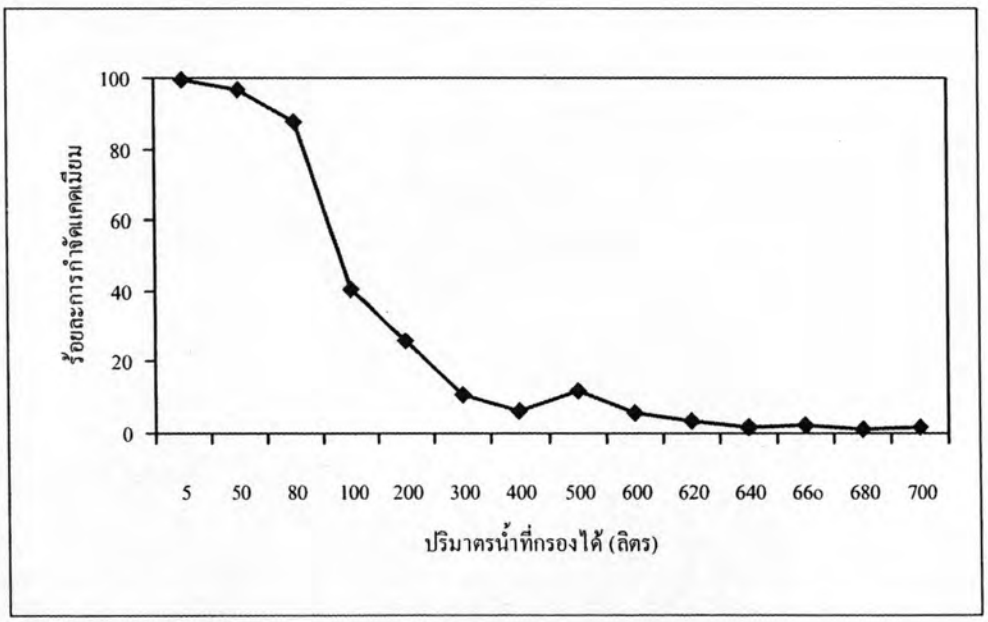
ภาพที่ 4.32 การทดลองกำจัดแคดเมียมด้วยเกล็ดกระดูกแบบแท่งหรือคอลัมน์

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยแท่งเกล็ดกระดูก

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม	ความสูงชั้นเกล็ดกระดูก (ซม.)	น้ำหนักเกล็ดกระดูก(กรัม)	ปริมาตรน้ำที่กรองได้(ลิตร)	BV.	ประสิทธิภาพการกรอง(มก./ล.)
8.4812, 8.4335, 8.5023,8.2717 เฉลี่ย= 8.4723	30	95.651	683	4,636.21	60.50



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมภายหลังการกรองกับปริมาตรน้ำที่กรองได้ที่ระดับความสูง 30 เซนติเมตรของเกล็ดกระดูก

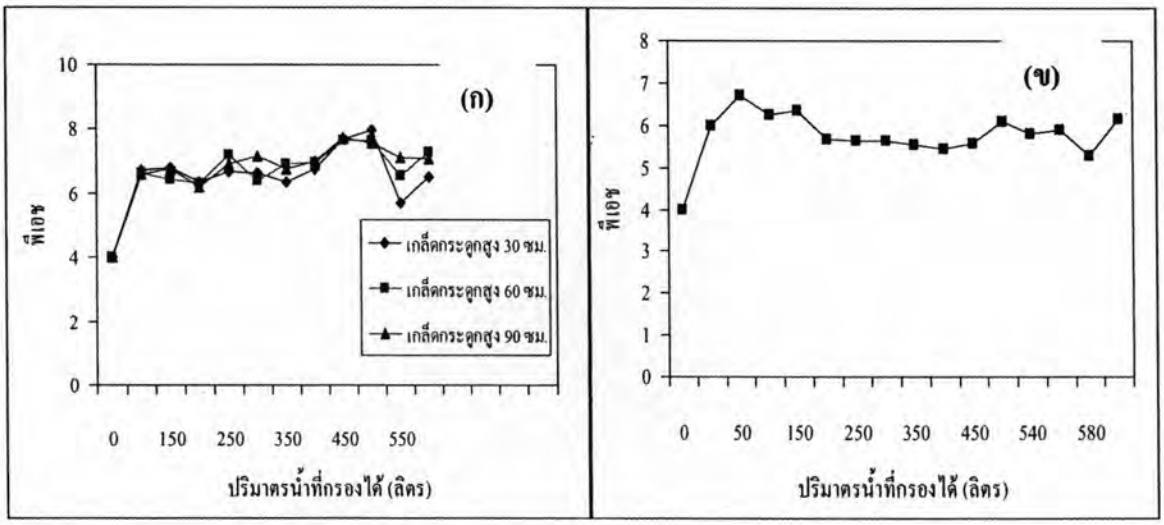


ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดแคดเมียมกับปริมาตรน้ำที่กรองได้ที่ความสูงของเกล็ดกระดูก 30 เซนติเมตร

4.7.3 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมของการทดลองแบบคอลัมน์ของเกล็ดกระดูก

การเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายตะกั่วที่ผ่านคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าพีเอชของสารละลายตะกั่วเริ่มต้นและขึ้นไปสูงสุดที่ 7.97 และจะค่อยๆลดลงมาที่5-6 เมื่อเข้า

ใกล้จุด Breakthrough (ภาพที่ 4.35(ก) ส่วนการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายแคดเมียมจะแตกต่างกับของสารละลายตะกั่วคือจะค่อยๆเพิ่มขึ้นไปสูงสุดที่ 6.7และลดต่ำลงมาอยู่ที่ 5-6 เมื่อเข้าใกล้ Breakthrough แต่พีเอชจะไม่เท่ากับพีเอชของสารละลายเริ่มต้น(ภาพที่ 4.35(ข)) เนื่องจากกลไกของกระบวนการที่เกิดขึ้นต่างกันคือ สารละลายตะกั่วบางส่วนเกิดการทำปฏิกิริยาของPb^{2+} กับแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบของกระดูกคือ แคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์และเข้าแทนที่เกิดตะกอนสีขาวของเลดไฮดรอกซิลไพโรมอไฟต์(lead hydroxyl-pyromorphite: $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) ขึ้น ส่วนแคดเมียมเกิดการดูดติดผิวบริเวณเฉพาะเจาะจง เกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียวระหว่างผิวของกระดูกกับแคดเมียมไอออนเกิดเป็นแคลเซียมแคดเมียมไฮดรอกซิลฟอสเฟต ($Ca3.9(Ca4.7Cd0.7)(PO_4)_6(OH)1.8$) ซึ่งได้อธิบายในข้อ 4.2.5



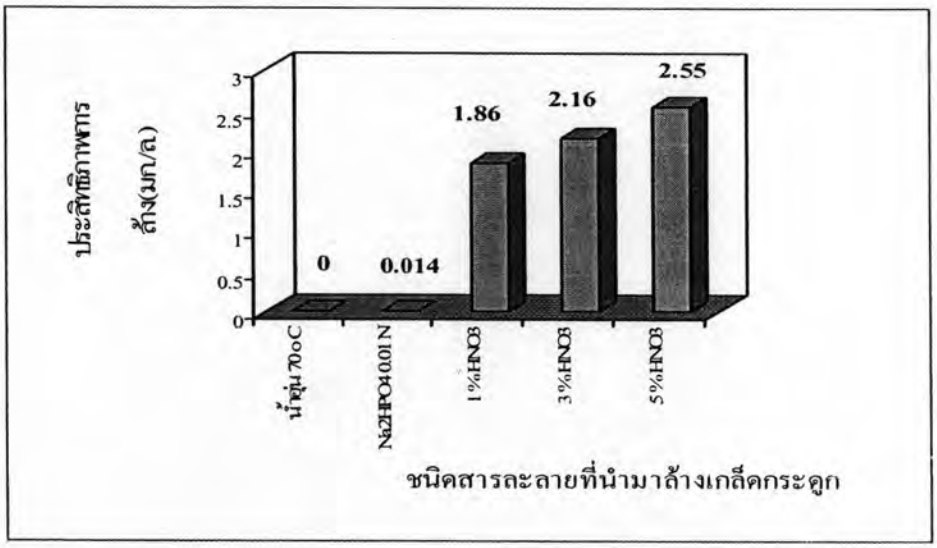
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายตะกั่วกับปริมาตรน้ำที่กรองได้(ก) และความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายแคดเมียมกับปริมาตรน้ำที่กรองได้(ข)

4.8 การฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้ว

นำเกล็ดกระดูกที่ใช้ดูดซับสารละลายตะกั่วสังเคราะห์เข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองสารดูดซับแบบแท่งในข้อ 4.7 จนถึงสภาวะใกล้ Breakthrough แล้วมาฟื้นสภาพด้วยวิธีทางเคมี ด้วยสารละลายของกรดอนินทรีย์และเกลืออนินทรีย์ของฟอตเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ระยะเวลาการฟื้นสภาพ 30 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณสารตะกั่วที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวและโพรงของสารดูดซับเกล็ดกระดูกด้วยการนำไปหาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชัน

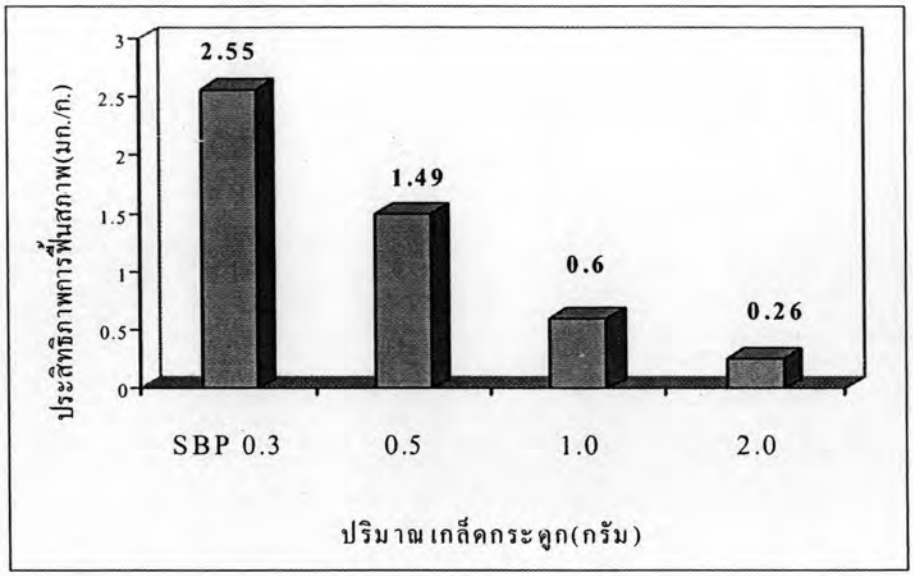
สารละลายกรดที่ใช้เป็นกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 1, 3, 5, ส่วนสารละลายเกลือฟอสเฟตหรือไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.01 โมล์ และน้ำกลั่นอุ่น ประมาณ 70 องศาเซลเซียส

การทดลองชั่งเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้ว 0.3 กรัม ต่อสารละลายที่นำมาฟื้นสภาพ 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยอัตราความเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาทีแล้วนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้ไปหาปริมาณตะกั่ว ผลการทดลองภาพที่ 4.36 (ภาคผนวก ญ. ตารางที่ ญ-1) ส่วนเกล็ดกระดูกนำไปอบแห้งหาน้ำหนักเกล็ดกระดูกที่เหลือ ทำให้ทราบว่าการฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกแต่ละครั้งมีการสูญเสียสารดูดซับร้อยละ18 (ภาคผนวก ญ. ตารางที่ ญ-4) จากนั้นทดลองหาปริมาณเกล็ดกระดูกที่เหมาะสมนำมาฟื้นสภาพแล้วได้ประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้ปริมาณเกล็ดกระดูก 0.3, 0.5, 1.0 และ2.0 กรัมต่อกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ5 ซึ่งให้ผลดีที่สุดปริมาณ100 มิลลิลิตรไปเขย่าที่สภาวะเดิมกับที่หาชนิดสารละลายที่เหมาะสมได้ผลการทดลองภาคผนวก ญ. ตาราง ญ-2 และภาพที่ 4.37



ภาพที่ 4.36 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ดูดซับตะกั่วแล้วด้วยสารละลายต่างชนิด

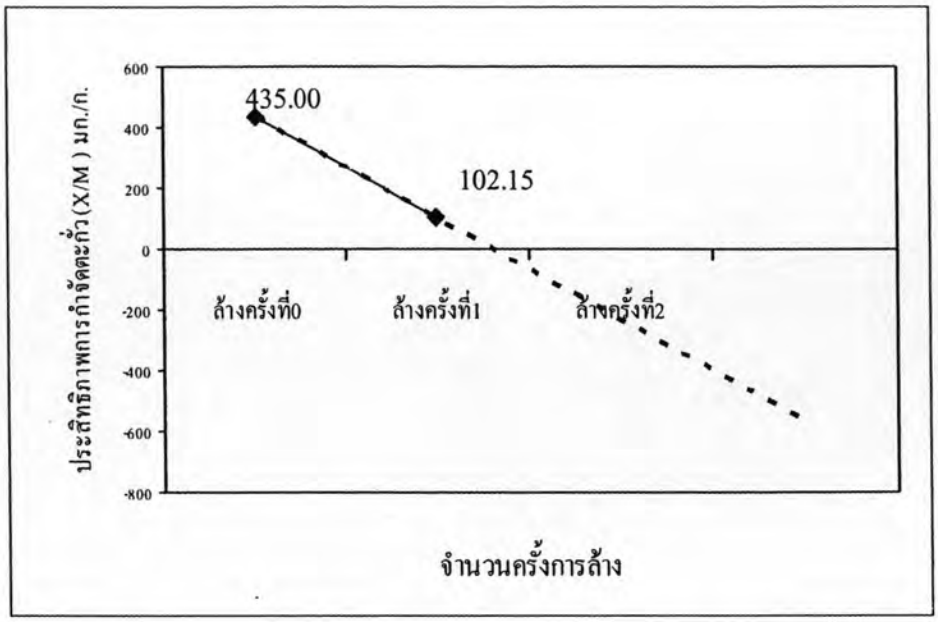
ภาพที่ 4.36 การฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้ดูดซับสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ 2.55 มิลลิกรัมต่อกรัมเกล็ดกระดูก รองลงไปคือกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 3 และร้อยละ 1 ตามลำดับ ส่วนน้ำอุ่นไม่สามารถฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้ว สารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.01 โมล์เป็นสารฟื้นสภาพที่ไม่ดี



ภาพที่ 4.37 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ดูดซับตะกั่วแล้วด้วยกรดไนตริก 5% โดยใช้ปริมาณเกล็ดกระดูกต่างกัน

ภาพที่ 4.37 ปริมาณเกล็ดกระดูกที่เหมาะสมที่นำมาฟื้นสภาพด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 แล้วให้ประสิทธิภาพสูงสุดเรียงลำดับดังนี้ คือ ปริมาณ 0.3, 0.5, 1.0 และ 2.0 กรัม โดยให้ประสิทธิภาพเป็น 2.55, 1.49, 0.6 และ 0.26 มิลลิกรัมต่อกรัม

การทดลองพบว่าสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 สามารถฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกที่ใช้งานแล้วดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายชนิดอื่นและสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นอื่นโดยสภาวะที่เหมาะสมคือใช้เกล็ดกระดูก 0.3 กรัม ล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ5 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เขย่าที่อัตราเร็ว 175 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จะได้เกล็ดกระดูกหรือผงกระดูกที่ฟื้นสภาพแล้วสามารถนำไปดูดซับตะกั่วได้อีก สามารถนำไปกำจัดสารละลายตะกั่วเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 23-25 ของผงกระดูกต้มที่ยังไม่ได้ใช้งาน และสามารถทำนายแนวโน้มจำนวนครั้งของการล้างว่าสามารถล้างต่อไปได้ 1 ครั้งเท่านั้น เนื่องจากเกล็ดกระดูกที่ใช้ดูดซับสารละลายตะกั่วแล้วจะเปลี่ยนสภาพเป็นผงไม่คงรูปเป็นเกล็ด ดังนั้นเมื่อนำมาฟื้นสภาพด้วยกรดไนตริกจึงได้เป็นผงกระดูก จึงศึกษาเปรียบเทียบกับผงกระดูก หากนำผงกระดูกที่ใช้งานแล้วมาล้างเป็นครั้งที่สอง จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเส้นแนวโน้มต่ำกว่า 0 ผลการทดลอง ภาคผนวก ญ ตารางที่ ญ-3 และสรุปผลการทดลอง ภาพที่ 4.38



ภาพที่ 4.38 แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการฟื้นสภาพเกล็ดกระดูกกับจำนวนครั้งของการล้าง

เมื่อนำเกล็ดกระดูกที่ล้างด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 ไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพ พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของโพรงและปริมาตรของโพรงเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกายภาพของเกล็ดกระดูกเริ่มต้นที่เตรียมได้และยังไม่ได้ดูดซับและไม่ได้ผ่านการฟื้นสภาพจะเห็นว่ากระดูกที่ผ่านการฟื้นสภาพมีพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงลดลงแต่มีขนาดโพรงใหญ่ขึ้น ทั้งนี้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 32 ปริมาตรของโพรงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 56 และขนาดของโพรงใหญ่ขึ้นประมาณ 2.3 เท่าของเกล็ดกระดูกที่เตรียมได้และยังไม่ผ่านการดูดซับ ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเกล็ดกระดูกที่ผ่านการฟื้นสภาพ ตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของกระดูกที่ไม่ผ่านการฟื้นสภาพกับเกล็ดกระดูกที่ผ่านการฟื้นสภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ	กระดูกจากร้านอาหารที่ไม่ผ่านการฟื้นสภาพ	กระดูกที่ผ่านการฟื้นสภาพ1 ครั้ง
พื้นที่ผิวจำเพาะ ($ม^2$/ก.)	2.78	1.90
ขนาดโพรง(^{o}A)	36.44	82.24
ปริมาตรโพรง($ซม.^3$/ก.)	0.0025	0.0039