บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

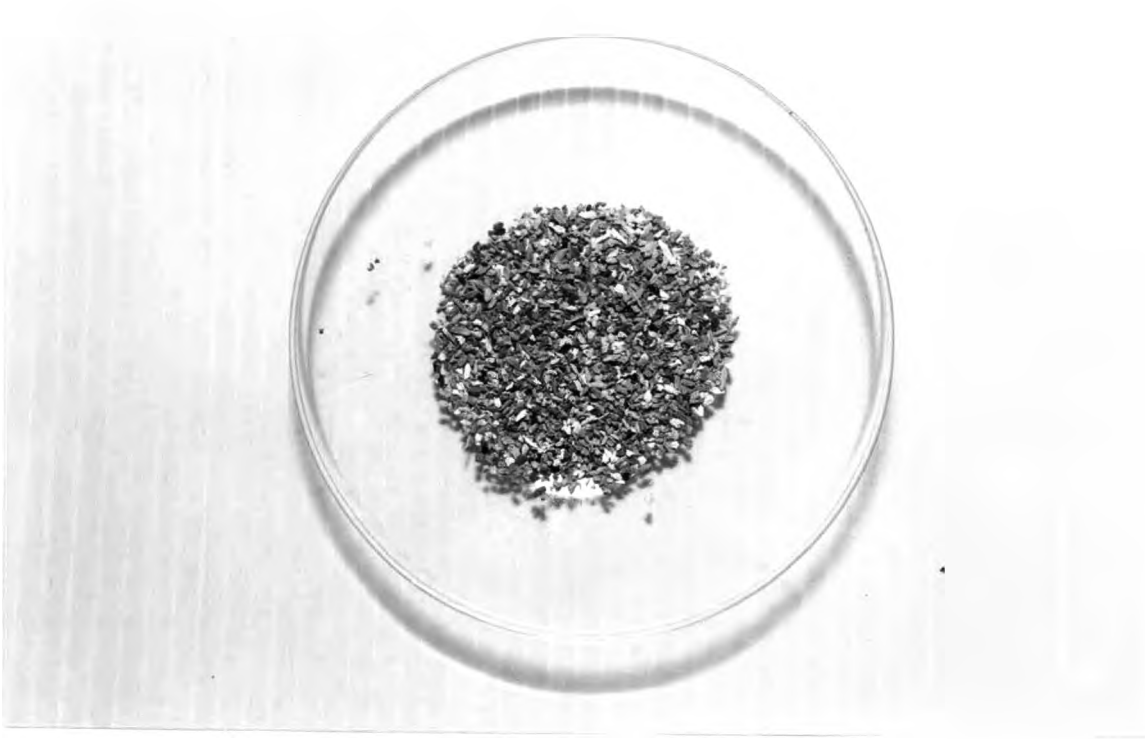
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกก่อนการทดลอง

การศึกษาการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ตะกั่ว และแคดเมียม ด้วยกระดูกที่เตรียมโดยนำกระดูกป่นมาเผาที่สภาวะการเผาต่างๆ ทั้งหมด 3 สภาวะ คือ ใช้อุณหภูมิการเผาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง และหลังจากนั้นนำมาบดและคัดขนาดให้มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 20-40 ขนาดกระดูก 0.42-0.84 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพแล้วจึงนำไปศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักซึ่งมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้ กระดูกป่นก่อนทำการเผามีสีเหลืองและน้ำตาลอ่อนปะปนกันและมีลักษณะกระดูกหลายแบบเนื่องจากเป็นกระดูกจากหลาย ๆ ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีลักษณะที่ต่างกัน ส่วนถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเห็นว่า ถ่านที่เผาที่ 600 องศาจะมีสีเทาปนดำ ส่วนถ่านที่เผาที่ 400 และ500 องศามีสีคล้ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

รูปที่ 4.1 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ400 องศาเซลเซียส

I2C832266

รูปที่ 4.2 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 กระดูกป่นที่เตรียมโดยเผาที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียส

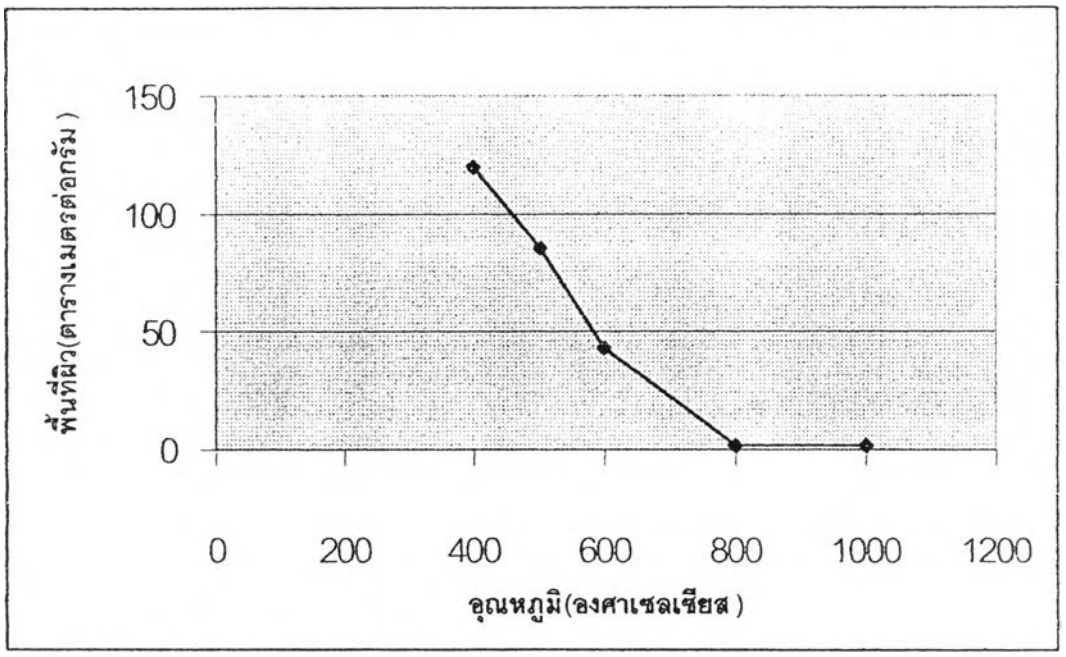
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกโดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องSpecific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิการเตรียมถ่านกระดูกเพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง ลดลงซึ่งเป็นกลไกสำคัญต่อปฏิกิริยาการดูดซับเป็นอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับถ่านกระดูกการค้า Brimac 216 ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวทั้งหมด 100 ตารางเมตรต่อกรัม (Irvine G.D. และ Knowles M.J., 1997) และจากการศึกษาของวรรณชนี ศรีโพธิ์งาม(2544) ซึ่งทำการทดลองเกี่ยวกับตะกรันโลหะหนักได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำให้พื้นที่ผิวมากขึ้นโดยการฉีดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วภายหลังการเผาทันทีซึ่งอาจทำให้พื้นที่ผิวสารดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นมากโดยเฉพาะกับกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดของโพรงของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิที่เผากระดูก (°C)	Surface Area (m^2/g)	Pore Volume (cm^2/g)	Average Pore Diameter (A°)
400	120.007	0.362513	120.83
500	85.1261	0.327682	153.69
600	43.453	0.199848	183.97
800	2.1507	0.006131	114.02
1000	1.8423	0.003006	65.27

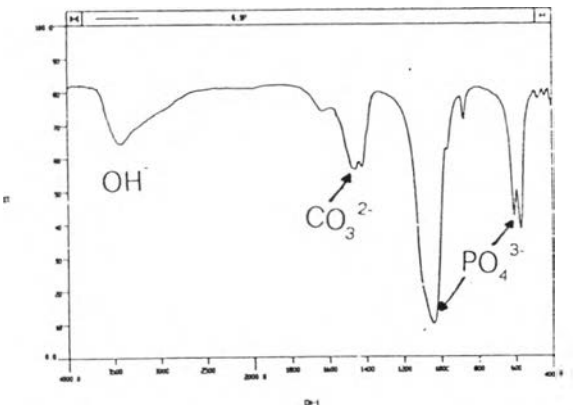
ซึ่งผลการตรวจวัดพื้นที่ผิวและปริมาตรโพรงของพถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่แสดงให้เห็นว่าถ่านกระดูกที่เผาที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียสมีพื้นที่ผิวและขนาดโพรงสูงกว่าที่เตรียมที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียส



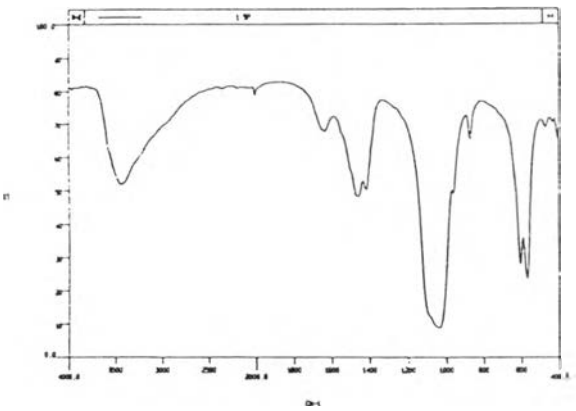
รูปที่ 4.4 ผลการวัดพื้นที่ผิวของถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิต่างๆ

4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกโดยใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

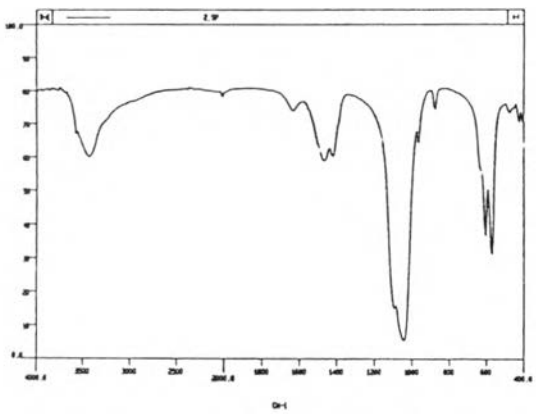
ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่องFTIR เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟแล้ว ความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชั่น OH^- ที่อุณหภูมิในการการเผาต่ำ ๆ จะมีพีคที่กว้างและค่าที่สูงกว่าเนื่องจากองค์ประกอบภายในของถ่านกระดูกเองและเกิดความชื้นเข้าไปในตัวดูดซับแม้ว่าจะเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นแล้ว ความเข้มข้นของ CO_3^{2-} จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามความเข้มข้นของ PO_4^{3-} มีแนวโน้มสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อถูกเตรียมที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น การที่สัดส่วนของ CO_3^{2-} ต่อ PO_4^{3-} มีค่าลดลงแสดงให้เห็นว่าปริมาณ CO_3^{2-} กระดูกมีค่าลดลงและปริมาณ PO_4^{3-} ในกระดูกมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ผลึกของกระดูก (ไฮดรอกซีอพาไตท์) มีความชัดเจนมากขึ้น



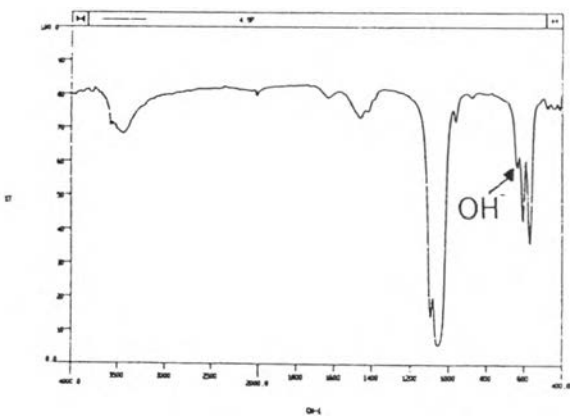
400°C



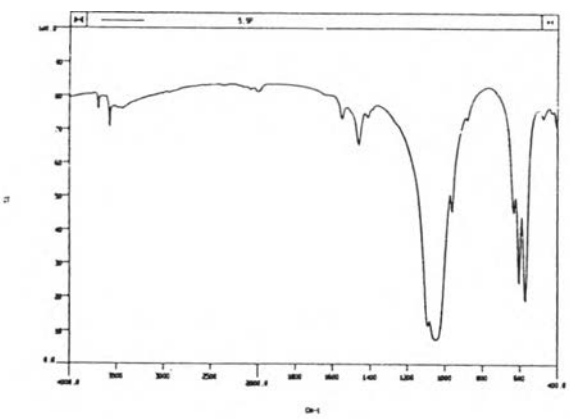
500°C



600°C



800°C

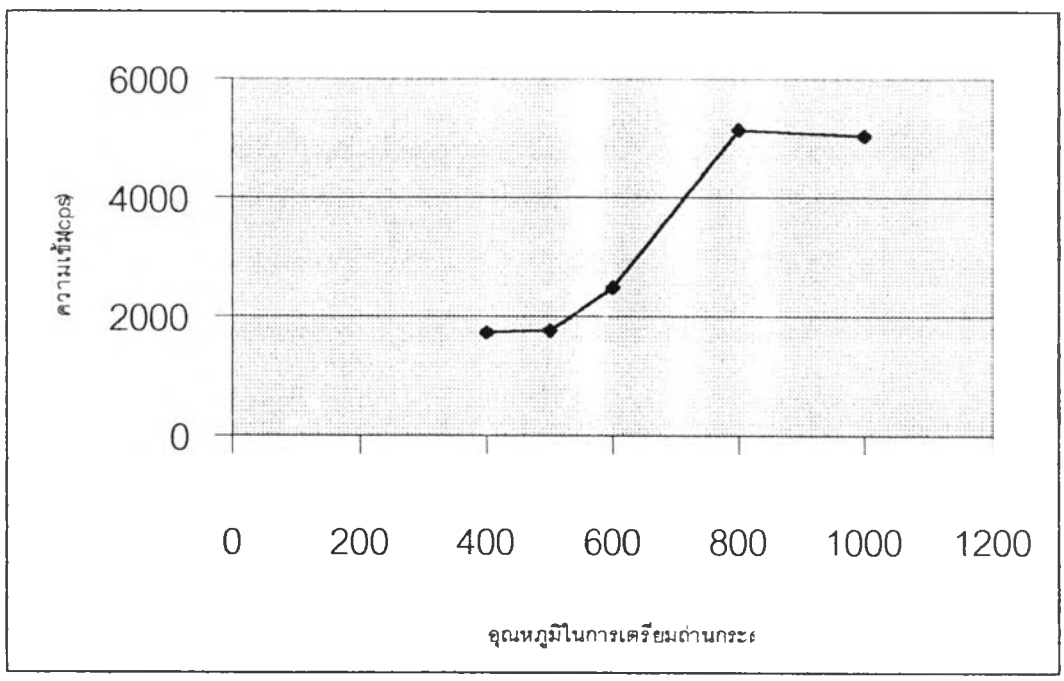


1000°C

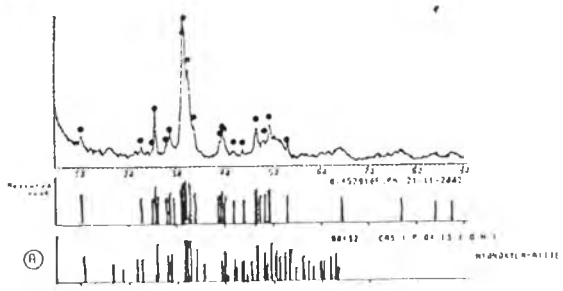
รูปที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนการทดลอง

4.1.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

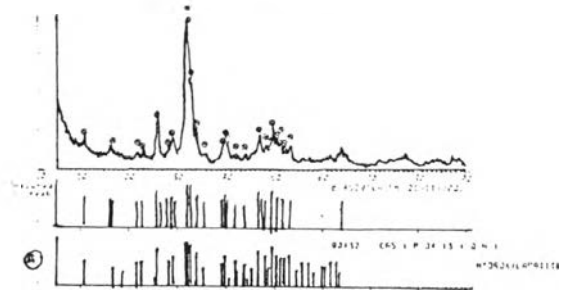
จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในการเผามีความสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกภายในของถ่านกระดูกซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ ไฮดรอกซีอพาไตท์โดยจากผลวิเคราะห์ XRD สามารถเปรียบเทียบปริมาณของไฮดรอกซีอพาไตท์โดยจะเปรียบเทียบความสูงของกราฟที่มากที่สุด 7 พีค จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่เผาสูงขึ้นปริมาณผลึกไฮดรอกซีอพาไตท์ก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย ปริมาณของไฮดรอกซีอพาไตท์ของกระดูกที่เตรียมที่400 และ 500 องศาเซลเซียสจะมีความแตกต่างของปริมาณผลึกไฮดรอกซีอพาไตท์ใกล้เคียงกัน และกระดูกที่เตรียมที่600 องศาเซลเซียสมีปริมาณผลึกไฮดรอกซีอพาไตท์สูงว่ากระดูกที่เตรียมที่400 และ 500 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถยืนยันผลการทดลอง FTIR ที่ว่าปริมาณคาร์บอเนตจะไปขัดขวางการเป็นผลึกของไฮดรอกซีอพาไตท์ และผลการทดลองสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Phatumvanit และ Legeros,1997 ซึ่งทำการเตรียมกระดูกที่อุณหภูมิต่างๆ คือ ผลึกของกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิ800 องศาเซลเซียสจะมีผลึกที่มากกว่ากระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิ400 และ 600 องศาเป็นอย่างมาก



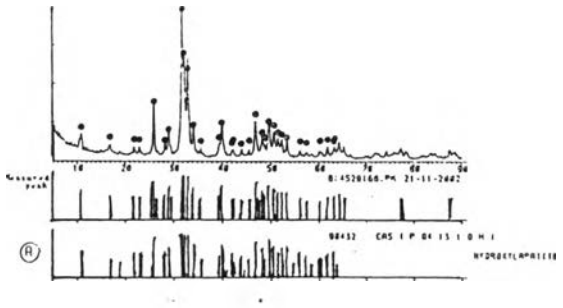
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิการเตรียมถ่านกระดูกและปริมาณไฮดรอกซีอพาไตท์ในถ่านกระดูก



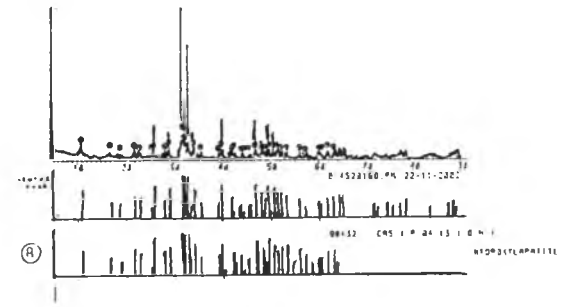
400 °C



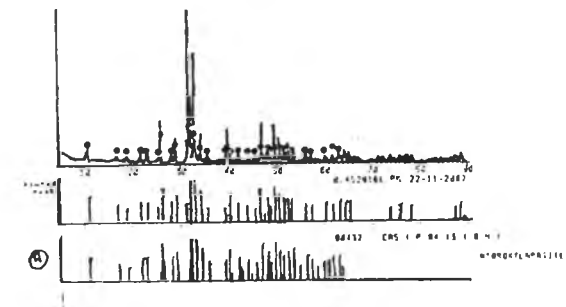
500 °C



600 °C



800 °C



1000 °C

รูปที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกก่อนการทดลอง

4.2 การศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูก

จากผลการศึกษาการนำถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ค่า คือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส มาทดลองกำจัดตะกั่วในน้ำที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ 10 และ 50 มก./ล. โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล. แล้วทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) น้ำเสียที่มีตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล.

จากผลการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้สูงมากโดยพบว่าความเข้มข้นตะกั่วลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าร้อยละ 60 ในเวลาเพียง 45 นาทีแรกและสามารถกำจัดตะกั่วในน้ำได้ร้อยเปอร์เซนต์ภายในเวลา 6 ชั่วโมงดังแสดงรายละเอียดปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

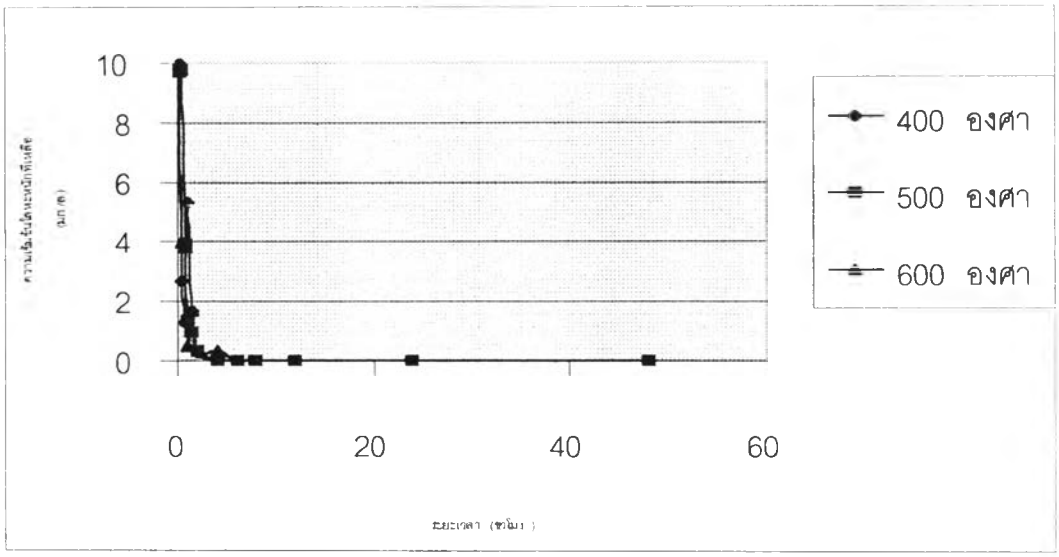
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้เผากระดูก3 ค่า คือถ่านกระดูกที่เผาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำโดยที่อุณหภูมิการเตรียมต่ำกว่า(400 และ 500 องศาเซลเซียส) สามารถกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิ600 องศาเซลเซียสโดยกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดตะกั่วได้ 100 เปอร์เซนต์ภายในเวลา 4 ชั่วโมงเท่านั้น และ สำหรับกระดูกที่เผาที่ 600 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดตะกั่วได้ 100 เปอร์เซนต์ภายในระยะเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของน้ำก่อนและหลังการทดลองพบว่ากระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส พีเอชของน้ำหลังการทดลองมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นและมีค่าไม่แตกต่างกันมาก คือ พีเอชเริ่มต้นเป็น5 และเปลี่ยนแปลงเป็น 5.31-5.35 ดังแสดงในรูปที่ 4.10 สำหรับกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเปลี่ยนแปลงจากพีเอช 5 เป็น 5.24

เมื่อพิจารณาค่า adsorption capacity ของถ่านกระดูกพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 50-51.5 มก./ก. ถ่านกระดูก ไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกทั้ง 3 ได้อย่างเด่นชัดทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นของตะกั่วต่ำเกินไปจึงทำการทดลองอีกครั้งโดยเพิ่มความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 50 มก./ล.

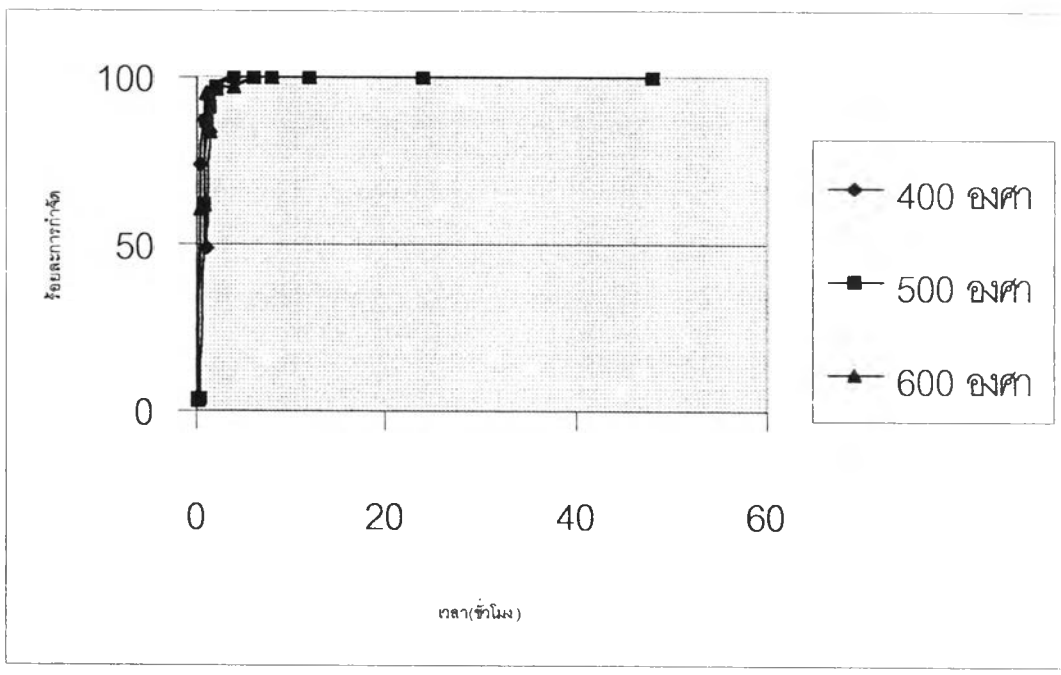
2) น้ำเสียที่มีตะกั่วเริ่มต้น 50 มก./ล.

ผลการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในกราฟรูปที่ 4.11 และ 4.12 และสามารถสรุปได้ว่า แม้ว่าจะเพิ่มความเข้ม

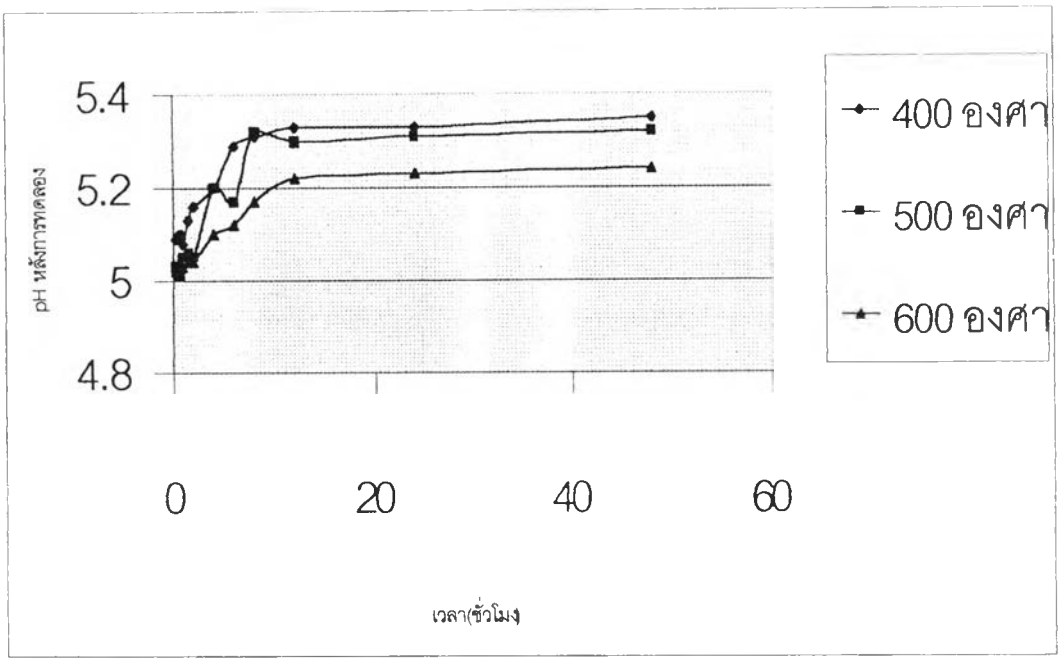
ข้นตะกั่วในน้ำเป็น 50 มก./ล. ถ่านกระดูกก็ยังสามารถกำจัดตะกั่วได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด



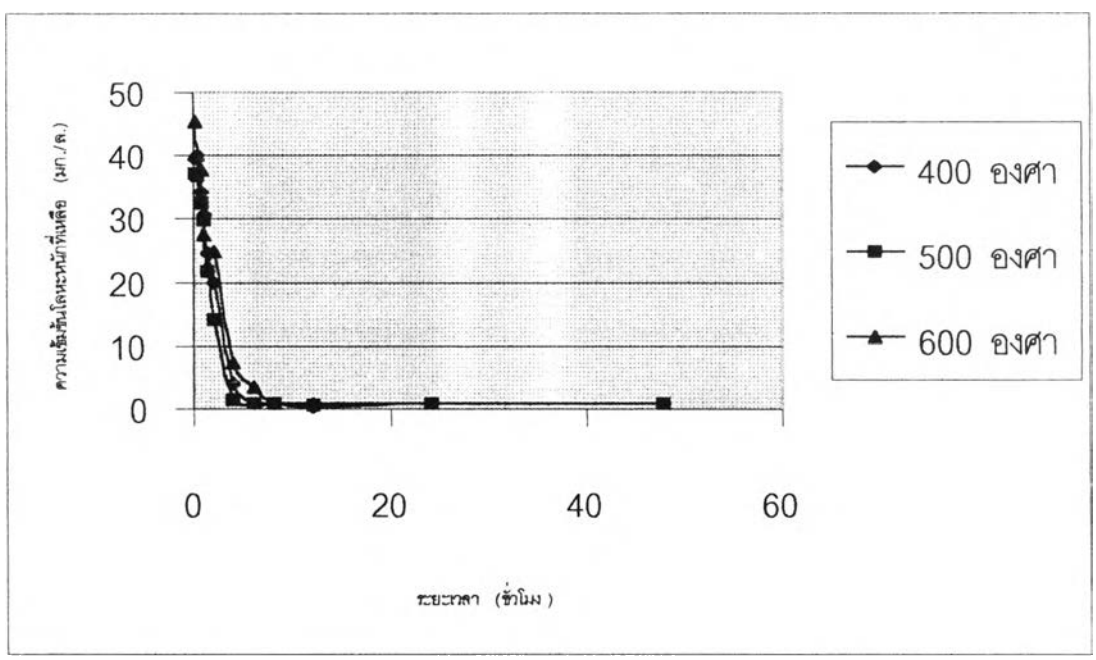
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ



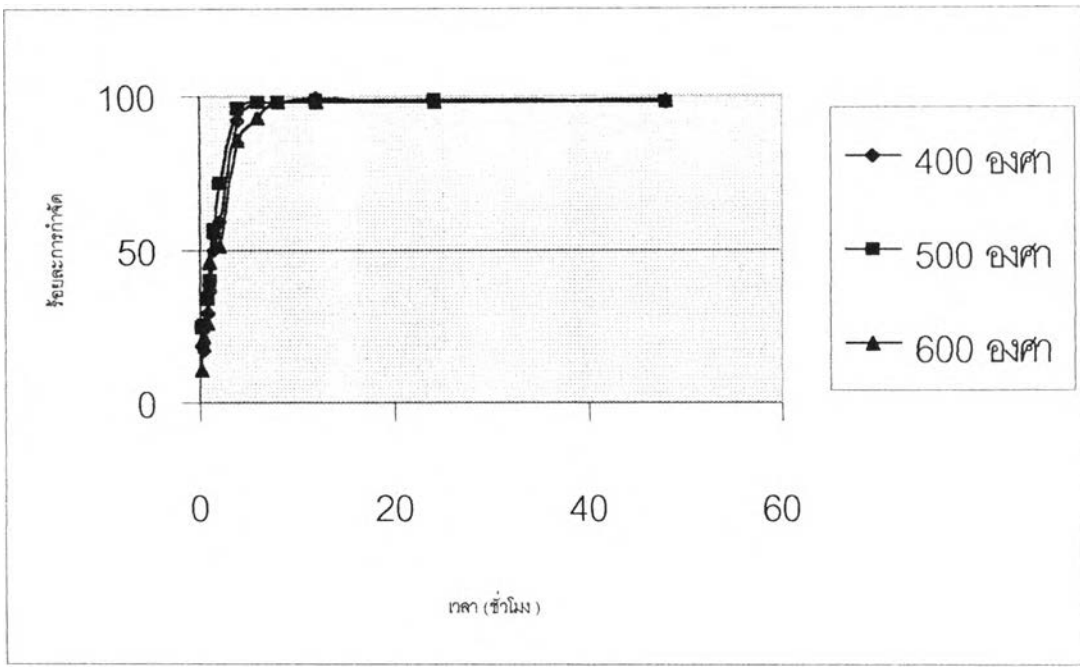
รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ



รูปที่ 4.10 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ



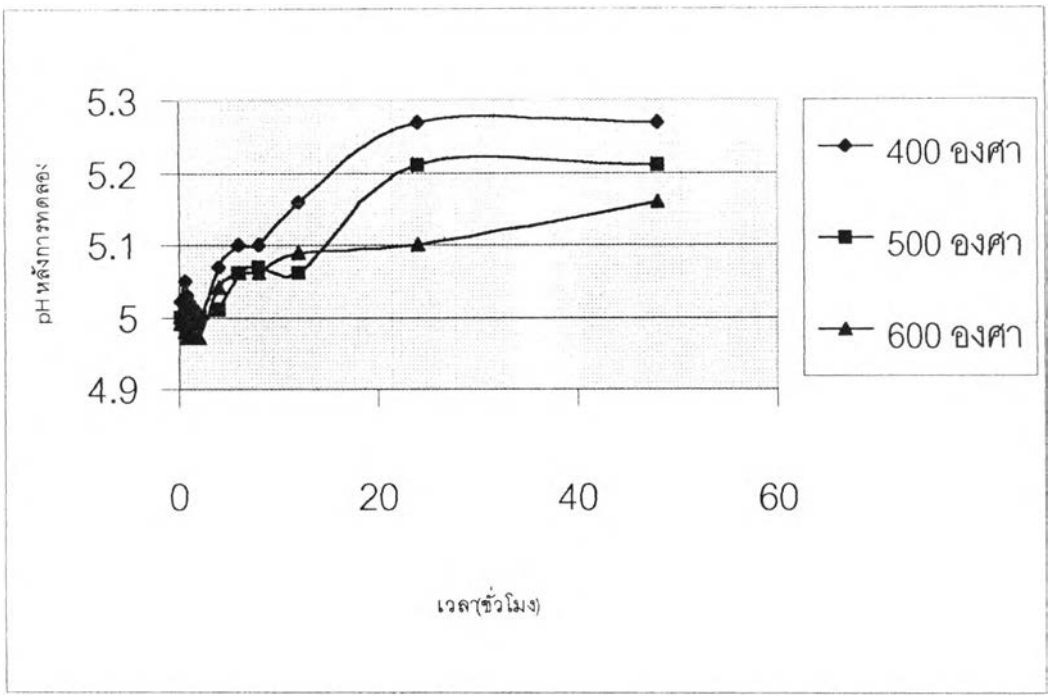
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดของตะกั่วหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ

สูงกว่าร้อยละ 98 แต่ปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในน้ำยังคงมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม (0.3 มก./ล.)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดด้วยถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า การทดลองที่ความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่สุดในเวลา6 ชั่วโมงแรกแต่ก็สามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่า 90 เปอร์เซนต์ในเวลา 6 ชั่วโมง ส่วนถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิที่ 400 และ 500 องศามีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสูงใกล้เคียงกัน โดยสามารถกำจัดตะกั่วได้มากกว่า 90 เปอร์เซนต์ในเวลา 4 ชั่วโมง แต่กระดูกที่เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเซลเซียสจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเล็กน้อย พีเอชของน้ำหลังจากการทดลองแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือพีเอชของน้ำหลังการทดลองมีค่า 5.16-5.27 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิที่เผาต่ำกว่าจะทำให้พีเอชของน้ำหลังทำการทดลองมีค่าสูงกว่า เมื่อพิจารณาค่า adsorption capacity พบว่ามีค่าสูงสุดใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะการทดลอง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 238-249 มก./ก. ถ่านกระดูก

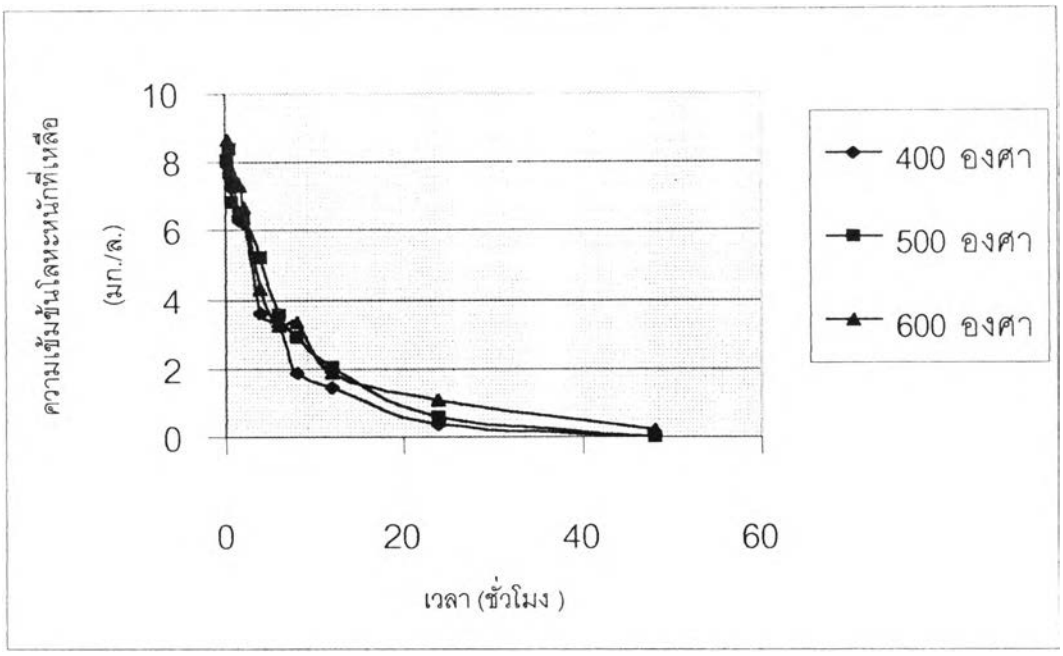


รูปที่ 4.13 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ

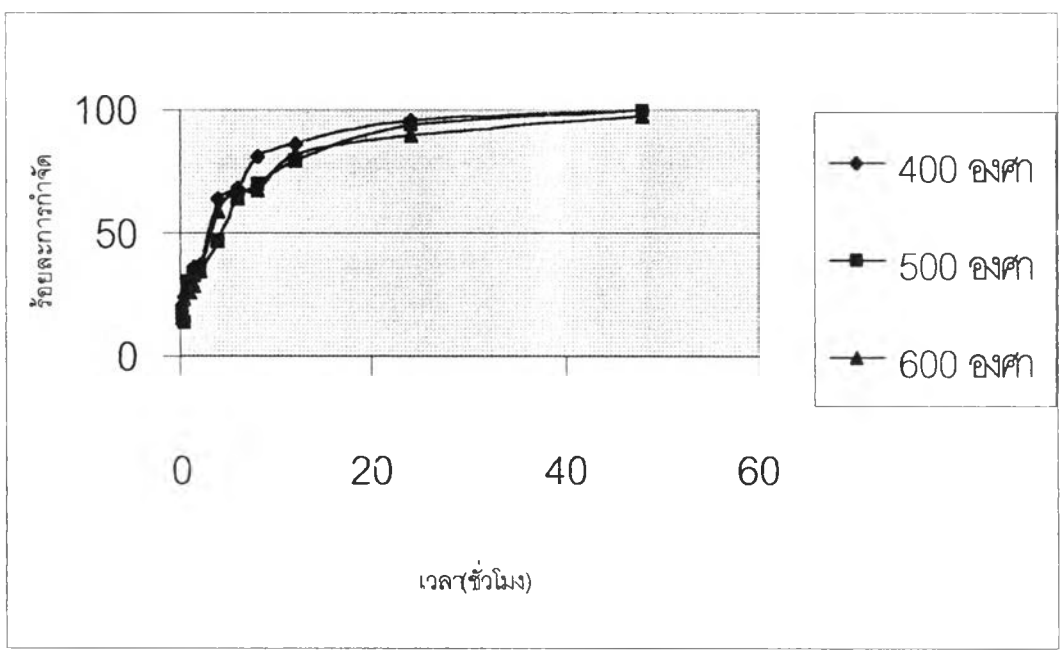
4.2.2 ผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกในการกำจัดแคดเมียม

จากผลการศึกษาการนำถ่านกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ค่า คือ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส มาทดลองกำจัดแคดเมียมในน้ำที่ความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้นเท่ากับ10 มก./ล. โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล. แล้วทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

จากผลการทดลองการกำจัดแคดเมียมพบว่า ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมต่ำกว่าตะกั่วแต่ยังสามารถกำจัดแคดเมียมได้100 เปอร์เซนต์ในเวลา 48 ชั่วโมง ดังแสดงรายละเอียดปริมาณแคดเมียมที่เหลือในน้ำที่ระยะเวลาต่าง ๆ และประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ

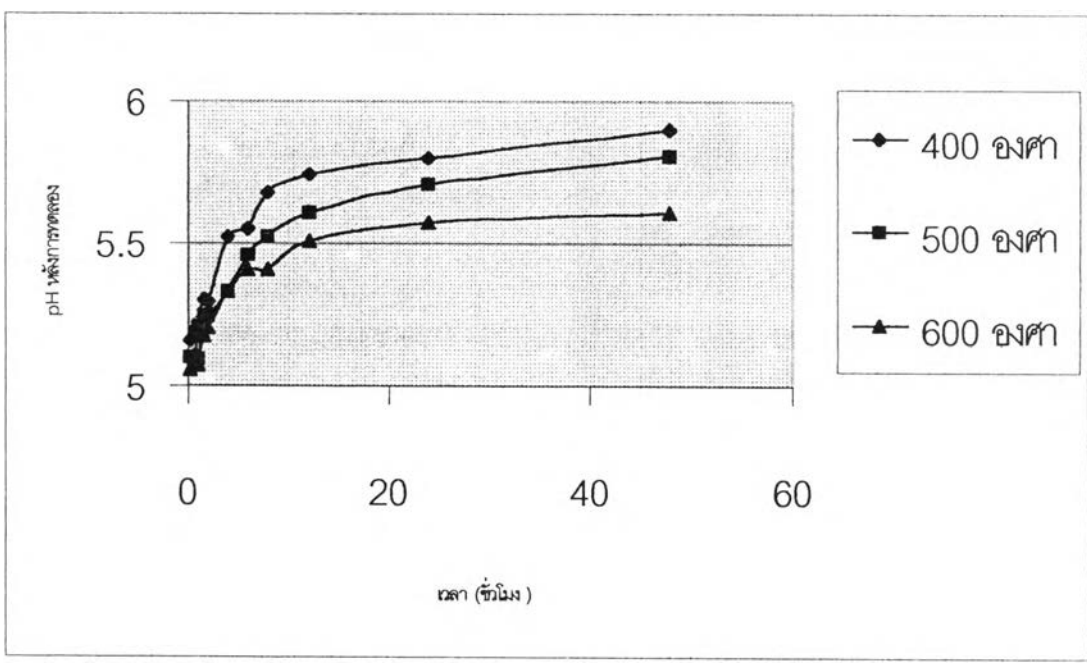


รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัด แคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดของแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองการกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้เผากระดูก 3 ค่า คือ ถ่านกระดูกที่เผาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัด โดยพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัแคดเมียมในน้ำโดยที่อุณหภูมิที่เตรียมที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่าสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่า โดยกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิเผาที่400 อัตราเร็วในการกำจัดแคดเมียมได้เร็วที่สุด กระดูกที่เผาที่ 500 องศาเซลเซียสแม้ว่าจะสามารถกำจัดแคดเมียมได้ 100 เปอร์เซนต์ใน 48 ชั่วโมงแต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลในตารางที่ ก7 และ ก8 แล้วจะเห็นได้ว่าอัตราการกำจัดด้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกระดูกที่เผาที่ 400 องศาเซลเซียส ส่วนกระดูกที่เผาที่ 600 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดได้ 97.76 เปอร์เซนต์ใน 48 ชั่วโมงซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดเมื่อพิจารณาพีเอชของน้ำก่อนและหลังการทดลองพบว่าพีเอชของน้ำหลังการทดลองมีค่าสูงขึ้นมาก คือพีเอชเริ่มต้นเป็น 5 และเปลี่ยนแปลงเป็น 5.61-5.90 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และกระดูกที่เผาที่อุณหภูมิที่เผาต่ำกว่าจะทำให้พีเอชของน้ำหลังทำการทดลองมีค่าสูงกว่า เมื่อพิจารณาค่า adsorption capacity พบว่าพบว่ามีค่าสูงที่สุดใกล้เคียงกันทั้ง 3 สภาวะการทดลอง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 9.72-10.02 มก./ก. ถ่านกระดูก



รูปที่ 4.16 ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ5 ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่สภาวะอุณหภูมิการเตรียมต่าง ๆ

4.2.3 สรุปผลการศึกษาสภาวะการเตรียมถ่านกระดูกที่เหมาะสม

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าถ่านกระดูกที่เผาที่สถาวะแตกต่างกันดังกล่าวสามารถกำจัดตะกั่วและแคดเมี่ยมได้ดีใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดจะได้ว่าถ่านกระดูกที่เผาที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียสใช้เวลาการกวนในการกำจัดตะกั่วสูงสุดต่ำกว่าที่อุณหภูมิเผาที่600 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาเดียวกัน ถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่500 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 และ 600 องศาเซลเซียสเล็กน้อย ส่วนถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่400 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดแคดเมียมได้สูงกว่าที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 และ 600 องศาเซลเซียส และจากการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่400 และ 500 องศาเซลเซียสสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่600 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาของ Phantumvanit P. และ Legeros RZ (1997) ที่สรุปว่าเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้นจะทำให้ผลึกขององค์ประกอบถ่านกระดูก (Crystallinity) มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากไม่มีคาร์บอเนตไปขัดขวางการเกิดผลึกทำให้มี ซึ่งจะทำให้ผลกระทบให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ดังนั้นจึงเลือกสภาวะดังกล่าวทำการทดลองศึกษาในขั้นต่อไป เมื่อพิจารณาพีเอชหลังการทดลองพบว่าพีเอชเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเกิดการละลายของถ่านกระดูกซึ่ง Kaplan, Knox และ Coffey (2002) กล่าวไว้ว่าสมการการละลายของถ่านกระดูกไว้ดังนี้

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^+(aq) \rightarrow 10Ca^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^-(aq) + 2H_2O(aq) \qquad (1)$$

และพีเอชหลังการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นที่มากกว่า (ที่ 50 มก./ล. ตะกั่ว) มีพีเอชหลังการทดลองต่ำกว่าที่ความเข้มข้นที่น้อยกว่า เนื่องจากเกิดการตกตะกอนร่วมด้วยของตะกั่วซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

$$10M^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^-(aq) + 2H_2O\ (aq) \rightarrow M_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^+(aq) \qquad (2)$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่าการกำจัดโลหะหนักที่มากขึ้นเป็นผลทำให้เกิด H^+ ขึ้นทำให้พีเอชของน้ำเสียลดลง

4.3 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดโลหะหนัก

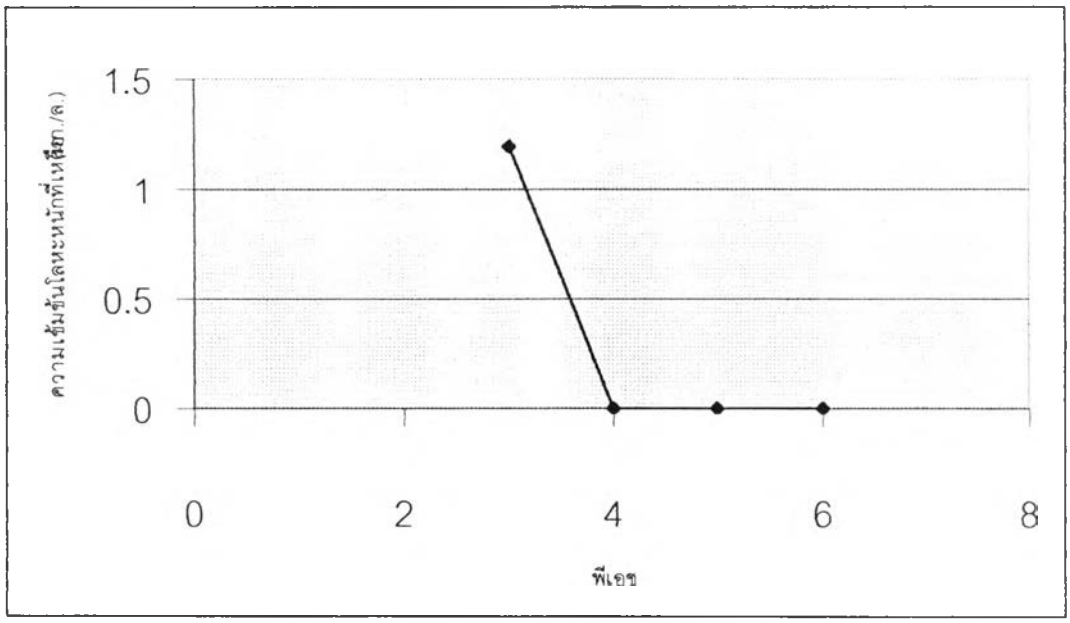
การศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับจะเริ่มที่พีเอช3 เนื่องจากถ่านกระดูกไม่เหมาะสมที่จะดูดซับสารที่มีพีเอชต่ำกว่านี้เนื่องจากจะเกิดการละลายของตัวดูดซับ และ ศึกษานี้จึงปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของน้ำจากพีเอช 3 ถึงพีเอช 6 สำหรับการทดลองกำจัดตะกั่ว และปรับเปลี่ยนพีเอชจาก 3 ถึงพีเอช 8 สำหรับการทดลองกำจัดแคดเมียมเนื่องจากเมื่อเพิ่มพีเอชของน้ำสูงกว่านี้จะเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักขึ้นมากซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับของถ่านกระดูก ถ้าพีเอชของน้ำมากกว่านี้จนไม่สามารถศึกษาได้

4.3.1 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดตะกั่ว

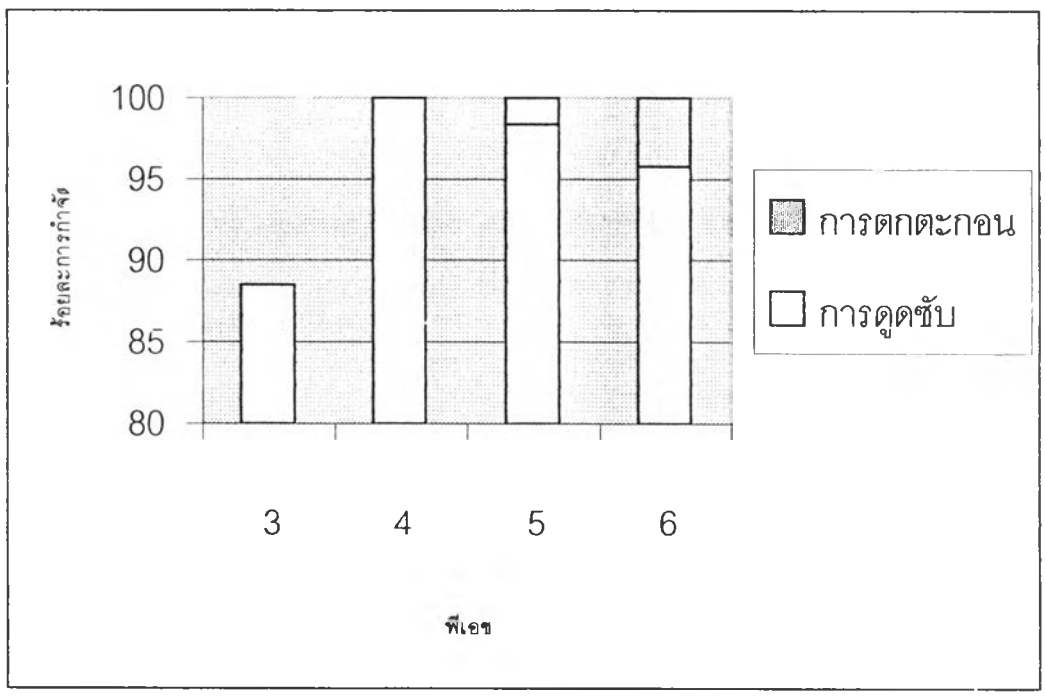
1) น้ำเสียที่มีตะกั่วเริ่มต้น 10 มก./ล.

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่3 ถึง 6 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเผา 1 ชั่วโมง โดยที่พีเอชแต่ละพีเอชจะทำ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุมอีก 1 ชุด ทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

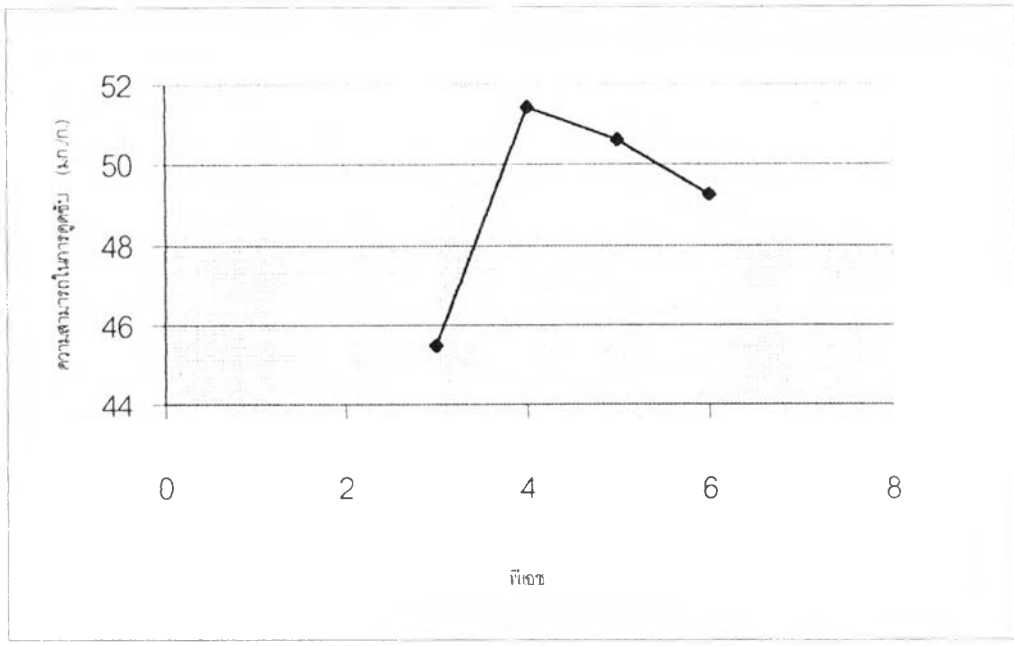
จากผลการทดลองที่น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วต่ำที่สุดแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงถึง88.52 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองที่พีเอช 4, 5 และ 6 พบว่าสามารถบำบัดได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงรายละเอียดในกราฟรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งจากการทดลองนี้ได้ทำแบลงค์โดยใช้น้ำเสียโลหะตะกั่วมาปรับพีเอชอย่างเดียวโดยไม่ได้เติมถ่านกระดูก พบว่าที่พีเอช 5 และ 6 จะมีการตกตะกอนของตะกั่วเนื่องจากพีเอชอย่างเดียวด้วยมีค่าร้อยละการตกตะกอนเท่ากับ 2.65 และ 4.28 ที่พีเอช 5 และ 6 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พีเอชของน้ำเสียหลังจากทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่พีเอชต่าง ๆ adsorption capacity มีค่าต่ำที่สุดที่พีเอช 3 ที่ 45.48 มก./ก. ถ่านกระดูก และที่พีเอช 4, 5 และ 6 มี adsorption capacity อยู่ระหว่าง 49.25 ถึง 51.45 และเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในกราฟรูปที่ 4.18 พบว่าความแตกต่างของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับได้โดยถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วสูงสุดที่พีเอช 4-5



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

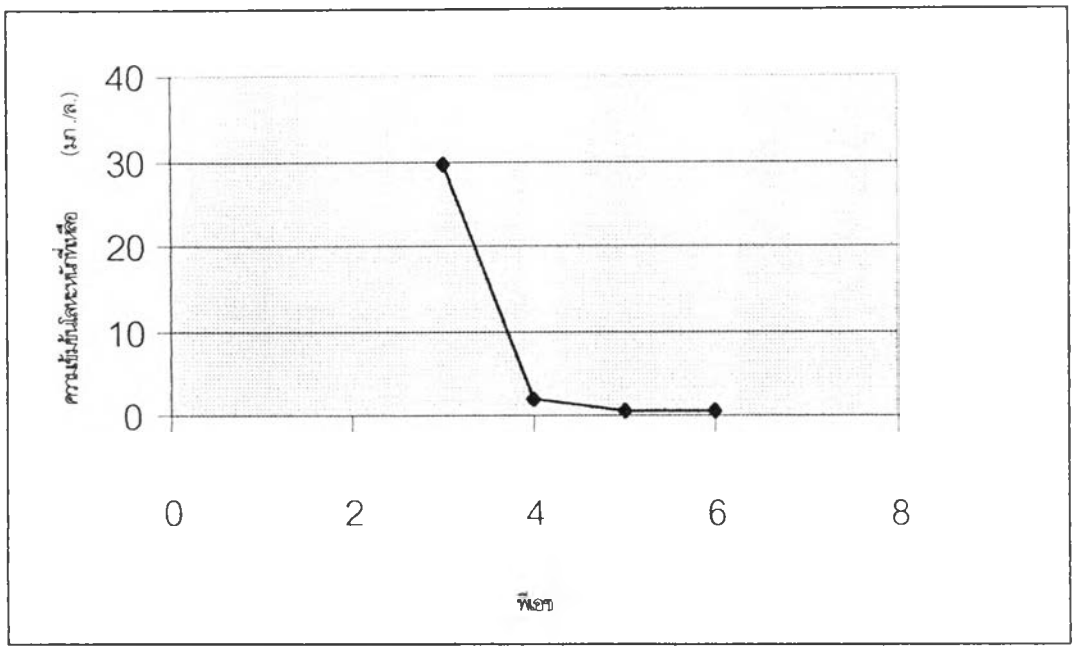


รูปที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นตะกั่ว 10 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ

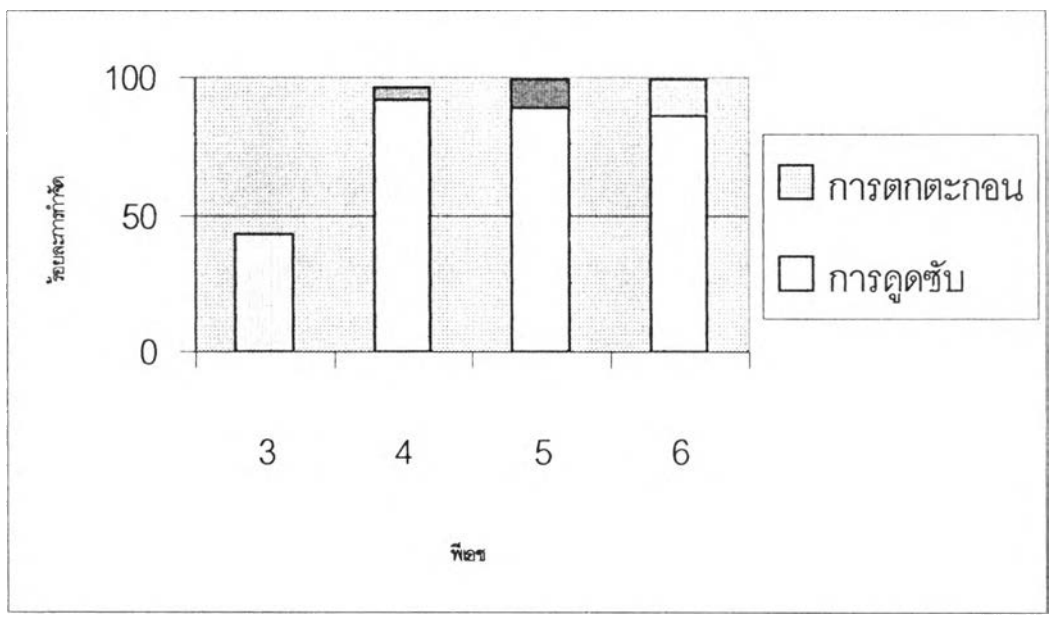
2) **น้ำเสียที่มีตะกั่วเริ่มต้น 50 มก./ล.**

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่ 3 ถึง 6 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเผา 1 ชั่วโมง โดยที่พีเอชแต่ละพีเอชจะทำ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุมอีก 1 ชุด ทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

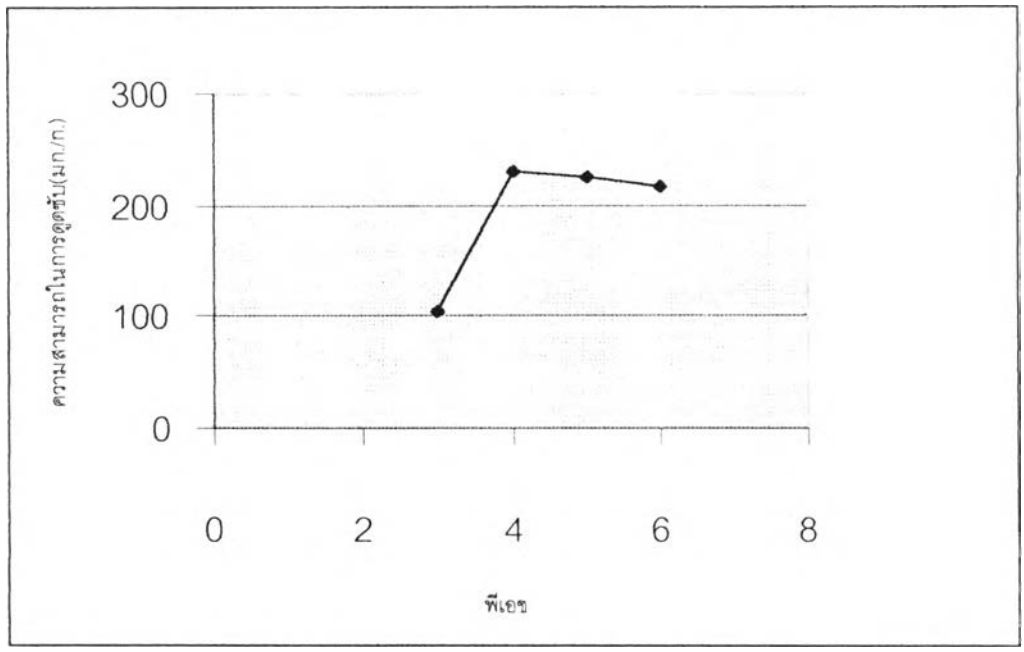
จากผลการทดลองที่น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล.ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่สุดที่พีเอช3 โดยสามารถกำจัดได้ร้อยละ 43.12 และเมื่อทดลองการดูดซับที่พีเอช 4 ถึง 6 พบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดได้ในปริมาณที่สูงใกล้เคียงกันโดยมีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 96.35 ถึง 98.98 ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 เมื่อพิจารณาพีเอชหลังทำการทดลองเปรียบเทียบกับผลของพีเอชที่ 10 มก./ล. จะเห็นได้ว่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นไม่มากเท่ากับการทดลองก่อน จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้สรุปไปแล้วในหัวข้อ 4.2.3



รูปที่ 4.20 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น50 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ0.2 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นตะกั่ว 50 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ

พิจารณาค่า adsorption capacity ที่พีเอช 3 พบว่ามีค่าเท่ากับ 104 มก./ก. ถ่านกระดูกซึ่งต่ำที่สุด รองลงมา คือ ที่พีเอช6 มีค่าเท่ากับ 215.92 มก./ก. ถ่านกระดูก และที่พีเอช 4 และ5 มีค่าการดูดซับเท่ากับ 230.8 และ 224.77 มก./ก. ถ่านกระดูก ตามลำดับแม้ว่าที่พีเอช 5 จะมีเปอร์เซนต์การดูดซับที่น้อยกว่าที่พีเอช 4 แต่ว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้ในปริมาณที่สูงกว่า เนื่องจากโลหะตะกั่วบางส่วนถูกกำจัดโดยการตกตะกอนเนื่องจากพีเอชของน้ำสูงขึ้น

จากการทดลอง ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียที่ความเข้มข้นตะกั่ว 10 มก./ล. สรุปได้ว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่พีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากถึง 100 เปอร์เซนต์ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดูก โดยพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 4 ถ่านกระดูกจะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุดร้อยละ 100 แต่เมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดูกจะเกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นส่วนใหญ่โดยมีการตกตะกอนร่วมด้วย ซึ่งที่ค่าพีเอชเท่ากับ5 การกำจัดตะกั่วจะเป็นการดูดซับและการตกตะกอนร้อยละ 98.35 และ 1.35 ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 6 การกำจัดตะกั่วจะเป็นการดูดซับและการตกตะกอนร้อยละ 95.72 และ 4.28 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ7 พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดส่วนใหญ่เป็นการตกตะกอนจึงไม่ได้ทดลองในละเอียด

ดังนั้นปฏิกิริยาการดูดซับจึงเกิดดีที่สุดที่พีเอชของน้ำเริ่มต้นเท่ากับ4 แต่ประสิทธิภาพการกำจัดรวมพบว่าสูงมากตั้งแต่พีเอช 4-6

จากการทดลอง ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียที่ความเข้มข้นตะกั่ว 50 มก./ล. สรุปได้ว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่วได้ดีที่พีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงมากถึงร้อยละ 96.35-98.98 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยถ่านกระดูก พบว่าเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ โดยพีเอชน้ำเสียเท่ากับ4 ถ่านกระดูกจะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วสูงที่สุดร้อยละ 91.59 และมีการตกตะกอนเล็กน้อยที่ร้อยละ 4.76 ซึ่งที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 การกำจัดตะกั่วจะเป็นการดูดซับและการตกตะกอนร้อยละ 89.19 และ 9.72 ตามลำดับ ส่วนที่พีเอช 6 การกำจัดตะกั่วจะเป็นการดูดซับและการตกตะกอนร้อยละ 85.68 และ 13.3 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ7 พบว่าปฏิกิริยาการกำจัดส่วนใหญ่เป็นการตกตะกอนจึงไม่ได้ทดลองในละเอียด

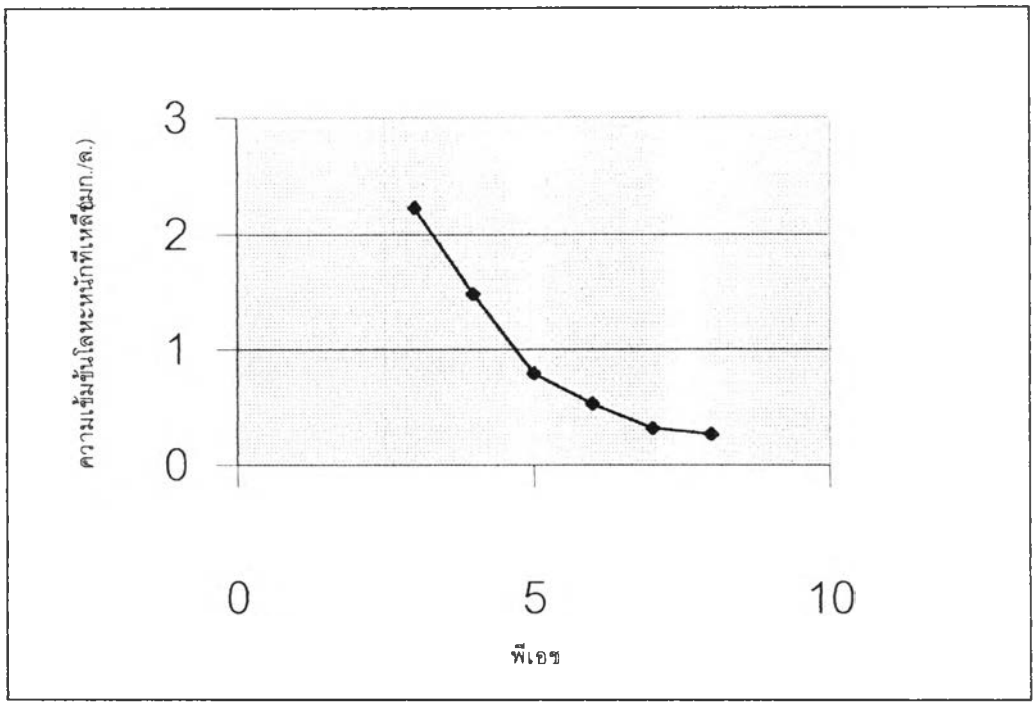
ดังนั้นปฏิกิริยาการดูดซับจึงเกิดดีที่สุดที่พีเอชของนำเริ่มต้นเท่ากับ 4 แต่ประสิทธิภาพการกำจัดรวมพบว่าสูงมากตั้งแต่พีเอช 4-6 และจะเลือกพีเอชที่ 5 ทำการทดลองในขั้นต่อไป

4.3.2 ผลการศึกษาของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่มีต่อการกำจัดแคดเมียม

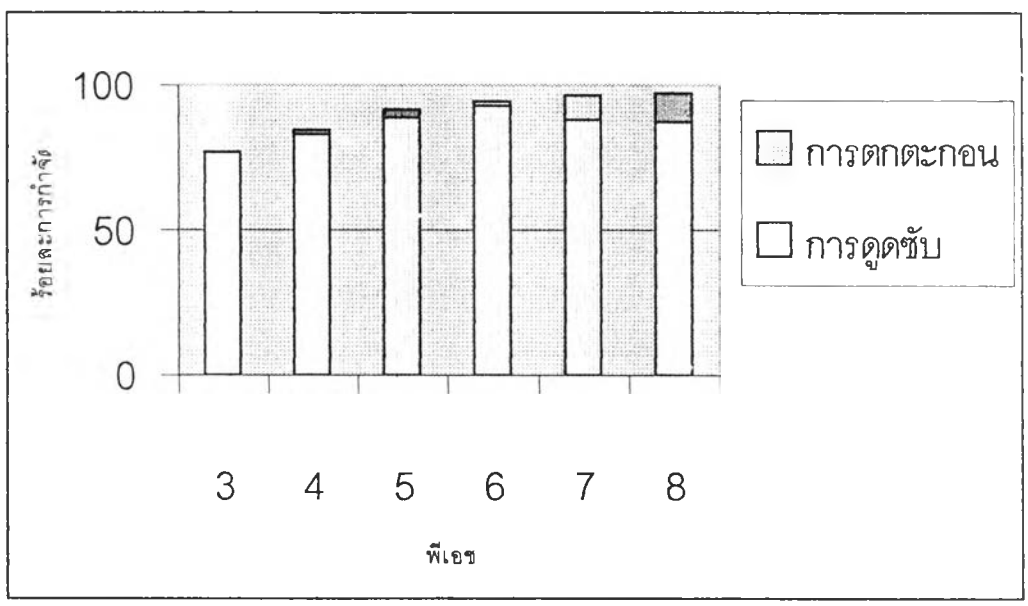
1) น้ำเสียที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 10 มก./ล.

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่3 ถึง 8 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเผา 1 ชั่วโมง โดยที่พีเอชแต่ละพีเอชจะทำ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุมอีก 1 ชุด ทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

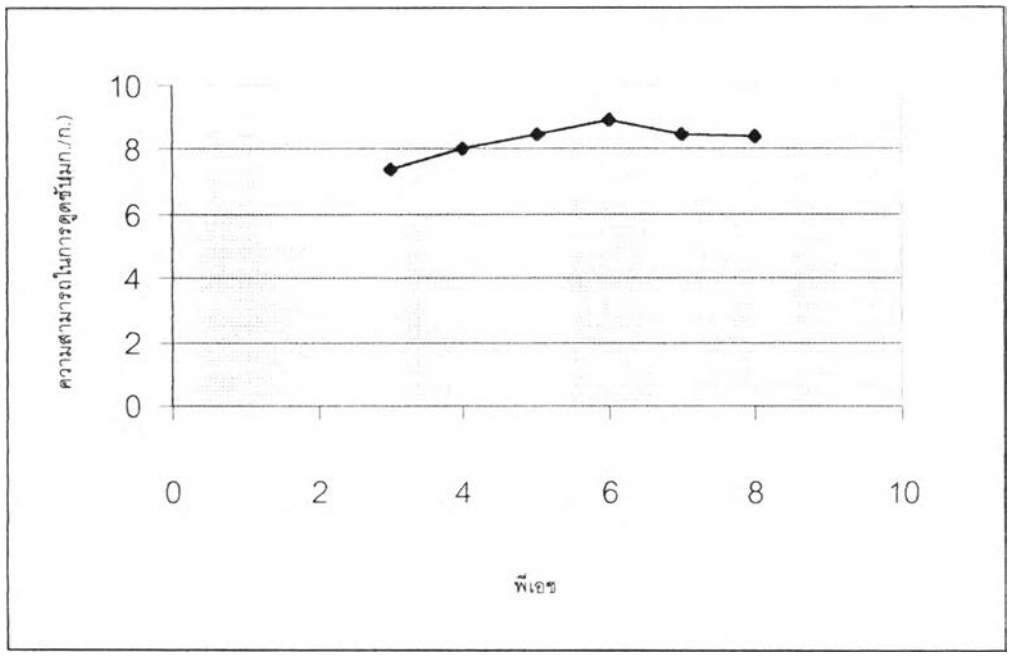
จากผลการทดลองที่น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ที่พีเอช 3 ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมต่ำที่สุดแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงถึง 76.84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองที่กำจัดแคดเมียมได้สูงที่สุดที่พีเอช 8 ประสิทธิภาพ 97.33 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะมีการตกตะกอนด้วยพีเอชอย่างเดียวร่วมด้วย ดังแสดงรายละเอียดในกราฟรูปที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งจากการทดลองนี้ได้ทำแบลงค์โดยใช้น้ำเสียโลหะแคดเมียมมาปรับพีเอชอย่างเดียวโดยไม่ได้เติมถ่านกระดูก พบว่าที่พีเอช 4,5,6,7 และ 8 จะมีการตกตะกอนของแคดเมียมเนื่องจากพีเอชอย่างเดียวด้วยมีค่าร้อยละการตกตะกอนเท่ากับ 1.25,3.12,1.49,8.44 และ 9.8 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.24 ค่า adsorption capacity มีค่าต่ำที่สุดที่พีเอช3 ที่ 7.38 มก./ก. ถ่านกระดูก และมากที่สุดที่พีเอช 6 มี adsorption capacity 8.92 และค่าความสามารถในการดูดซับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.25 และจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดคือที่พีเอช 6



รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชต่าง ๆ



รูปที่ 4.24 ร้อยละการกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น10 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

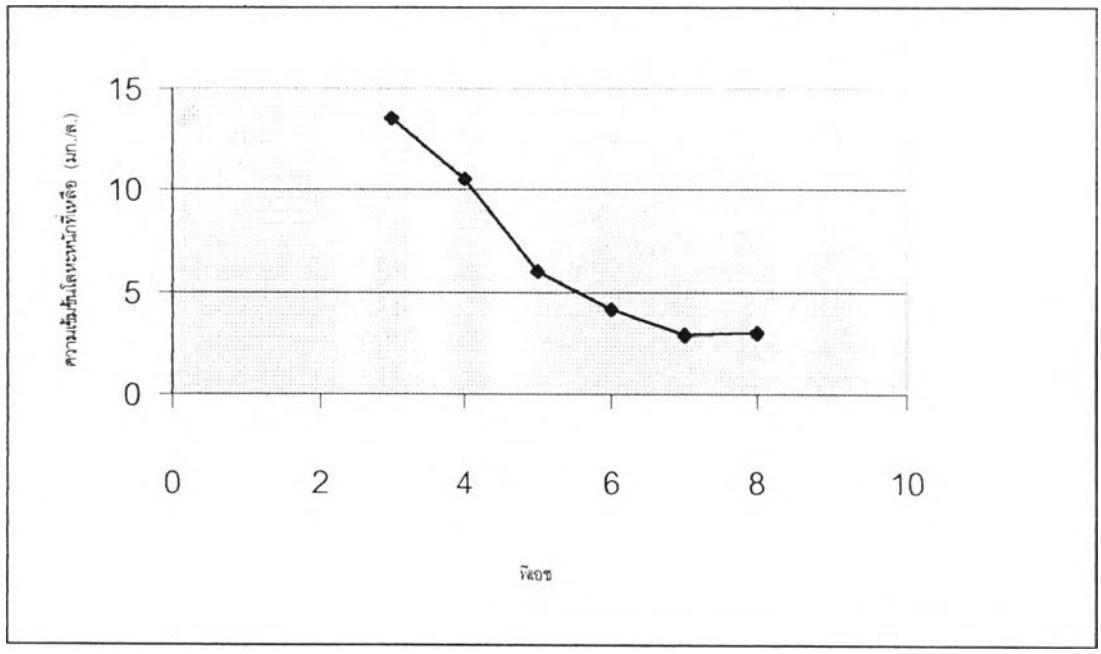


รูปที่ 4.25 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 10 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ

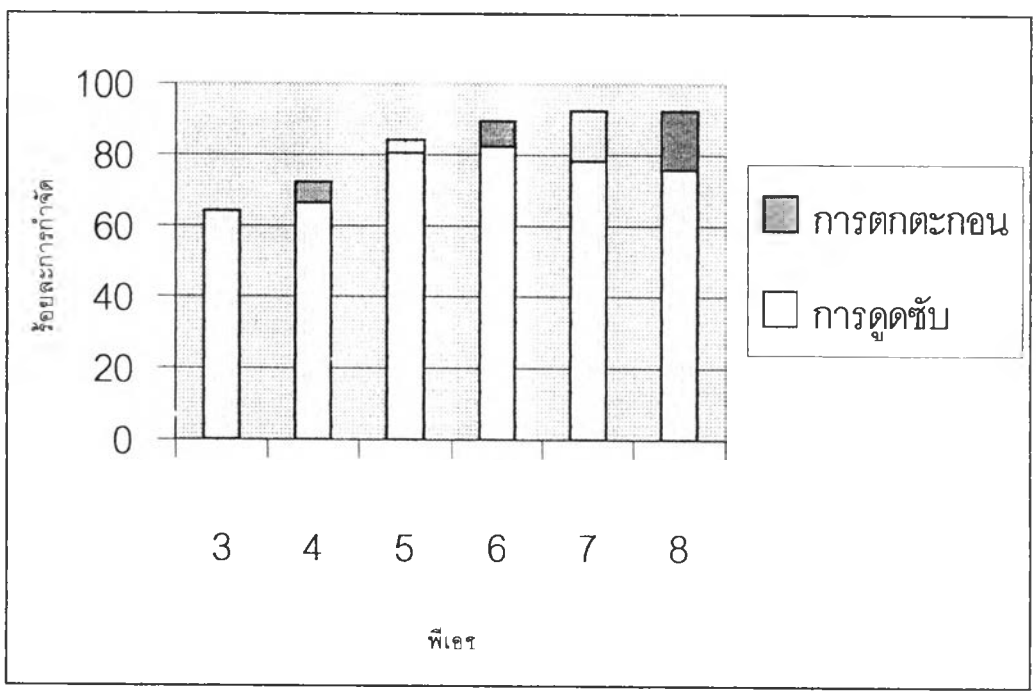
2) **น้ำเสียที่มีแคดเมียมเริ่มต้น 40 มก./ล.**

การทดลองจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล. แล้วทดลองปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นตั้งแต่3 ถึง 8 ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกที่เตรียมที่อุณหภูมิการเผาที่ 400 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการเผา 1 ชั่วโมง โดยที่พีเอชแต่ละพีเอชจะทำ 3 ซ้ำ และทำชุดควบคุมอีก 1 ชุด ทำการกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 125 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

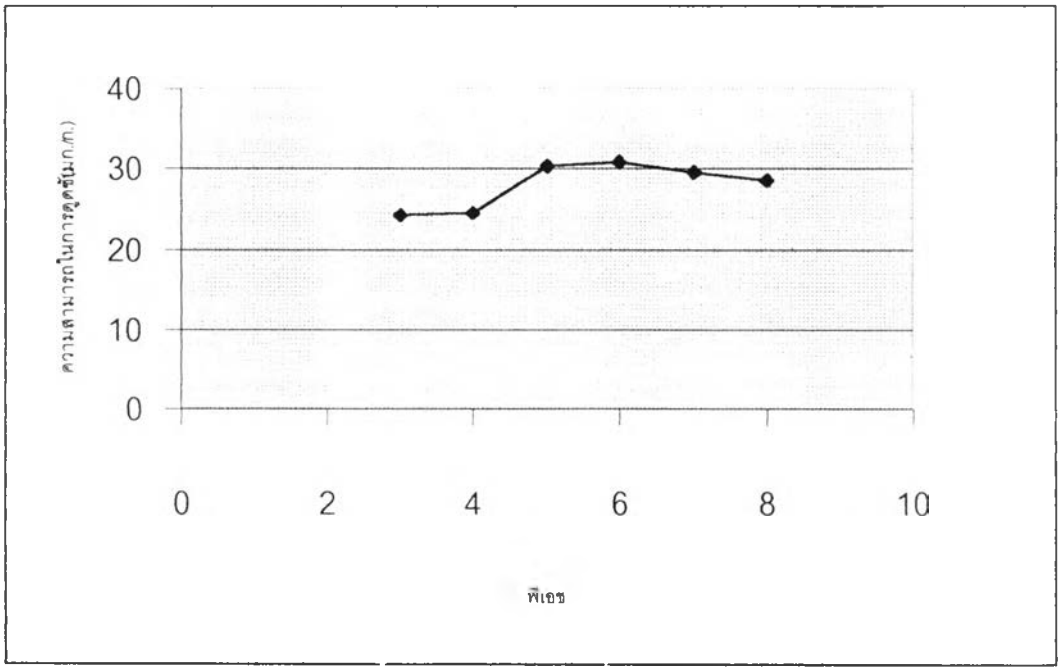
จากผลการทดลองที่น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล.ถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำที่สุดที่พีเอช3 และ 4 มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันโดยสามารถกำจัดได้ร้อยละ 63.93 และ 72.09 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุดที่พีเอช 7 ประสิทธิภาพการกำจัด 92.41 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 พิจารณาค่า adsorption capacity ที่พีเอช 3 และ 4 พบว่ามีค่าเท่ากับ 24.1 และ 24.55 มก./ก. ถ่านกระดูก ซึ่งต่ำที่สุด โดยที่ค่าที่สูงที่สุดจะใกล้เคียงกันได้แก่ ที่พีเอช 5 และ 6 ความสามารถในการดูดซับ 30.32 และ 30.91 มก./ก.ถ่านกระดูก ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.27 การกำจัด(จากการดูดซับ+การตกตะกอน)ในน้ำเสียหลังการทดลองกำจัดแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น40 มก./ล. ด้วยถ่านกระดูกปริมาณ1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.28 ความสามารถในการดูดซับของถ่านกระดูกปริมาณ 1 ก./ล.น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้นแคดเมียม 40 มก./ล. ที่พีเอชต่าง ๆ

4.3.3 สรุปผลการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าที่ความเข้มข้นที่ต่ำเกินไปจะมี H^+ ไปรบกวนสมดุลการตกตะกอนของโลหะหนักจากสมการที่ 2

$$10M^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^-(aq) + 2H_2O\ (aq) \longrightarrow M_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^+(aq) \qquad (2)$$

ยิ่งมี H^+ มากยิ่งมีการกำจัดโลหะหนักน้อยลงและที่ความเข้มข้นโลหะหนักสูง ๆ จะสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีเช่นกัน แต่จะมีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ร่วมอยู่ด้วยประสิทธิภาพสูงสุดของการกำจัดจึงไม่สามารถศึกษาได้ที่พีเอชสูง ๆ

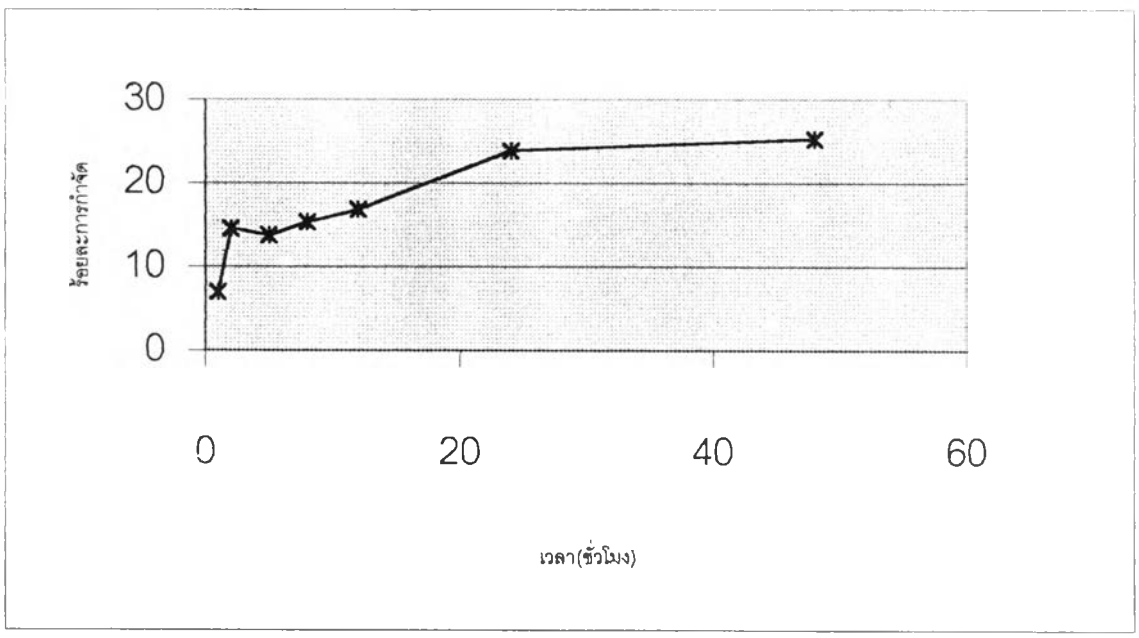
4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ในการกำจัดโลหะหนัก

4.4.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับตะกั่วที่เหมาะสมกับการศึกษาไอโซเทอม

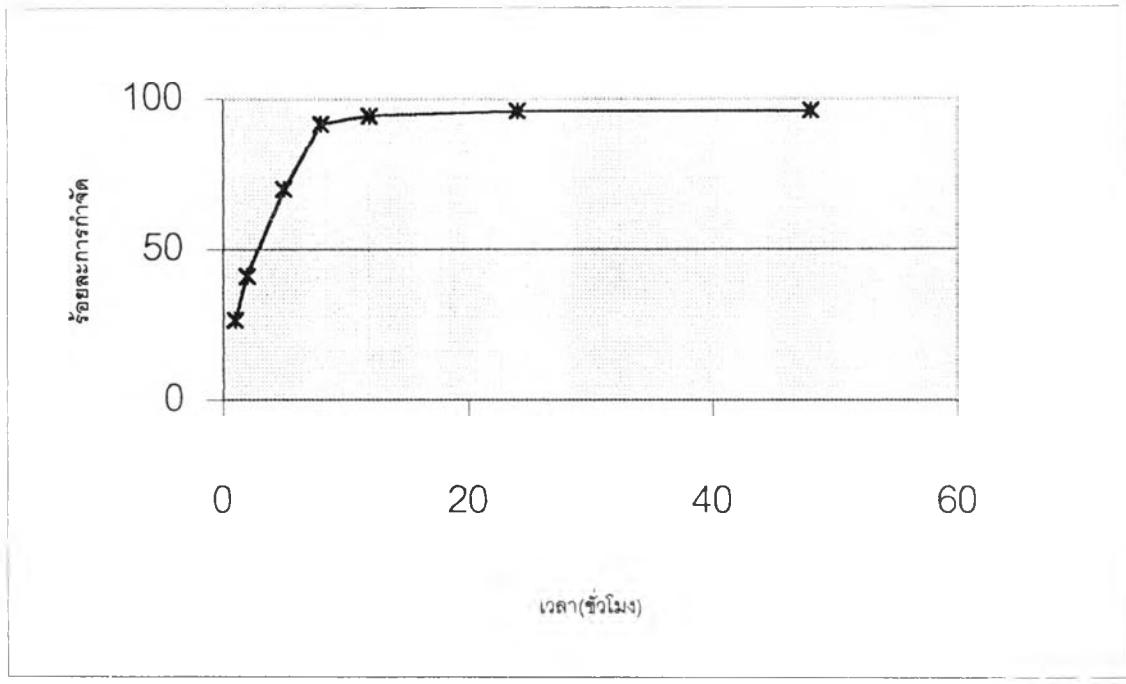
การทดลองนี้จะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ซึ่งเป็นพีเอชที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด โดยทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.04 และ 0.2 ก./ล. โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29 และ 4.30 และข้อมูลตารางที่ ค1 พบว่าที่ปริมาณถ่านกระดูกต่ำ ๆ(0.04 ก./ล.) จะเข้าสู่สมดุลในช่วง 24 ชั่วโมงแรก ที่ปริมาณถ่านกระดูกมาก(0.2 ก./ล.) จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่8 ชั่วโมง เวลาที่สภาวะสมดุลในการกำจัดตะกั่วคือ 24 ชั่วโมง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารดูดซับทำให้สารละลายเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้นเนื่องจากที่ปริมาณสารดูดซับน้อยประสิทธิภาพจะต่ำทำให้สารละลายมีโลหะหนักละลายเหลืออยู่สูงกว่าทำให้มีแนวโน้มในการเปลี่ยนความเข้มข้นมากกว่า



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.04 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอช 5

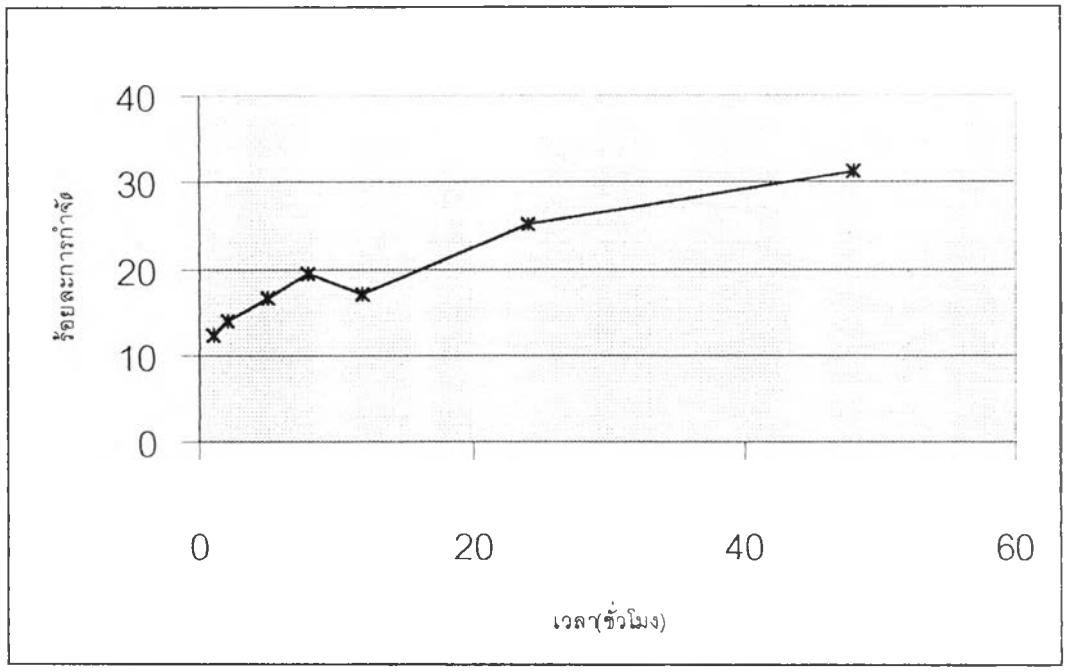


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านกระดูกปริมาณ 0.2 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 100 มก./ล. พีเอช 5

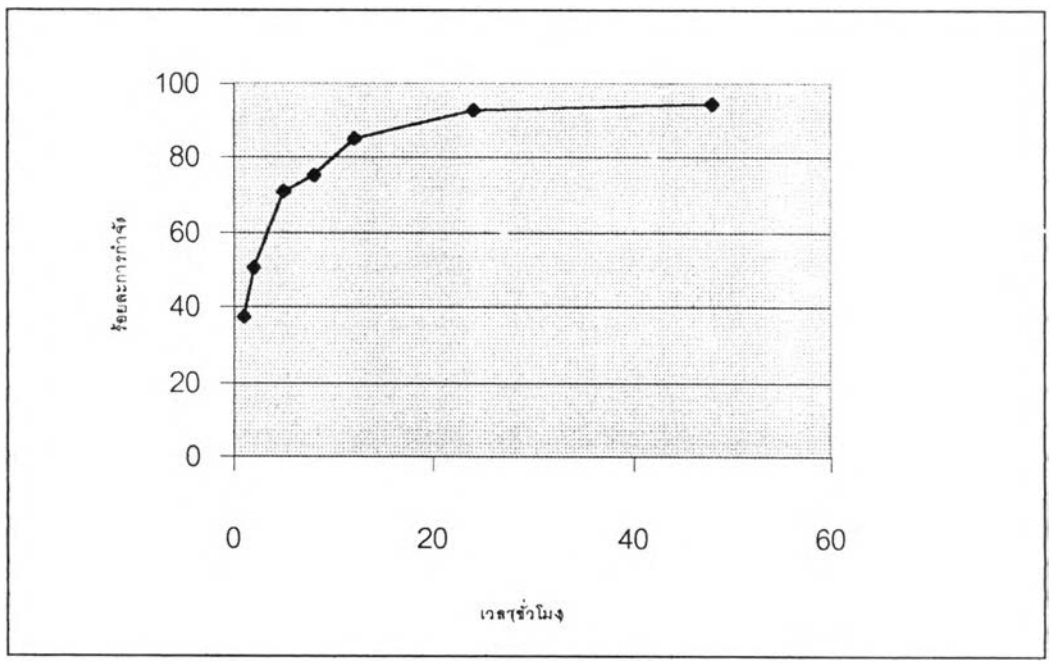
4.4.2 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับแคดเมียมที่เหมาะสมกับการศึกษาไอโซเทอม

การทดลองนี้จะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่ความเข้มข้น 40 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้น6 โดยทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกปริมาณ0.1 และ 1.5 ก./ล. โดยจะเก็บน้ำตัวอย่างที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ซึ่งจากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31 และ 4.32 และข้อมูลตารางที่ ค2 พบว่าที่ปริมาณถ่านกระดูกต่ำ ๆ(0.1 ก./ล.) จะเข้าสู่สมดุลในช่วง 48 ชั่วโมงแรก ที่ปริมาณถ่านกระดูกมาก(1.5 ก./ล.) จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่24 ชั่วโมง เวลาที่สภาวะสมดุลในการกำจัดแคดเมียม คือ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ0.1 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอช 6

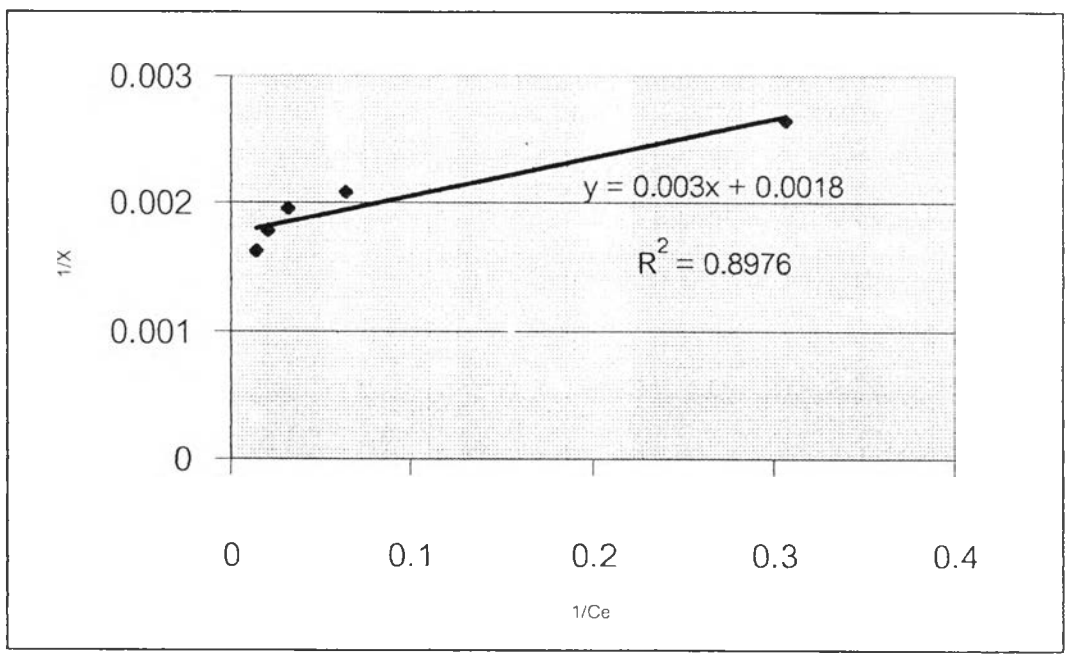


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระว่างเวลาในการเขย่ากับร้อยละการกำจัดแคดเมียมด้วยถ่านกระดูก ปริมาณ1.5 ก./ล. โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมความเข้มข้น 40 มก./ล. พีเอช 6

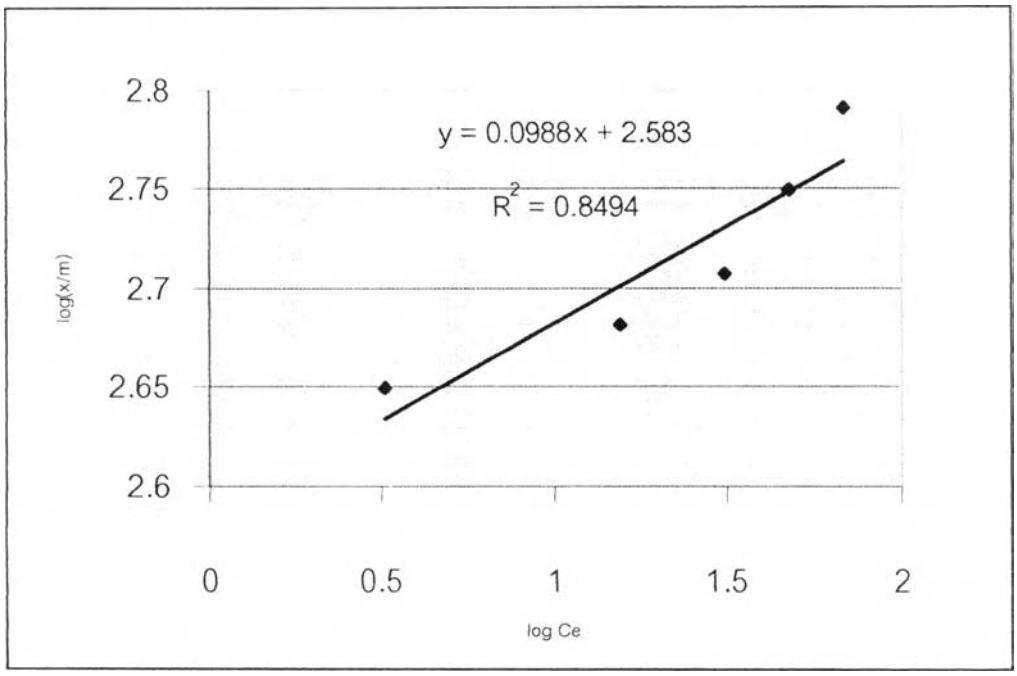
4.4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว

การทดลองทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ซึ่งเป็นพีเอชที่จะทำการเลือกทดลอง ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น0.04, 0.08, 0.12, 0.16 และ 0.2 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ค1 และเมื่อนำข้อมูลมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.33 และ 4.34 เมื่อพิจารณาถึงค่า R-square พบว่ามีค่าไม่ต่างกันมาก คือ ค่า R-square ของไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.8976 และ 0.8494 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทำการทดลองแล้วจะเห็นตะกอนสีขาวเกิดขึ้นร่วมด้วยทั้งนี้เนื่องจากมีกลไกการตกตะกอนร่วมด้วยดังที่กล่าวไปแล้วในการทดลองขั้นต้น จึงสามารถใช้สมการไอโซเทอมในการทำนายความสามารถในการดูดซับได้ตามสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลตะกั่วจะดูดติดบนพื้นผิวที่เจาะจง
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดติดผิวจะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว
3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวด้วยสมการทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิวนั้น
4. โมเลกุลตะกั่วจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว



รูปที่ 4.33 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่ 500 องศาเซลเซียสในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 5



รูปที่ 4.34 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกระดูกที่ 500 องศาเซลเซียสในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียตะกั่วสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 มก./ล. ที่พีเอช 5

4.4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดแคดเมียม

การทดลองจะทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 40 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ซึ่งเป็นพีเอชที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสูงที่สุด ในการทดสอบการดูดติดผิวด้วยถ่านกระดูกโดยแปรเปลี่ยนปริมาณเป็น0.1, 0.2, 0.5, 1 และ 1.5 ก./ล. น้ำตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ ค6 และเมื่อนำข้อมูลมาทำกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิช ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 เมื่อพิจารณาที่ค่า R-square ของไอโซเทอมทั้ง 2 แบบ พบว่ามีค่าสูงใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 0.99 และ 0.98 สำหรับ R-square ของการดูดซับแบบแลงมัวร์และฟรุนดลิชตามลำดับ และ เมื่อทำการทดลองพบตะกอนสีขาวน้อยมากจึงสรุปได้ว่าเกิดกลไกการดูดติดผิวเพียงอย่างเดียวและสามารถทำนายค่าการดูดซับได้ทั้งจากสมการแลงมัวร์และฟรุนดลิชดังนี้

สมการ Langmuir

$$1/(x/m) = 0.0653(1/Ce) + 0.0128$$

และมีสมมติฐานดังนี้

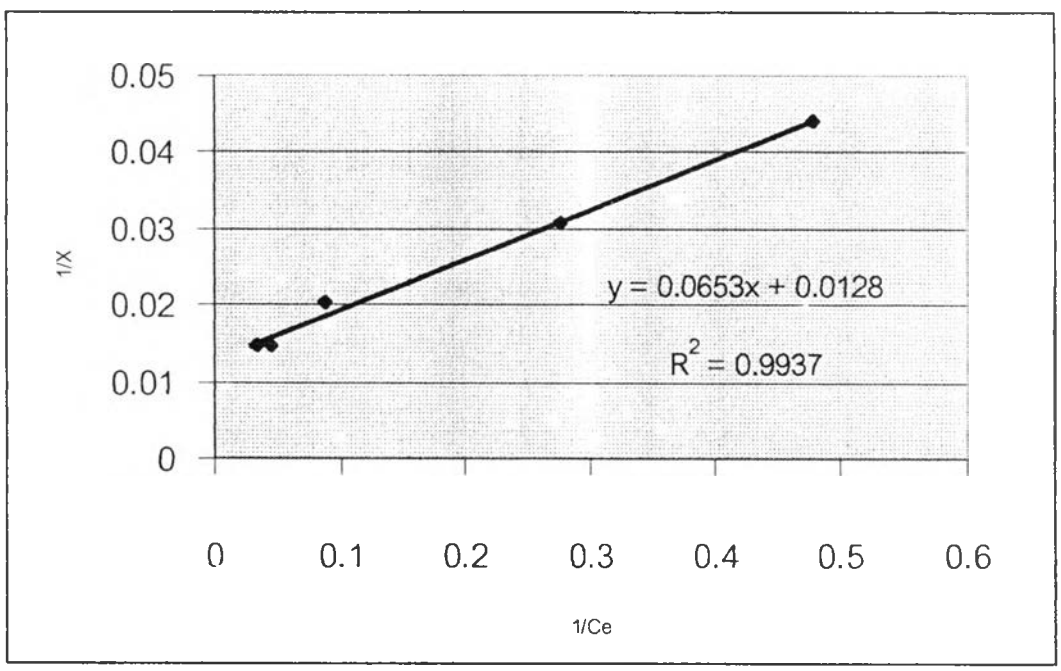
1. โมเลกุลตะกั่วจะดูดติดบนพื้นผิวที่เจาะจง
2. แต่ละพื้นที่ที่ถูกดูดติดผิวจะเกิดการดูดติดผิวเพียงชั้นเดียว
3. พื้นที่ในแต่ละแห่งจะถูกจำกัดปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวด้วยสมการทางเรขาคณิตของพื้นที่ผิวนั้น
4. โมเลกุลตะกั่วจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตลอดพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

สมการ Freundlich

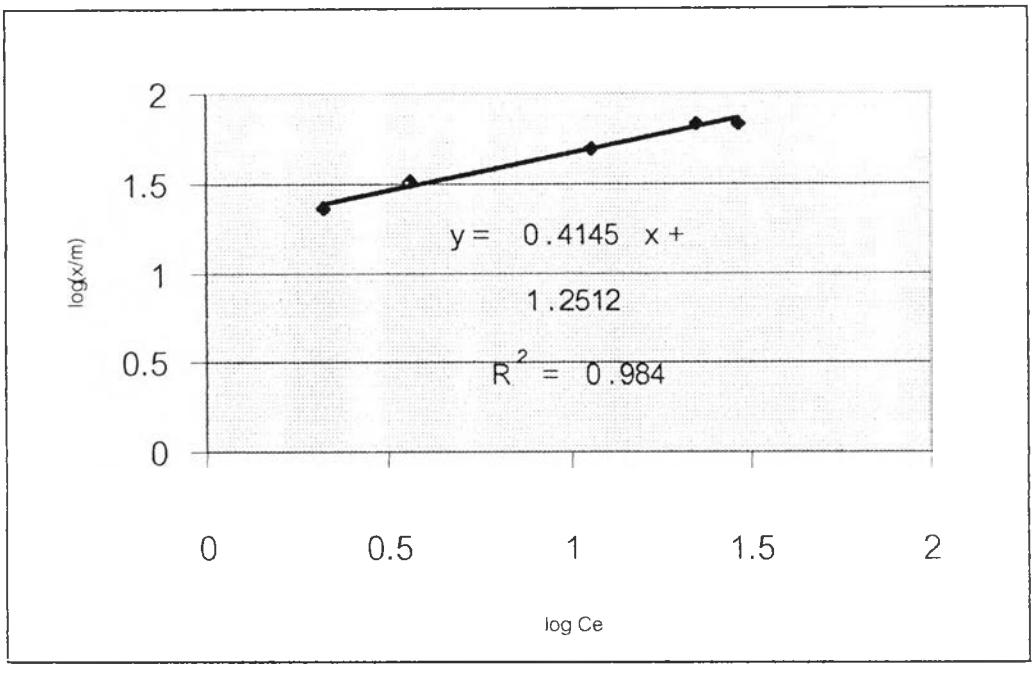
$$x/m = 17.83C_e^{0.4145}$$

และมีสมมติฐานดังนี้

1. พื้นที่ผิวตัวดูดซับไม่สม่ำเสมอ
2. พลังงานในการดูดซับและพื้นที่ผิวมีการกระจายตัวไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.35 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่ 400 องศาเซลเซียสในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้น 40 มก./ล. ที่พีเอช 6



รูปที่ 4.36 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิชของถ่านกระดูกที่ 400 องศาเซลเซียสในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียแคดเมียมสังเคราะห์ความเข้มข้น 40 มก./ล. ที่พีเอช 6

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอุบลรัตน์(2544) ซึ่งได้สมการแลงมัวร์

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

และสมการฟรุนดลิช

$$x/m = 15.98C_e^{0.3437}$$

พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันทั้งค่า R-Square และค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการจึงสามารถใช้สมการทั้ง 2 ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดี

จากผลการทดลองของ Xu, Y. et.al. (1994) ได้ทำการทดลองโดยใช้สารดูดซับเป็นไฮดรอกซีอพาไตท์สังเคราะห์ผลไอโซเทอมในการกำจัดแคดเมียมที่ได้เป็นไปตามสมมติฐานของ Langmuir และความสามารถในการดูดซับสูงที่สุดเป็น 66 มก./ก. ไฮดรอกซีอพาไตท์

จากการทดลองผลการศึกษาหาสมการไอโซเทอมสรุปได้ว่าสามารถทำนายความสามารถในการดูดซับได้จากสมการไอโซเทอมข้างต้นและค่า R-square ของ Isotherm ของตะกั่วมีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากเกิดการตกตะกอนร่วมด้วยซึ่งยากต่อการทำนาย ส่วนการทดลองไอโวเทอมของแคดเมียมเป็นไปได้ดีกับทั้ง 2 สมมติฐานคือ แลงมัวร์และฟรุนดลิช และค่าความสามารถในการดูด

ซับสูงสุดของถ่านกระดูกเท่ากับ 617.5 มก./ก. ถ่านกระดูก และ 68 มก./ก. ถ่านกระดูก สำหรับตะกั่วและแคดเมียม ในการทดลองนี้

Babel, S. and Kurniawan, T.A. (2003) ได้ศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้สารดูดซับชนิดต่าง ๆ ในการกำจัดโลหะหนักได้สรุปได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมสูงสุดของสารดูดซับชนิดต่าง ๆ (Babel, S. and Kurniawan, T.A., 2003)

ชนิดของสารดูดซับ	ตะกั่ว (มก./ก.)	แคดเมียม(มก./ก.)
Chitosan Beads	-	250
Zeolite	175	137
Waste Slurry	1030	15
Lignin	1865	-
Blast Fumace Slag	40	-
GAC	20-150	3-150
Ferric Oxide	230	72
ถ่านกระดูก *	617.5	68

* หมายเหตุ ค่าที่ได้จากการทดลองวิจัยฉบับนี้

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสูงสุดของถ่านกระดูกในการทดลองนี้กับสารดูดซับชนิดต่าง ๆ พบว่าถ่านกระดูกเป็นสารดูดซับที่มีความสามารถในการดูดติดผิวกับตะกั่วได้ดี

4.5 การศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านกระดูก โดยทดการทดลองแบบคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงตะกั่วจากโรงงานผลิตหลอดภาพที่ความเข้มข้น 1 มก./ล. และน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 1 มก./ล. ที่พีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง 4.4.3 คือ พีเอช เท่ากับ 5 ไหลผ่านคอลัมน์อะครีลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง2 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุถ่านกระดูกสูง 30 เซนติเมตร มีจุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 10 และ 20 เซนติเมตร มีน้ำหนักกระดูกเท่ากับ 60 กรัม และทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเสียตะกั่ว 2.8 ลิตรต่อชั่วโมงเก็บน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์ทุก 12 ชั่วโมงและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันเก็บตัวอย่างจนกระทั่งน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์มีปริมาณตะกั่วสูงเท่ากับน้ำเสียเริ่มต้น

ผลการทดลองพบว่าตะกั่วที่ไหลผ่านคอลัมน์จะเกิดการอุดตันบนผิวของถ่านกระดูกภายในคอลัมน์ ทำให้น้ำไม่สามารถไหลผ่านคอลัมน์ต่อไปได้ เมื่อปริมาณน้ำได้เพียง100.8 ลิตร หรือ 1072.34 BV คิดเป็นความสามารถในการดูดซับ 1.68 มก./ก. ถ่านกระดูก สำหรับน้ำเสียจริงตะกั่วจากโรงงานหลอดภาพ และ134.4 ลิตร หรือ1429.79 BV คิดเป็นความสามารถในการดูดซับ 2.24 มก./ก. ถ่านกระดูก น้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว จากการเก็บตัวอย่างน้ำที่ระยะต่าง ๆ เมื่อเกิดการอุดตันพบว่าที่ระยะ 10 เซนติเมตรก็ไม่พบตะกั่วเลยแสดงว่าตะกั่วถูกกำจัดที่ด้านบนของคอลัมน์ การที่ตะกั่วอุดตันที่บนผิวของถ่านกระดูกในคอลัมน์ คาดว่าจะเกิดจากปฏิกิริยาการตกตะกอนร่วมระหว่างตะกั่วในน้ำเสียกับไฮดรอกซีอพาไตท์ของกระดูกดังปฏิกิริยา

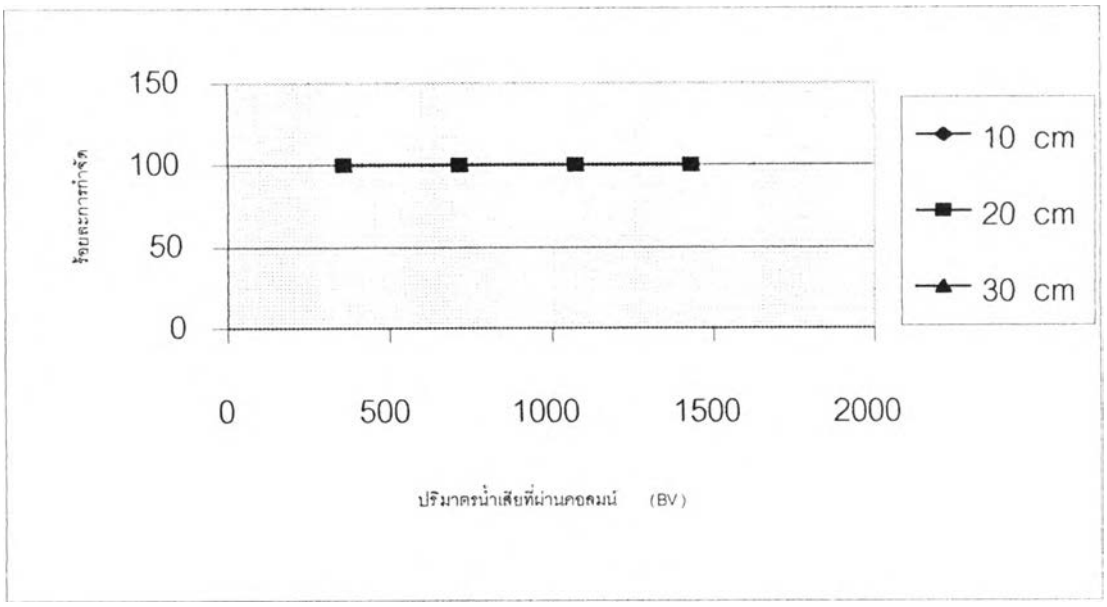
$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^+(aq) \longrightarrow 10Ca^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^-(aq) + 2H_2O(aq) \quad (1)$$

$$10M^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^-(aq) + 2H_2O\ (aq) \longrightarrow M_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^+(aq) \quad (2)$$

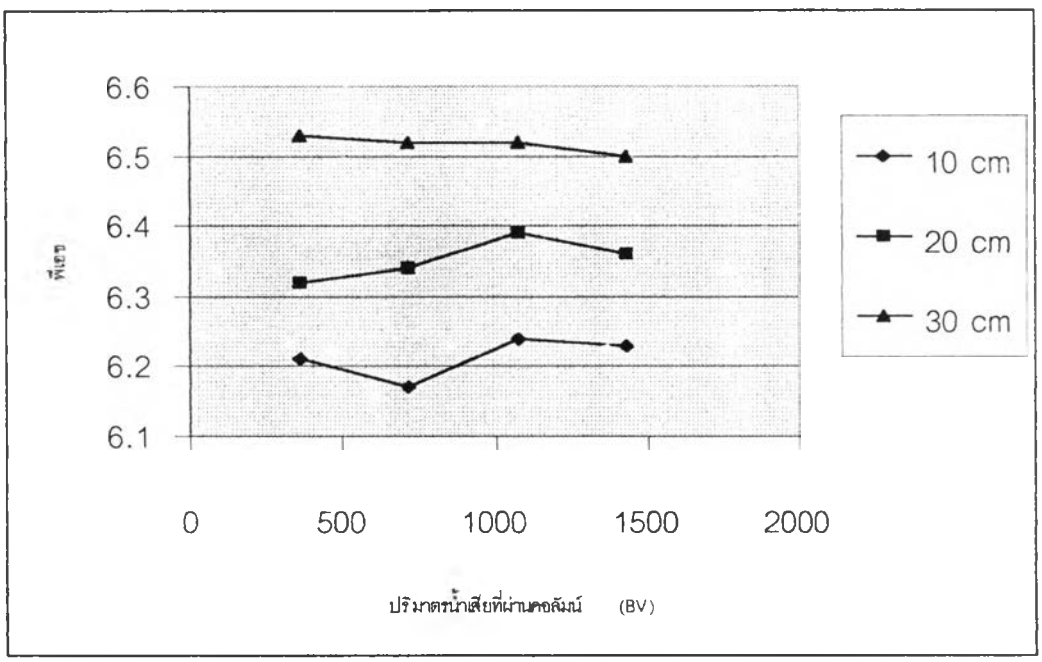
ซึ่งไม่ใช่การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ โดยยืนยันได้จากผลการทดลองชุดควบคุมแบบแบตช์ที่ปรับพีเอชน้ำเสียเท่ากับ 6 และพบว่าเกิดการตกตะกอนตะกั่วเพียงร้อยละ 4.28 ที่ความเข้มข้นตะกั่ว 10 มก./ล.

จากการศึกษาเปรียบเทียบกับการทดลองของอุบลรัตน์(2544) ซึ่งใช้เมื่อเริ่มระบบที่พีเอช 5 ก็จะเกิดปัญหาการอุดตันเช่นกัน แต่เมื่อลดพีเอชน้ำที่เข้าระบบเป็น 4 ปัญหาการอุดตันจะไม่เกิด และสามารถกรองน้ำได้ถึง 4937.14 BV คิดเป็นความสามารถในการดูดซับ 85.28 มก./ก. ถ่านกระดูก

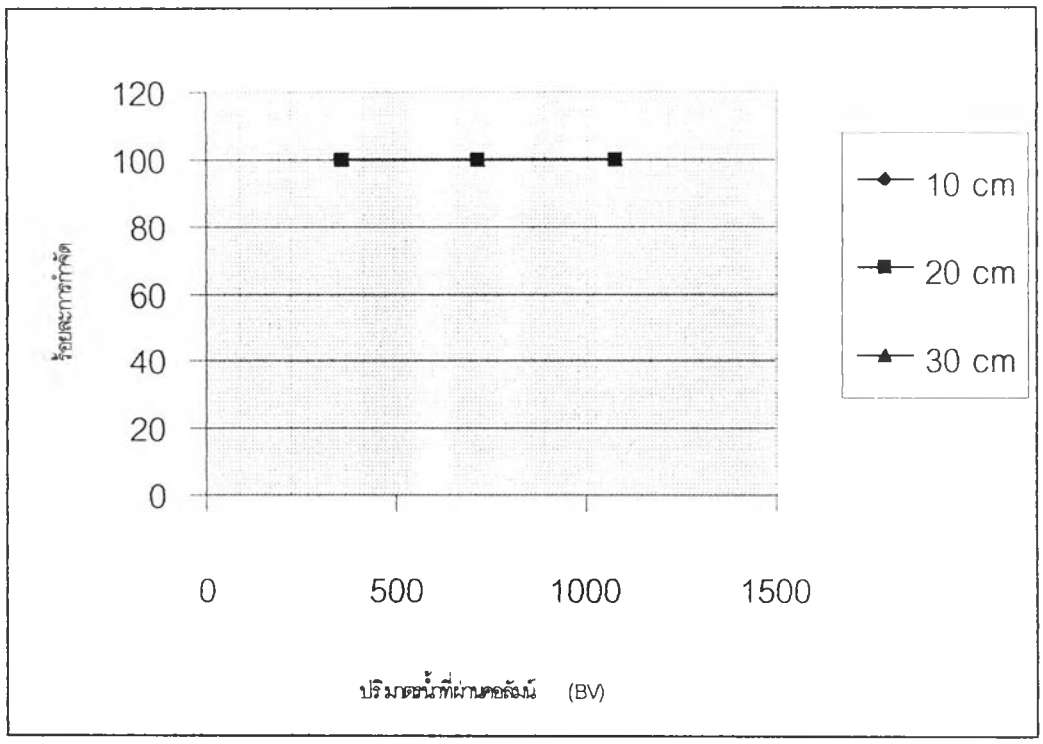
โดยรูปคอลัมน์แสดงในรูปที่ 4.41 และ รูปจุดเก็บตัวอย่างในรูปที่ 4.42



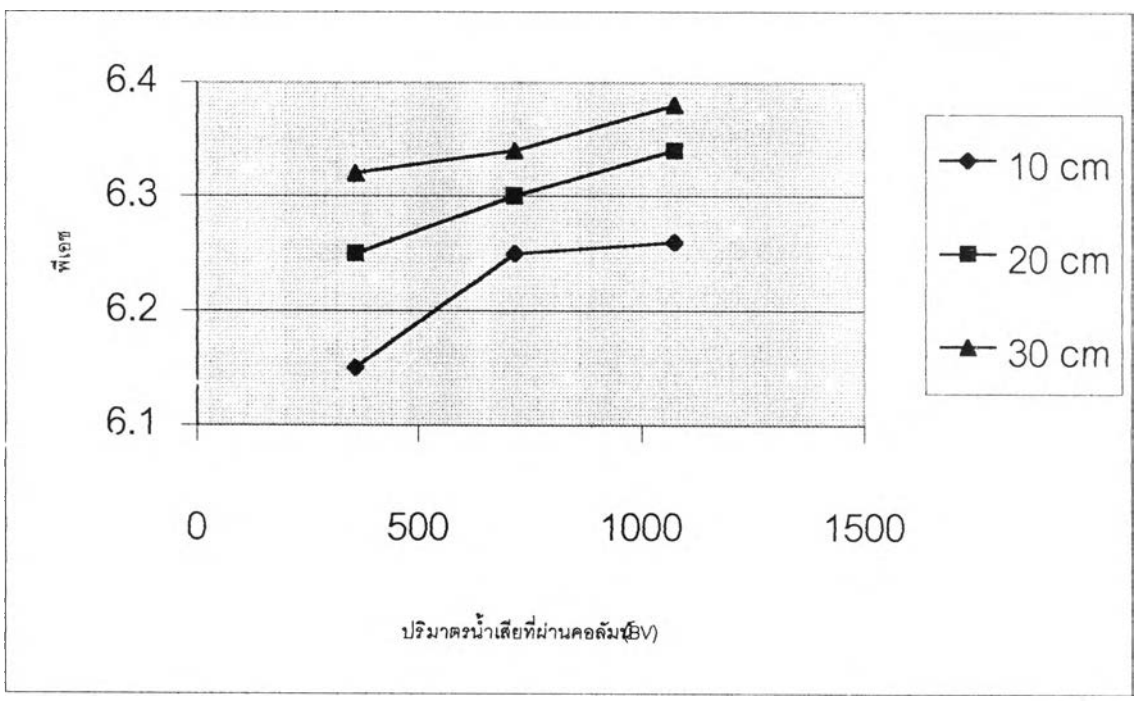
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์พีเอชน้ำเสียที่จุดเก็บต่าง ๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5



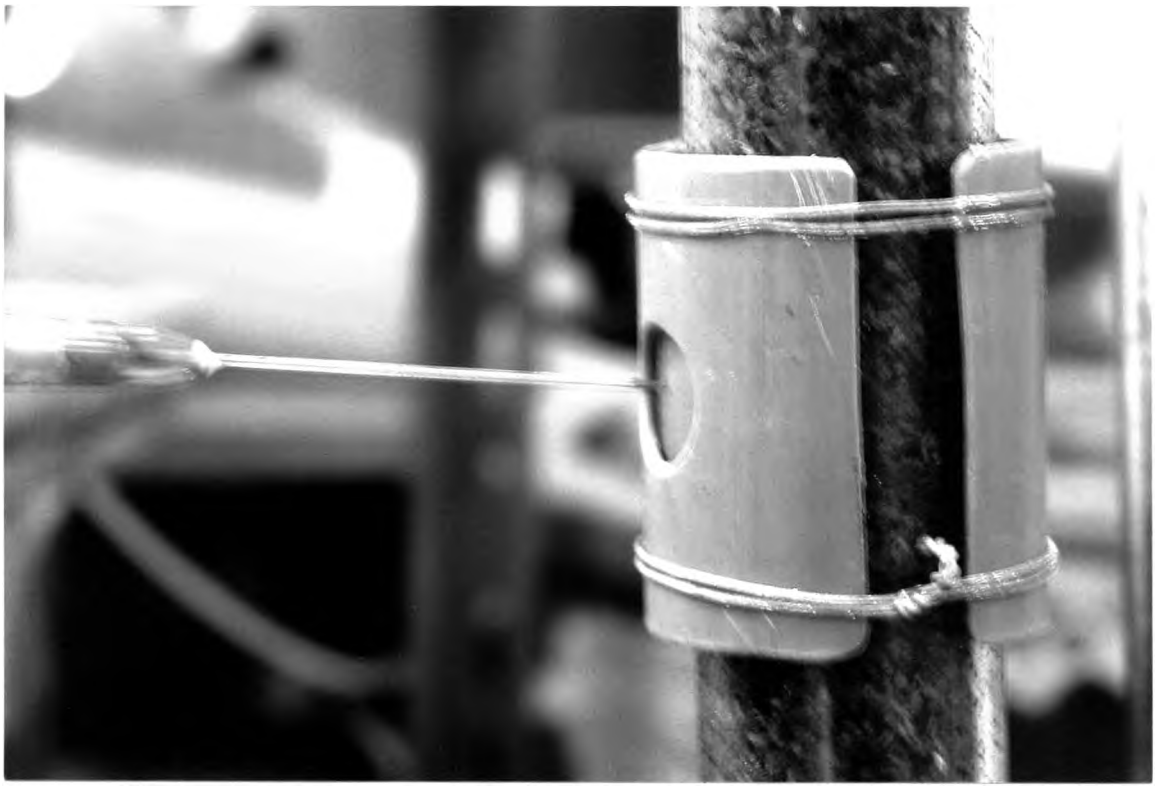
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์กับร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจริงความเข้มข้น1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์พีเอชน้ำเสียที่จุดเก็บต่าง ๆ ในน้ำเสียจริงเข้มข้น1 มก./ล. พีเอชเริ่มต้น5

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.41 รูปคอลัมน์

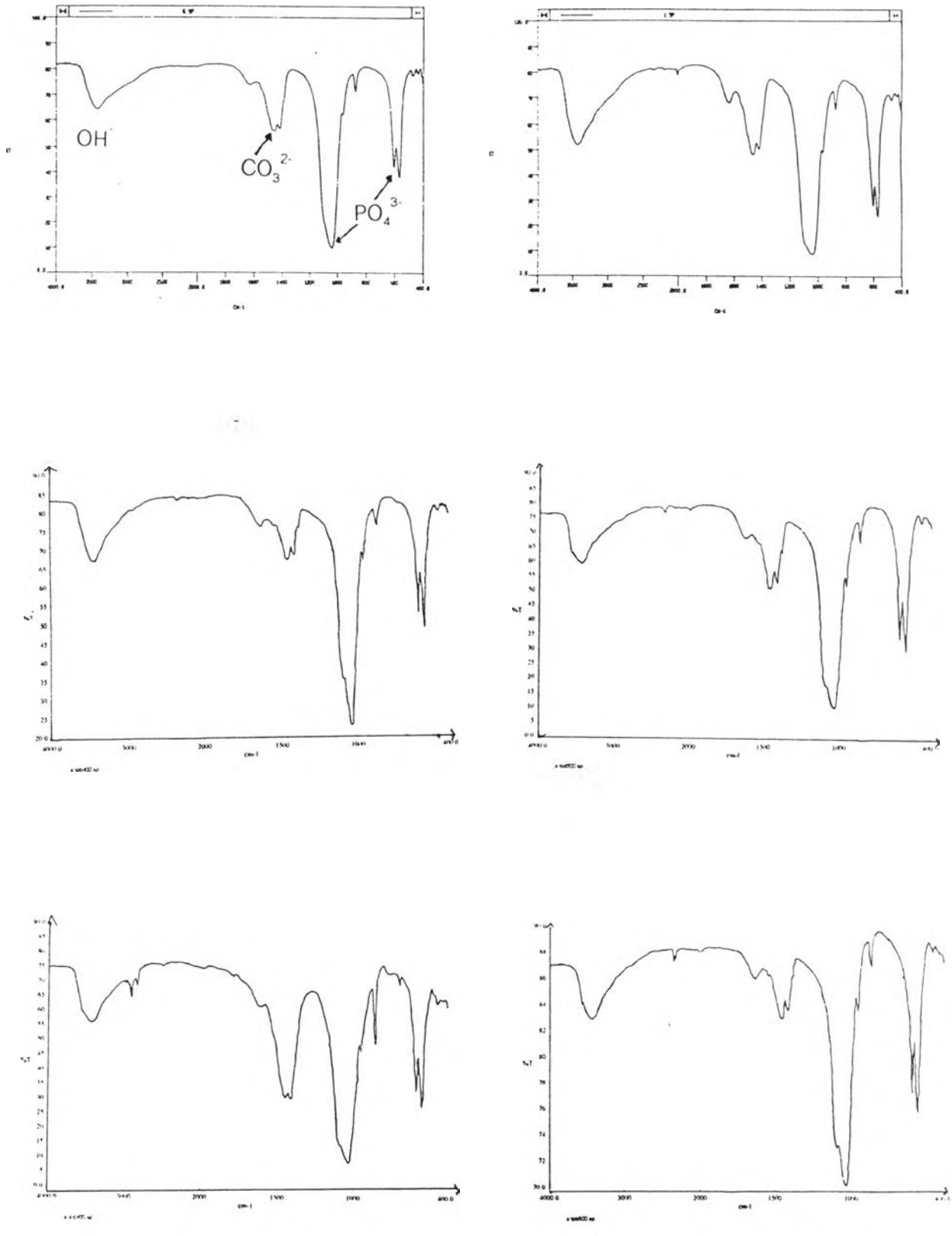


รูปที่ 4.42 จุดเก็บตัวอย่าง

4.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกหลังการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียม

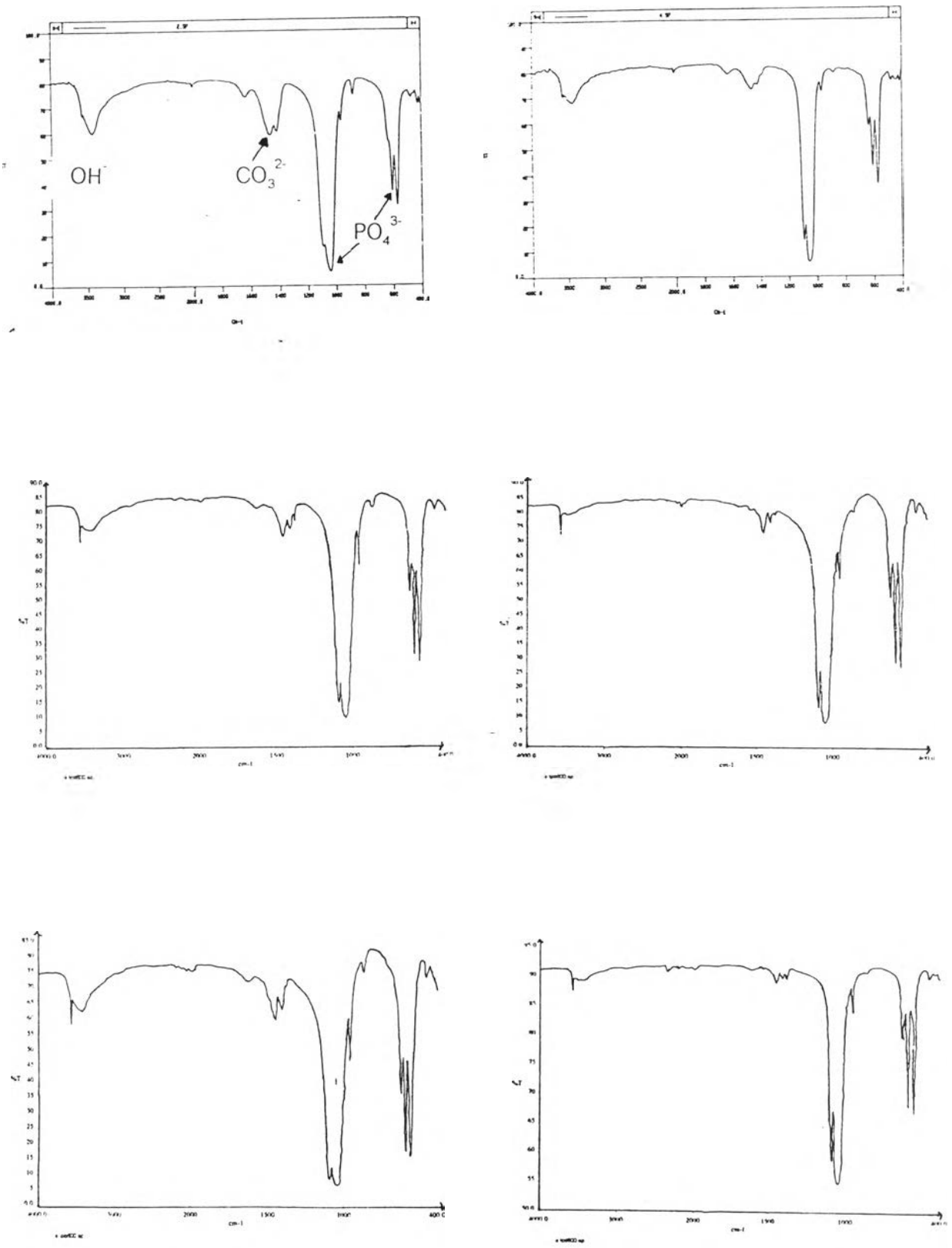
4.6.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกหลังการทดลองโดยใช้เครื่องFTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

เมื่อเปรียบเทียบรูปก่อนและหลังการทดลองกำจัดตะกั่วและแคดเมียมแล้วพบว่าองค์ประกอบที่วัดได้คล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 4.43, 4.44 และ 4.45 และพบว่าพีคของฟอสเฟตมีความคมชัดมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากตะกอนที่ตกกลับมีความเสถียรมากกว่าและแสดงว่าผลึกมีแนวโน้มที่จะจับกับฟอสเฟตมากกว่าคาร์บอนเนต



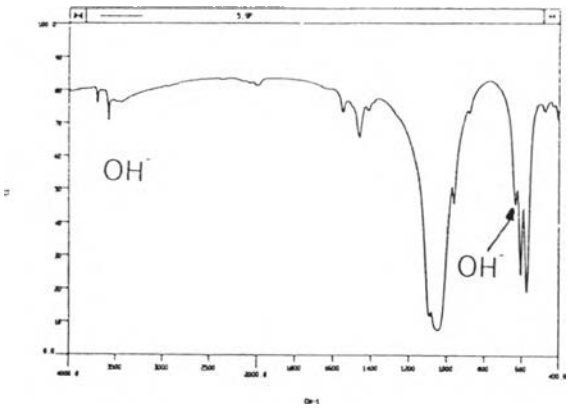
(a) (b)

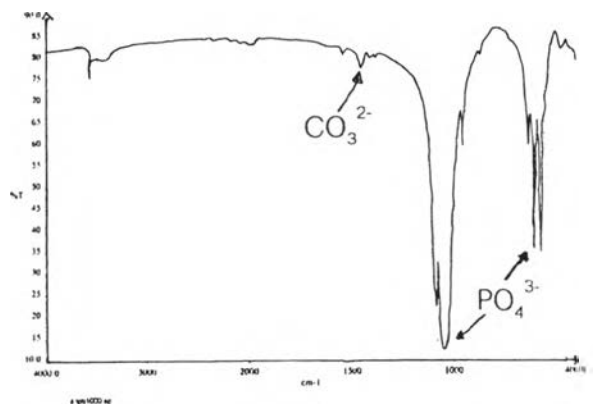
รูปที่ 4.43 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง (a) 400°C (b) 500°C

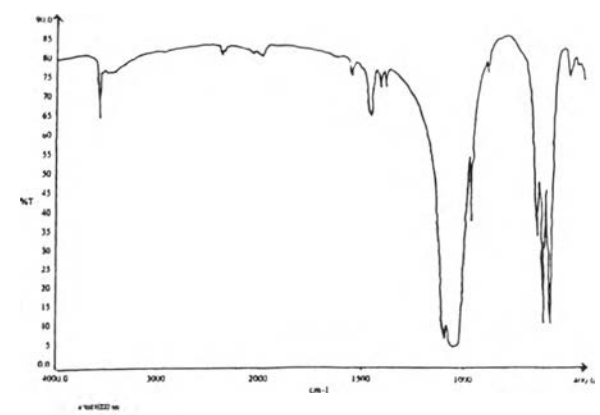


(a) (b)

รูปที่ 4.44 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง (a) 600°C (b) 800°C







รูปที่ 4.45 ผลวิเคราะห์ FTIR ของถ่านกระดูกก่อนและหลังการทดลอง 1000°C

4.6.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างวัสดุของถ่านกระดูกหลังการทดลองโดยใช้เครื่อง XRD

1) ถ่านกระดูกหลังนำไปทดลองกำจัดตะกั่ว

จากผลการศึกษาถ่านกระดูกหลังนำไปทดลองกำจัดตะกั่วที่สภาวะที่เหมาะสมได้แสดงในรูปที่ 4.46 ผลึกที่ตรวจวัดได้เกิดสารประกอบ เลดฟอสเฟสไฮดรอกไซด์ และไฮดรอกซีอพาไตท์ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดกระดูกก่อนการทดลองโดยพบว่าที่เผาที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีผลึกของไฮดรอกซีอพาไตท์ บางพีคเข้ากันได้ดีกับไฮดรอกซีอพาไตท์ที่มีตะกั่วในโมเลกุล ดังเช่นพีคของ $Pb_{10}(OH)_2(PO_4)_6$

คาร์บอเนตมาแทนที่ในตำแหน่งของฟอสเฟตทำให้พันธะของไฮดรอกซีอพาไตท์อ่อนทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้น (ดุจฤทัย พงษ์เก่า, 2537) อีกทั้งยังทำให้โครงสร้างไม่แข็งแรงละลายน้ำได้มากกว่า ปฏิกิริยาการตกตะกอนกลับจะเกิดได้ง่ายขึ้น

2) ถ่านกระดูกหลังนำไปทดลองกำจัดแคดเมียม

จากการนำถ่านกระดูกไปตรวจด้วยเครื่องXRD หลังการทดลองกำจัดแคดเมียมพบว่า ไม่สามารถหาได้เนื่องจากไม่เกิดผลึก (Amorphous) เนื่องจากเกิดการตกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ จากการศึกษาของถ้าเกิดผลึกที่สมบูรณ์จะสามารถไปตรวจสอบได้เนื่องจากจะมี 4% ซึ่งสามารถตรวจสอบจากเครื่องXRD ได้ อาจเป็นไปได้ว่าเกิดปฏิกิริยามากมายทั้งกับไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และอพาไตท์จนไม่สามารถเกิดผลึกสมบูรณ์ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Ma, Q.Y et.al.(1994) ตรวจตะกอนซึ่งคาดว่าจะมีเปอร์เซนต์แคดเมียมในผลึกอพาไตท์ 6% ก็ไม่สามารถตรวจพบได้เช่นกัน และสรุปว่าไม่สามารถเกิดอพาไตท์ในรูปแบบอื่นนอกเหนือจากแคลเซียมและตะกั่วแล้วอาจไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องมือใด ๆ Chen X. et.al. (1997) ทำการศึกษาพบว่าแคดเมียมสามารถเกิดผลึก $Cd(OH)_2$ และ $CdCO_3$ ได้ในสารละลายที่เป็นเบส (เมื่อสารละลายเริ่มต้นมีพีเอช8) ดังสมการ

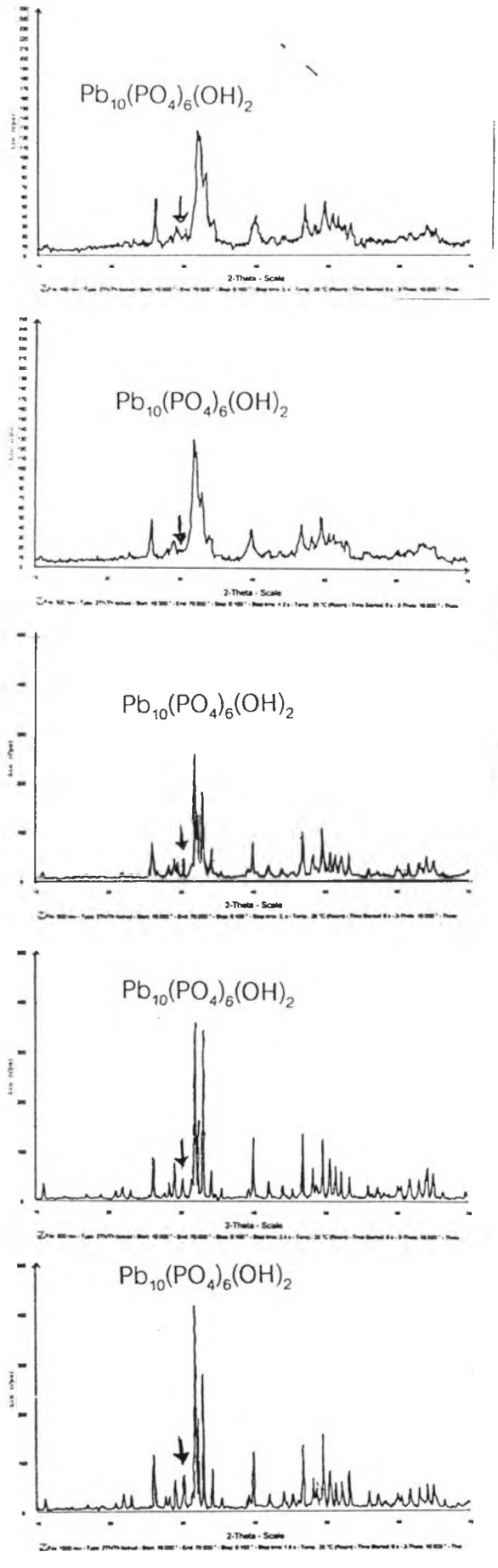
$$Cd^{2+} + HCO_3^- \longrightarrow CdCO_3(c) + H^+ \quad (3)$$

$$Cd^{2+} + 2H_2O \longrightarrow Cd(OH)_2(c) + 2H^+ \quad (4)$$

และการศึกษาของ Xu Y. et.al. (1994) ได้เสนอสมการการกำจัดดังนี้

$$xCd^{2+} + (5\text{-}x)Ca^{2+} + 3H_2PO_4^- + H_2O \longrightarrow (Cd_x,Ca_{5-x})(PO_4)_3OH + 7H^+ \quad (5)$$

$$xCd^{2+} + (5\text{-}x)Ca^{2+} + 3HPO_4^- + H_2O \longrightarrow (Cd_x,Ca_{5-x})(PO_4)_3OH + 4H^+ \quad (6)$$



รูปที่ 4.46 ผลวิเคราะห์ XRD ของถ่านกระดูกหลังการทดลอง

4.7 การคำนวณเพื่อยืนยันสมมติฐานการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกเนื่องจากการตะกอนกลับของผลึกของเลดไฮดรอกซีฟอสเฟต

สมมติฐานการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูกไว้ 3 ประการดังนี้

1. การแลกเปลี่ยนไอออน (อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ 2544)

$$Ca_{10}(PO4)_6(OH)_2(s) + xM^{2+}(aq) \longrightarrow Ca_{10-x}M_x(PO4)_6(OH)_2(s) + xCa^{2+}(aq)$$

2. การละลายของถ่านกระดูกและการตกตะกอนกลับ (Ma, Q.Y., et.al., 1994)

$$Ca_{10}(PO4)_6(OH)_2(s) + 14H^{+}(aq) \longrightarrow 10Ca^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^{-}(aq) + 2H_2O(aq)$$

$$10M^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^{-}(aq) + 2H_2O(aq) \longrightarrow M_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^{+}(aq)$$

3. การดูดติดผิว

เนื่องจากการกำจัดด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะไม่มีการลดลงของพีเอชหลังปฏิกิริยาการกำจัดซึ่งต่างจากการกำจัดด้วยวิธีตกตะกอนกลับที่มีการเพิ่ม H^+ ให้กับสารละลายทำให้พีเอชลดลงเมื่อเทียบกับการแลกเปลี่ยนไอออนโดยเนื่องจากหัวข้อ 4.2.1, 4.3.1 และ 4.3.2 เมื่อเปรียบเทียบพีเอชของน้ำหลังการกำจัดโลหะหนักแล้วจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ความเข้มข้นโลหะหนักที่มากกว่าพีเอชของน้ำหลังจากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าจึงจะตั้งสมมติฐานว่าเกิดการตกตะกอนกลับของถ่านกระดูกโดยที่จะคำนวณโดยใช้หัวข้อ 4.2.1 เนื่องจากได้ทำการเก็บน้ำเสียเป็นช่วงเวลา จากการทดลองที่ 4.2.1 ได้ซึ่งทำการทดลองที่ 10 และ 50 มก./ล.ตะกั่ว ซึ่งมีค่าความแตกต่างความเข้มข้น 40 มก./ล.(การคำนวณนี้เป็นการคำนวณคราว ๆ จึงให้การกำจัดหมดเหมือนกัน) โดยจากสมการ

$$10M^{2+}(aq) + 6H_2PO_4^{-}(aq) + 2H_2O(aq) \longrightarrow M_{10}(PO_4)_6(OH)_2(s) + 14H^{+}(aq)$$

คำนวณ H^+ ที่เกิดขึ้นโดยได้ 2.7×10^{-4} mol/l เมื่อแทนค่า M^{2+} ซึ่งเป็นตะกั่วที่ 40 มก./ล.

และจะคำนวณ H^+ เนื่องจากการทดลองที่ 4.2.1 เลือกช่วงเวลาที่กำจัดได้คงที่โดยจะเลือกค่าดังนี้

ตารางที่ ก1 และ ก4 เลือกที่เวลา 4 ชั่วโมง พีเอช 5.2 และ 5.07 ตามลำดับ
ตารางที่ ก2 และ ก5 เลือกที่เวลา 4 ชั่วโมง พีเอช 5.2 และ 5.01 ตามลำดับ
ตารางที่ ก3 และ ก6เลือกที่เวลา 6 ชั่วโมง พีเอช 5.12 และ 5.06 ตามลำดับ
ได้ค่าพีเอชเฉลี่ย 5.17 และ 5.04
โดยคิดว่าเมื่อ H^+ เกิดขึ้นแล้วจะอาศัยอยู่ใน 2 ส่วนคือ

1. อยู่เป็น H^+ ซึ่งจะลดพีเอชของสารละลายโดยตรงซึ่งเท่ากับ $10^{-5.04} - 10^{-5.17} = 1.75 \times 10^{-6}$ mol/l
2. ทำปฏิกิริยากับ CH_3COO^- เป็น CH_3COOH โดยจะคำนวณโดยใช้สูตร

$$pH - pK_a = \log[A]/[HA]$$ โดยที่ HA คือ CH_3COOH (ค่า $pK_a = 4.76$

เมื่อนำค่าคงที่ต่าง ๆ มาแทนค่าจะได้ $H^+ = 5.9 \times 10^{-4}$ mol/l เมื่อบวกกับ H^+ ในข้อ 1 จะได้ 5.92×10^{-4} mol/l

จากการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักในการกำจัดตะกั่วเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนเนื่องจากค่าทดลองจากการวัดพีเอชได้จริงเมื่อแปลงเป็นH^+ มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณอย่างคร่าว ๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการกำจัดแคดเมียมแล้วพบการลดลงของพีเอชของพีเอชหลังการทดลองแต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาใดเนื่องจากการวิเคราะห์XRD หลังการทดลองกำจัดแคดเมียมไม่พบแคดเมียมที่จับเป็นผลึกอพาไตท์

4.8 การประเมินค่าใช้จ่ายในการเผากระดูกโดยใช้เตาไฟฟ้า

ทำการทดลองโดยใช้เตาเผายี่ห้อ Carbolite รุ่น ESF 12/23 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเป็น 6 กิโลวัตต์ ซึ่งคิดเป็นราคาค่าใช้ไฟฟ้า 1.357 บาทต่อชั่วโมง และการเผา 1 ครั้งสามารถเผาได้ 0.33 กิโลกรัม จะมีค่าใช้จ่ายในการเผากระดูกต่อ 1 กิโลกรัมเท่ากับ 1.357x3 = 4.071 บาทต่อ 1 กิโลกรัม และกระดูกต้นทุนราคา 5 บาทต่อกิโลกรัม เผาแล้วเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของทั้งหมดเนื่องจากเกิดการสูญหายไปเป็นก๊าซ ฉะนั้นราคาผลิตต่อ 1 กิโลกรัม คือ (4.071+5)x2 =18.142 บาทต่อกิโลกรัม

4.9 ข้อเสนอแนะการนำถ่านกระดูกไปกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

น้ำเสียที่เหมาะกับการนำถ่านกระดูกไปกำจัดน้ำเสีย คือ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นแรกมาแล้วหรือน้ำเสียที่มีความเข้มข้นต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับราคาและคุณภาพน้ำเสียที่ได้โดยทั่วไปจะสามารถใช้ถ่านกระดูกได้ 2 ลักษณะ คือ นำไปทำเป็นผง และแบบเป็นเม็ด

โดยจากการทดลองนี้ถ่านกระดูกสามารถกำจัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้น 10 มก./ล. ได้ 100 เปอร์เซนต์ในเวลา 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเหมาะสมที่จะกำจัดน้ำเสียโดยนำถ่านกระดูกมาบดเป็นผง

การทดลองนี้ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วโดยใช้คอลัมน์ซึ่งเกิดการอุดตันขึ้นเนื่องจากเกิดการตกตะกอนของถ่านกระดูกร่วมกับตะกั่ว การใช้ถ่านกระดูกในคอลัมน์จะสามารถทำได้ถ้าได้รับการล้างย้อนบ่อยครั้งเมื่อเกิดการอุดตันหรืออาจดำเนินการโดยใช้ระบบน้ำไหลขึ้น เนื่องจากการล้างย้อนทำให้อนุภาคเรียงตัวใหม่โดยอนุภาคเล็ก ๆ จะอยู่ด้านบนและอนุภาคใหญ่ ๆ จะอยู่ด้านล่าง อีกทั้งตัวกลางยังขยายตัวเล็กน้อยด้วยการอุดตันจึงเกิดขึ้นช้าลง และจากการศึกษาของ

และจากหัวข้อ 4.5 จากการทดลองของอุบลรัตน์ไม่สามารถทดลองคอลัมน์ที่พีเอช 5 ได้เช่นกันเนื่องจากเกิดการอุดตันเมื่อเปลี่ยนพีเอชที่ทำการทดลองเป็น 4 ปรากฏว่าสามารถดำเนินระบบได้จนถึงจุดยุติโดยไม่มีการอุดตันเกิดขึ้น