การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่ว ในสารละลายโดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ

บัญชา ชวาลไชย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการ
ทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อม
โครงการบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2549

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

โครงการบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อม

ชื่อเรื่อง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่ว

ในสารละลายโดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ

โดย

บัญชา ชวาลไชย

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ ฉายบุ)

วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 49

กรรมการที่ปรึกษา ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐูปน ชื่นบาล)

วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 49

กรรมการที่ปรึกษา ศิราภรณ์ ชื่นบาล

(อาจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล)

วันที่ 23 เดือน พ.ย. พ.ศ. 49

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร ....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ ทองวิทยา)

วันที่ 20 เดือน พ.ย. พ.ศ. 49

โครงการบัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เทพ พงษ์พานิช)

ประธานคณะกรรมการโครงการบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 17 เดือน พ.ย. พ.ศ. 49

ชื่อเรื่อง	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลายโดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ
ชื่อผู้เขียน	นายบัญชา ชวาลไชย
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อม
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ ฉายบุ

บทคัดย่อ

เปลือกลำไยส่วนเกินจากการแปรรูปได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับและศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย โดยการปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง ทำให้เกิดความแตกต่างในลักษณะบางประการของเปลือกลำไย คือ ปริมาณเยื่อใย เถ้า ไขมัน ความเป็นกรด – ด่าง และขนาดของรูพรุน เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีดังกล่าวสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีที่สุดเมื่อความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 คือ 87.53 – 97.77 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 1 ชั่วโมง โดยสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม นอกจากนี้ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับ มีผลต่อการดูดซับไอออนของโลหะหนักแตกต่างกัน และการศึกษาสมดุลของการดูดซับแบบกะทำให้ทราบว่าการดูดซับของเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีดังกล่าวสอดคล้องในระดับที่ค่อนข้างสูงกับแบบจำลอง Langmiur Adsorption Isotherm โดยมีความจุสูงสุดของการดูดซับโลหะแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 5.7405, 1.2680 และ 3.5273 มิลลิกรัมของแคดเมียมต่อกรัมของสารดูดซับ และ 8.7032, 1.4766 และ 1.0075 มิลลิกรัมของตะกั่วต่อกรัมของสารดูดซับ ตามลำดับ และเมื่อทดลองกำจัดไอออนของโลหะแคดเมียมในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่า เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ ส่วนคือ เปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่างกำจัดโลหะแคดเมียมได้ไม่ต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Title	The study on the affective factors of metal ion (cadmium and lead) adsorption in aqueous solution using longan peel as adsorbent
Author	Mr. Bancha Chawanchai
Degree of	Master of Science in Agricultural Resources and Environmental Management
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Prachaub Chaibu

ABSTRACT

In this study, longan peel left-over from industrial processing was developed for use as adsorbents which also included the investigation of the adsorption properties of metal ion in aqueous solution through three methods, namely : use of dried longan peel, concentrated sulfuric acid treatment of longan peel and basic solution treatment of longan peel using different solution thus causing differences in the characteristics of longan peel such as amount of crude fiber, ash, lipid, pH and pore size. Maximum metal ion adsorption of longan peel was observed the highest (87.53 – 97.77 %) in solution with pH of 4 within an hour duration. Lead ions were more easily adsorbed by these longan peel than cadmium ions. Moreover, difference in metal adsorption by longan peel was affected by initial concentration of metal solution including the amount and size of adsorbents. On adsorption equilibrium, results showed that maximum adsorption capacity of upper longan peels for cadmium and lead ions were 5.7405, 1.2680 and 3.5273 mg Cd /g adsorbent and 8.7032, 1.4766 and 1.0075 mg Pb/g adsorbent, respectively for the three methods, which were much higher than the values of Langmuir Adsorption Isotherm model. In addition, cadmium ions removed from wastewater in the scientific laboratory under appropriate conditions, were found to be highest by using concentrated sulfuric acid to treat longan peel (88.75 %) while the use of dried longan peel and basic solution - treated longan peel were not significantly different at 84.45 and 83.75 %, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายบัญชา ชวาลไชย ขอประกาศว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาปราณีอย่างสูงของคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อันประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ ฉายบุ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน ชื่นบาล และ อาจารย์ ดร.ศิราภรณ์ ชื่นบาล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน รวมทั้งการให้อภัยในความผิดพลาด และให้โอกาสในการปรับปรุงแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ รวมทั้งกราบขออภัยในการกระทำทั้งที่ตั้งใจและไม่ตั้งใจ ต่อหน้าและลับหลังที่ข้าพเจ้าได้ล่วงเกินครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมบ่มนิสัย ประสิทธิ์ประสาทความรู้จวบจนประสบความสำเร็จด้านการศึกษาครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ พี่น้อง คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่านที่ให้ความรักความเอ็นดู สนิทสนมชอบพออย่างอบอุ่น แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งเป็นสถานที่พักพิงอันร่มเย็น เป็นอู่ข้าวอู่น้ำอันบริบูรณ์ ข้าพเจ้าขอสำนึกอย่างสุดซึ้งในองค์กรที่มีพระคุณและขอจารึกไว้ในดวงใจของข้าพเจ้าอย่างไม่มีวันลืม

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประจวบ และอาจารย์สุดปราณี ฉายบุ ที่ให้การอุปการะดูแล อบรมบ่มนิสัย เป็นห่วงเป็นใยในความเป็นอยู่ ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านด้วยความหวังดีต่อตัวข้าพเจ้ามาโดยตลอด เปรียบได้ดั่งบิดา-มารดาคนที่สองของข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่รำไพ คุณพ่อนายดาบตำรวจสมัย ชวาลไชย ที่ให้ร่างกาย จิตใจ มันสมอง และความเป็นมนุษย์ แก่ข้าพเจ้า รวมทั้งอบรม เลี้ยงดู และส่งเสียให้โอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจในการศึกษาและการดำเนินชีวิตในทางที่ถูกที่ควร ขอขอบคุณพี่น้อง คุณปู่ คุณย่า คุณตา คุณยาย และเครือญาติทุกคน ที่ร่วมแรงใจกันอดทนในความล้มเหลวในชีวิตที่ผ่านมาและตั้งตารอคอยความสำเร็จของข้าพเจ้าอย่างมีความหวังแม้ว่าจะนานเพียงใดก็ตาม อนึ่งความสำเร็จใด ๆ ที่ผ่านมาและ/หรือกำลังจะเกิดขึ้นในอนาคตอันเป็นผลมาจากการสำเร็จการศึกษาของข้าพเจ้าในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลพวงมาจากการสนับสนุนสำคัญของผู้มีพระคุณที่ข้าพเจ้าได้กล่าวอ้างถึง ณ โอกาสนี้ทั้งสิ้น

บัญชา ชวาลไชย
พฤศจิกายน 2549

สารบัญเรื่อง

หน้า

สารบัญตาราง

สารบัญภาพ

บทที่ 1

บทนำ

การขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และ อุตสาหกรรมของประเทศไทยอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน อาจก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสภาพแวดล้อม และคุณภาพชีวิตของประชาชนภายในประเทศ ถ้าหากไม่มีมาตรการจัดการและการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากที่มีการปล่อยของเสียออกสู่สภาพแวดล้อมโดยไม่มีการบำบัดให้มีคุณภาพในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมเสียก่อน โลหะหนักก็เป็นมลสารอีกชนิดหนึ่งที่ปนเปื้อนมากับของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น โรงงานชุบโลหะ เหมืองแร่ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ และอื่น ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของประชาชนเป็นอย่างมากถ้าหากถูกปล่อยออกสู่สภาพธรรมชาติ นอกจากจะปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ดินที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ก็มีโอกาสที่จะได้รับการปนเปื้อนไปด้วย และอาจมีการปนเปื้อนลงสู่น้ำใต้ดินได้อีกด้วย โลหะหนักที่มักมีส่วนเกี่ยวข้องกับการดำเนินกิจกรรมทางด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ ปรอท โครเมียม แคดเมียม และ ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งสามารถคงสภาพอยู่ได้นานในสภาพแวดล้อม และมีแนวโน้มสะสมในสิ่งมีชีวิตและเป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ หลายชนิด ดังนั้น ก่อนที่จะมีการปล่อยของเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักออกสู่สภาพแวดล้อม ควรมีการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากของเสียเหล่านั้นเสียก่อน วิธีการกำจัดโลหะหนักออกจากของเสียมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การตกตะกอน การกรอง การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับด้วยคาร์บอน หรือการใช้การตกตะกอนร่วมกับการดูดซับด้วยคาร์บอน แต่วิธีการเหล่านี้ต้องอาศัยต้นทุนในการดำเนินการที่ค่อนข้างสูง ส่งผลให้เทคโนโลยีอื่นที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะ และมีต้นทุนต่ำได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการ เมื่อไม่นานมานี้ การใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร วัสดุชีวภาพหรือของเสียจากอุตสาหกรรมบางชนิดเป็นตัวดูดซับโลหะได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย เป็นวัสดุที่ราคาถูก และมีปริมาณมาก ต้นทุนในการใช้วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการในการดัดแปลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก วัสดุที่ไม่ต้องการการดัดแปลง หรือปรับสภาพมากนักย่อมมีต้นทุนในการดำเนินการต่ำกว่าวัสดุที่ต้องอาศัยกระบวนการการดัดแปลงที่สลับซับซ้อน

จังหวัดเชียงใหม่และพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย จัดว่าเป็นแหล่งผลิตลำไยที่สำคัญของประเทศ และภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสม รวมทั้งมีการพัฒนาสายพันธุ์อยู่ตลอดเวลาทำให้ลำไยไทยมีคุณภาพดีเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ การบริโภคลำไยภายประเทศเฉลี่ยปีละ 90,000 ตันหรือประมาณร้อยละ 25 – 30 ของปริมาณที่ผลิตทั้งหมด ซึ่งความต้องการดังกล่าวยังสามารถขยายตัวได้อีก 6% (พ.ศ. 2545 –2549) ส่วนมูลค่าในการส่งออกลำไยและผลิตภัณฑ์ลำไยในภาวะปกติอยู่ระหว่าง 3 – 5 พันล้านบาท แยกเป็นลำไยสด 41% ลำไยอบแห้ง 45% ลำไยกระป๋อง 12% และแช่แข็ง 2% ซึ่งมีแนวโน้มขยายตัวได้อีก 10 % ผลผลิตลำไยส่วนใหญ่มักออกสู่ตลาดและกระจุกตัวอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม – สิงหาคม ทำให้ผลิตภัณฑ์ลำไย

ในช่วงเวลาดังกล่าวมีราคาตกต่ำ ดังนั้นการแปรรูปผลิตภัณฑ์ลำไยในเชิงอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้า วัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปไม่ว่าจะเป็นการผลิตลำไยกระป๋อง และผลิตภัณฑ์จากลำไยอื่น ๆ (เช่น ไวน์ลำไยที่กำลังได้รับการส่งเสริม) ได้แก่ เปลือก และเมล็ดลำไย ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส ลิกนิน และแทนนิน ซึ่งอุดมไปด้วยหมู่ Polyhydric phenol และ หมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ทำให้วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปลำไยเหล่านี้มีศักยภาพในการดูดซับโลหะหนัก ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาถึงศักยภาพของเปลือกลำไยในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ตะกั่วและแคดเมียม ในรูปของสารดูดซับธรรมชาติ (Adsobents) และการหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับโลหะหนักของเปลือกลำไยโดยพิจารณาถึง ผลของ pH ขนาดของตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ รวมทั้งการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ และ Adsorption Isotherm เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับแนวทางของการกำจัดโลหะหนักโดยใช้สารดูดซับต้นทุนต่ำ (Low – cost adsorbent) ที่พัฒนาจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรในท้องถิ่น

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีบางประการของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการทำแห้ง การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล

2. ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ความเป็นกรด – ด่าง ปริมาณตัวดูดซับ และขนาดของตัวดูดซับ ต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมหรือตะกั่วในสารละลาย โดยใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการทำแห้ง การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ

3. ศึกษา Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมหรือตะกั่วในสารละลายภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการทำแห้ง การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ

4. ศึกษาการกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ โดยใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการทำแห้ง การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักในรูปของสารดูดซับต้นทุนต่ำ

2. ทราบถึงความสามารถในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมของเปลือกลำไยในสารละลายที่ประกอบด้วยตะกั่วหรือแคดเมียมเพียงชนิดเดียว

3. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสม (ความเป็นกรด - ด่าง ขนาดของเปลือกลำไย และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ) ของการดูดซับโลหะตะกั่ว และแคดเมียมด้วยเปลือกลำไยในสารละลายที่ประกอบด้วยตะกั่วหรือแคดเมียมเพียงชนิดเดียว

4. ทราบถึงศักยภาพของการกำจัดโลหะหนักของเปลือกลำไยที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง กรดซัลฟูริกเข้มข้น เปรียบเทียบกับเปลือกลำไยธรรมดา (ปรับสภาพด้วยน้ำปราศจากไอออน)

5. ทำให้สามารถเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Langmiur ที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์การดูดซับโลหะแคดเมียมหรือตะกั่วในสารละลายได้

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

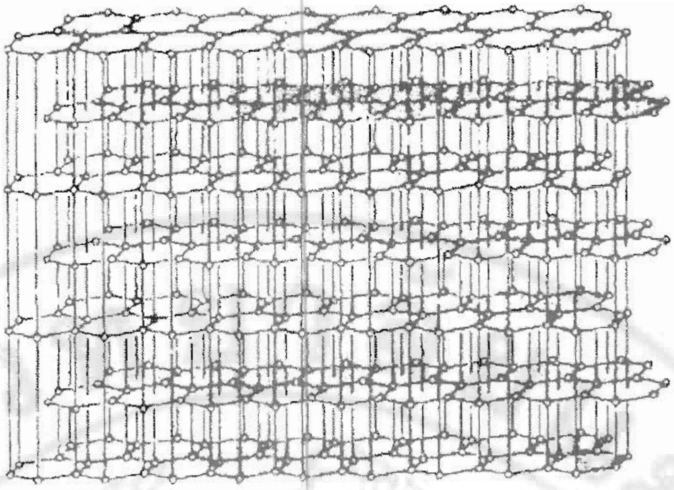
1. โลหะหนัก (Heavy Metal) (Casarett and Doull, 1980)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 ก./ลบ.ซม. มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสมและตกค้างในธรรมชาติเป็นเวลานาน เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 32 - 92 อยู่ในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักส่วนมากมีสถานะเป็นของแข็งยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวในอุณหภูมิปกติ คุณสมบัติกายภาพของโลหะหนักส่วนที่มีลักษณะคล้าย ๆ กันคือนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือมีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า จึงทำให้สามารถรวมตัวกับสารอื่น ๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบซึ่งมีความเสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยการผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร แหล่งที่มาของโลหะหนักมี 2 แหล่ง คือ จากธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรม โลหะหนักหลายชนิดเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น ปรอท แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถ่ายทอดไปตามกระแสเลือด และไปยังอวัยวะต่าง ๆ เกิดการทำลายหรือสะสมอยู่ในอวัยวะนั้น เช่น ทำให้เซลล์ของเนื้อเยื่อตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ เป็นตัวชักนำให้เกิดเซลล์มะเร็ง ทำให้เกิดความผิดปกติตั้งแต่กำเนิด และทำความเสียหายต่อโครโมโซม เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นกับ กลไก ปฏิกิริยา และปริมาณที่ได้รับ

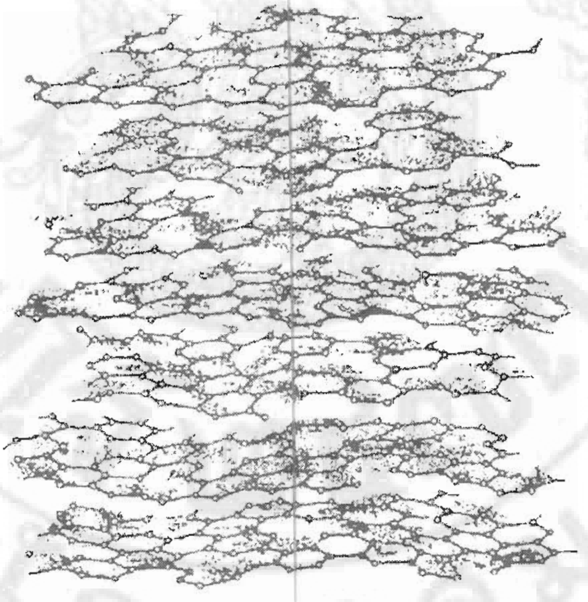
2. ถ่านกัมมันต์ (Nastrand, 1968)

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนมีลักษณะคล้ายกราไฟต์ แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีมากกว่ากราไฟต์กราไฟต์เกิดจากแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบ 6 เหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม โดยแต่ละชั้นเรียงตัวขนานกันระยะห่างระหว่างชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์กับอะตอมที่ติดกันขณะอิเลคตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างโควาเลนต์ดังแสดงในภาพที่ 1

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟต์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมากประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของคาร์บอนผสมกันเส้นผ่านศูนย์กลางของคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็ก ๆ มีขนาด 150 อังสตรอมและระยะห่างระหว่างผลึกเล็ก ๆ มีค่าเท่ากับ 20 – 50 อังสตรอม ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 1 โครงสร้างของกราไฟท์ (Faust and Aly, 1987)

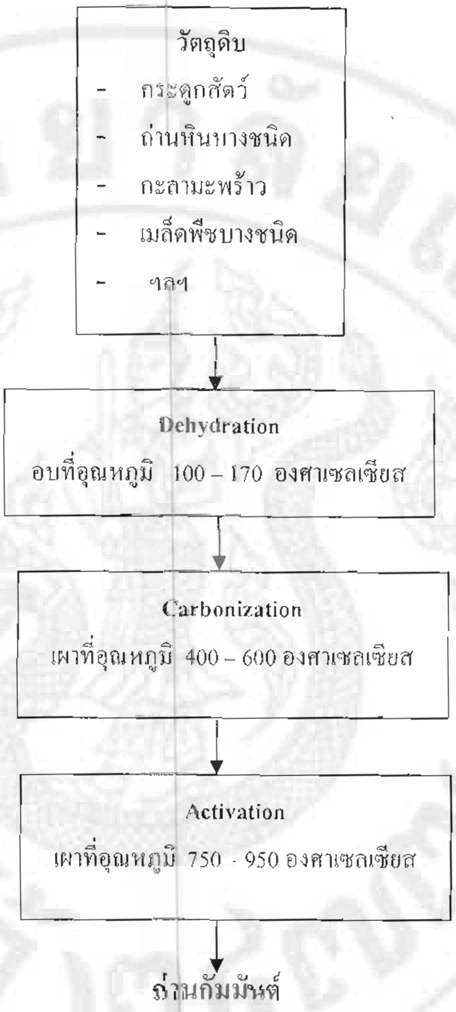


ภาพ 2 โครงสร้างถ่านกัมมันต์ (Faust and Aly, 1987)

2.1 กระบวนการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ (สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2532)

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ทำได้โดยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบเสียก่อน (Dehydration) จากนั้นจึงเผาวัตถุดิบที่แห้งให้เป็นถ่าน (Carbonization) ที่อุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส แต่คาร์บอนที่ได้ยังคงมีอำนาจการดูดติดต่ำ เนื่องจากโพรงภายในถ่านยังคงมีการอุดตันอยู่ ดังนั้นจึงต้องนำไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 750 – 950 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ทาร์ออกให้หมด เรียกกระบวนการนี้ว่า

Activation หลังจากกระบวนการนี้จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ วัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด เช่น ถ่านหินบางชนิด กะลามะพร้าว กระดูกสัตว์ เมล็ดในของผลไม้บางชนิด เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการเหล่านี้สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม มีพื้นที่ผิวประมาณ 60 – 1,000 ตร.ม.



ภาพ 3 กระบวนการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากเท่าใด ก็ย่อมมีพื้นที่สำหรับการดูดติดโมเลกุลที่ต้องการได้จำนวนมากเท่านั้นพื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ ด้วยเหตุนี้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./ก.) สูงจึงมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดติด (Adsorption capacity) สูงตามไปด้วย วิธีการวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันอาจทำได้โดยการวัด Iodine Number ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ หรืออาจวัด Molass Number ซึ่งค่า Iodine Number นี้แสดงถึงสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ ในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลเล็ก แต่ Molass Number นี้แสดงถึงสมรรถนะในการกำจัดสารที่มีโมเลกุลใหญ่

2.2 กลไกการดูดติดของถ่านกัมมันต์ (Heimenz and Rajagopolan, 1997)

การดูดติดเป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลาย หรือสารแขวนที่มีขนาดเล็กมาเกาะจับหรือติดบนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง การดูดติดนี้เป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลวก๊าซและของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว – ของเหลว ก๊าซ – ของเหลว ก๊าซ – ของแข็ง และ ของเหลว – ของแข็ง โดยในที่นี้จะขอพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว – ของแข็ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ติดที่ผิวของแข็งนี้เรียกว่า สารถูกดูดติด (Absorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะติด เรียกว่า สารดูดติด (Adsorbent)

สำหรับการดูดติดหรือการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวมายังผิวของของแข็งเกิดขึ้น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. Lyophobic of Solute คือ การไม่ชอบของเหลวของพวกตัวถูกละลาย ในกรณีที่เป็นน้ำจะเรียกว่า สารไฮโดรโฟบิก สารไฮโดรโฟบิกที่ไม่ชอบน้ำนี้ จะพยายามพาตัวเองเข้าสู่ชั้นที่อยู่ระหว่างน้ำกับของแข็งและดูดติดที่ผิวของแข็งในที่สุด

2. High Affinity of Solute to Solid คือ ความชอบของตัวถูกละลายที่ไปเกาะติดที่ผิวของสารดูดติด โดยในการเกาะติดจะมีแรงผลักดันอยู่ 3 แบบ ดังนี้

- แรงดึงดูดทางไฟฟ้า จะมีลักษณะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน โดยไอออนที่มีประจุอยู่จะสามารถไปเกาะติดที่โมเลกุลของสารอื่นได้
- แรงวัลเดอร์วาล จะมีลักษณะเป็นการดูดติดทางกายภาพโดยตัวถูกละลายสามารถที่จะติดได้อย่างอิสสระและเคลื่อนที่ได้ระหว่างพื้นผิว บางครั้งเรียกว่าเป็น การดูดติดทางอุดมคติ การดูดติดแบบนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาสามารถย้อนกลับได้หรือสามารถคายสารได้
- แรงทางเคมี มีลักษณะ คือ สารที่ถูกดูดติดจะทำปฏิกิริยากับสารดูดติด การดูดติดจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการดูดติดในลักษณะนี้พวกสารดูดติดจะติดอยู่เฉพาะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในระหว่างพื้นผิว และเป็นได้เฉพาะการดูดติดชั้นเดียวเท่านั้น

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ว การดูดติดจะเกิดขึ้นทั้ง 3 กรณี ในเวลาเดียวกัน และยากที่จะแยกได้ว่าการดูดติดที่เกิดขึ้นอยู่ในลักษณะใด

3. ขั้นตอนการดูดติดผิว (อรอนงค์, 2537)

ในระหว่างที่มีการดูดติดเกิดขึ้น โมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนถ่านกัมมันต์โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ และมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปยังถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยลง เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนถ่านกัมมันต์

โดยขั้นตอนดังกล่าวมี 4 ขั้นตอนดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย หรือการเคลื่อนที่ของสารแขวนลอยเข้าหาถ่านกัมมันต์ โดยการเคลื่อนที่จะมีลักษณะคล้ายการกรองน้ำซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้ามาติดที่ถ่านกัมมันต์ โดยโมเลกุลของสารจะเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 วิธี ดังภาพที่ 3 โดยวิธีแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian Diffusion) ส่วนวิธีที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) ขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอนในทิศทางเคลื่อนที่เข้าหาถ่านกัมมันต์ได้ ขนาดและการกระจายของขนาดของสารเคมีมีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายเป็นอย่างมาก เมื่อพิจารณาจากภาพ ถ้าขนาดของสารเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกับขนาดซึ่งก็คือ การแพร่กระจายทำให้สารขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้มากกว่าและมีโอกาสวิ่งเข้าถ่านกัมมันต์ได้มากกว่าสารขนาดใหญ่ แต่เมื่อขนาดมากกว่า 1 ไมครอน จะมีการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลน้อยมาก ขนาด และน้ำหนักของสารจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตกตะกอนหรือติดค้าง (Sedimentation) ดังนั้น ประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายจึงแปรผันตรงกับขนาดของสารดังภาพที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากสารที่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากและมีปริมาตรจึงสามารถตกตะกอนและติดค้างบนถ่านกัมมันต์ได้ง่าย โดยเมื่อพิจารณาจากที่กล่าวมา สารที่มีขนาด 1 ไมครอน กำจัดได้ยากกว่าสารขนาดอื่นในลักษณะการกำจัดโดยวิธีการกรอง

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการแพร่ในฟิล์ม (Film Diffussion) เมื่อโมเลกุลของสารเคลื่อนที่เข้ามาถึงถ่านกัมมันต์ ซึ่งโดยปกติถ่านกัมมันต์นี้จะมีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ โมเลกุลจะต้องทำการแทรกตัวผ่านฟิล์มของน้ำให้ได้จึงจะเข้าไปถึงผิวถ่านกัมมันต์ได้

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการแพร่ในรู (Pore Diffusion) เนื่องจากสาเหตุที่ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโพรง หรือ ช่องว่างภายในโมเลกุลของสารถูกดูดติดจะต้องแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ให้ได้ จึงจะมีการดูดติดเกิดขึ้น

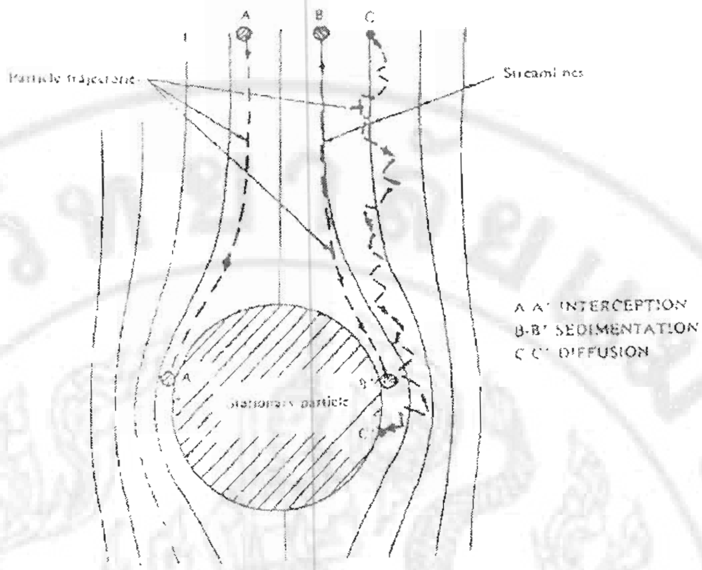
ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารถูกดูดติดจะต้องเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ได้โดยไม่หลุดออกไป จึงจะถือว่าเกิดการดูดติดอย่างสมบูรณ์

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติด (อรอนงค์, 2537)

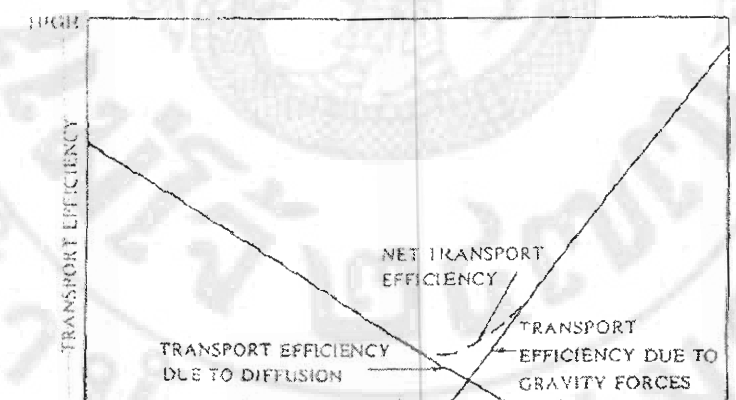
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดของถ่านกัมมันต์มีดังต่อไปนี้

4.1 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดติดอาจขึ้นกับการแพร่ในฟิล์ม หรือการแพร่ในรู ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบถ่านกัมมันต์จะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเหป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาถ่านกัมมันต์ทำให้การแพร่ในฟิล์มเป็น



ภาพ 4 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์ (Yao, 1971)



ภาพ 5 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยที่ขึ้นกับขนาด

ตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดโดยเฉพาะในกรณีของถ่านกัมมันชนิดเม็ด ซึ่งมีความปั่นป่วนของน้ำต่ำ จะพบว่าความหนาของฟิล์มน้ำจะมีผลต่ออัตราเร็วของการดูดติดของถ่านกัมมันต์เป็นอย่างมาก

4.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

อัตราเร็วในการดูดติดของถ่านกัมมันต์จะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ แต่ก็ไม่มีผลเท่ากับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดติด กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากก็จะดูดติดได้มาก กว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย แต่อย่างไรก็ตามเฉพาะพื้นที่ผิวอย่างเดียวไม่สามารถที่จะให้เหตุผลสำหรับอธิบายความสามารถในการดูดติดของสารทุกชนิดได้ เพราะขนาดของพื้นที่ผิวจะหามาจาก รูที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ กรณีที่สารถูกดูดติดมีขนาดใหญ่กว่ารู จะทำให้พื้นที่ผิวของรูขนาดเล็กเกินกว่าที่สารถูกดูดติดจะเข้าไปได้ไม่มีประโยชน์ต่อการดูดติดแต่อย่างใด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งขนาดพื้นที่ผิวและการกระจายของขนาดของรู ซึ่งเป็นผลจากชนิดของวัสดุที่ใช้สังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ และกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ชนิดของวัสดุและกรรมวิธีในการผลิตถ่านกัมมันต์ยังมีผลต่อลักษณะทางเคมีของพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดติด

4.3 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์

เมื่อมีการดูดติดเกิดขึ้น โมเลกุลของสารละลายก็จะถูกดึงออกจากน้ำ และไปเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ สารที่ละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำอย่างเหนียวแน่นจึงยากต่อการดูดติด ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย ก็มักจะเกาะติดกับผิวของถ่านกัมมันต์ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นก็มิได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้มีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวคาร์บอนได้ยาก แต่ในทางตรงกันข้ามการดูดติดอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกับสารที่ละลายน้ำได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวอย่างชัดเจนได้ว่า มีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดติดและความสามารถในการละลายน้ำ

4.4 ขนาดของสารถูกดูดติด

ขนาดของสารถูกดูดติดมีอิทธิพลต่อการดูดติดบนถ่านกัมมันต์ ซึ่งการดูดติดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะพบว่าการดูดติดจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อขนาดของสารถูกดูดติดมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (สามารถเข้าไปในโพรงได้พอดี) เพราะจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดติดกับถ่านกัมมันต์ที่มีค่ามากที่สุด โดยทั่วไปแล้วโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในโพรงก่อน หลังจากนั้นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าก็จะถูกดูดตามเข้าไป

4.5 พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงมีผลต่อการดูดติดของถ่านกัมมันต์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องของการละลายน้ำว่าส่วนใหญ่แล้วถ้าสารละลายน้ำได้ดีจะถูกดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์ได้ยาก ถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดได้ทั้งสารที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวและสารที่อยู่ในรูปไอออน แต่สารที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัวจะถูกดูดติดได้ดีกว่าในรูปไอออนผลของพีเอช

ที่มีต่อการดูดติดเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสารดูดติดและสารถูกดูดติด ถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดได้ทั้งกรด (H^+) หรือเบส (OH^-) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผิวเมื่อพีเอชสูงกว่าค่า pH_{zpc} ความสามารถในการดูดติดจะลดลง เนื่องจากมีแรงผลักระหว่างไอออนลบและผิวของถ่านกัมมันต์หรือระหว่างไอออนลบด้วยกันเอง ประจุลบของผิวของคาร์บอนอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการดูดติดไอออนไฮดรอกซิลบนผิว หรือเกิดไอออนในเซชั่นของกลุ่มฟังค์ชั่นกรดอ่อนบนผิวของถ่านกัมมันต์หรือเกิดทั้งสองกรณี

4.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็ว และขีดความสามารถในการดูดติด คือ อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถของการดูดติดจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

4.7 ความเข้มข้น

ความเข้มข้นของสารละลายมีอิทธิพลต่อการดูดติดบนผิวถ่านกัมมันต์โดยสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้อัตราเร็วของการดูดติดผิวสูงตามไปด้วย

5. สมดุลของการดูดติด (Marinsky, 1966)

การดูดติดของสารละลายบนผิวของถ่านกัมมันต์ ในขณะที่เกิดการดูดติดไปเรื่อย ๆ นี้ สารที่ถูกดูดติดก็มีแนวโน้มที่จะถูกคายกลับสู่สารละลายได้เหมือนเดิม ความเข้มข้นของสารละลายจะเปลี่ยนแปลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดของสารละลายที่ถูกดูดติด และถูกคายกลับออกมาจากการดูดติดก็จะมีปริมาณเท่า ๆ กัน ผลที่เกิดตามมาก็คือ อัตราการดูดติด และอัตราการคายสารก็จะถึงจุดสภาวะสมดุล ซึ่งเรียกว่าสมดุลของการดูดติด คดยที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายบนผิวของถ่านกัมมันต์ หรือความเข้มข้นของตัวสารละลายเอง การเพิ่มปริมาณสารที่ถูกดูดติดจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย และการแสดงจำนวนสารละลายที่ถูกดูดติดต่อจำนวนของถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิคงที่จะเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดติด (Adsorbtion Isotherm)

ระบบการดูดติดได้ถูกวิเคราะห์ด้วย วิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้รูปของสมการอย่างง่ายแล้วนำสมการมาเขียนกราฟเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่าง ๆ อันเป็นแนวทางที่นำมาใช้ในการคำนวนออกแบบระบบดูดติดซึ่งได้มีผู้เขียนสมการเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายลักษณะข้อมูลของการดูดติดไว้หลายสมการแต่ที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ Langmiur Adsorption Isotherm และ Freundlich Adsorption Isotherm

5.1 Langmiur Adsorption Isotherm บางครั้งเรียกว่า Ideal localized monolayer Model มีสมมติฐานที่สำคัญดังนี้

- มีพื้นที่ในการดูดติดอย่างจำกัด โมเลกุลที่ถูกดูดติดที่ผิวของสารดูดติดจะอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

- แต่ละตำแหน่งที่ดูดติดผิวจะมีเพียง 1 โมเลกุลเท่านั้น หรือกล่าวได้ว่ามีการดูดติดเพียงครั้งเดียว
- ตรงบริเวณดูดติดจะเกิดการดูดติด และการคายสารออก โดยอัตราการดูดติดจะมีมากกว่าอัตราการคายสารออกจนกระทั่งถึงภาวะสมดุล (อัตราการดูดติดเท่ากับอัตราการคายสารออก) และพลังงานในการดูดติดมีค่าเท่ากันทุก ๆ ตำแหน่ง

นอกจากนี้ โมเลกุลที่ถูกดูดติดยังไม่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาอย่างอิสระระหว่างพื้นที่ผิวหรือทำปฏิกิริยากันกับโมเลกุลอื่นที่อยู่ใกล้ได้

สมการของ Langmuir เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X/M = \frac{abC_e}{1 + bC_e}$$

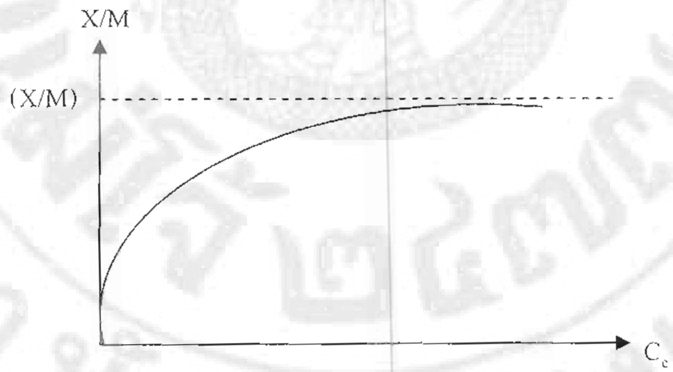
X = ปริมาณของสารถูกดูดติด (มก.)

M = ปริมาณสารดูดติด (ก.)

a = ค่าคงที่ความจุการดูดติดชั้นเดียว (มก./ก.)

b = ค่าคงที่ (ล./มก.)

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดติด

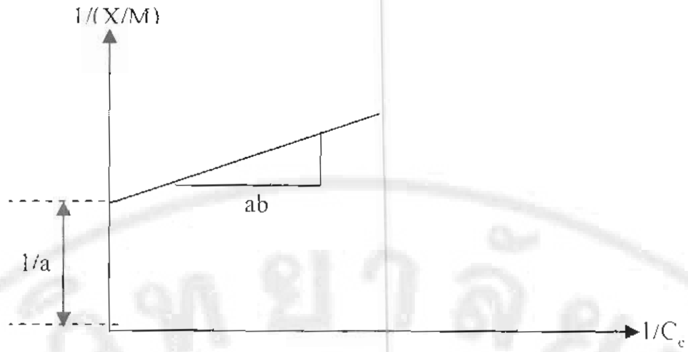


ภาพ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง X/M และ C_e

จากสมการ สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{1}{X/M} = \frac{1}{abC_e} \qquad \frac{1}{a}$$

จากสมการเมื่อนำ $\frac{1}{X/M}$ และ $\frac{1}{C_e}$ มาเขียนกราฟสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้



ภาพ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/(X/M)$ และ $1/C_e$

ส่วนสมการของ Langmiur ที่ใช้ในการทำนายการดูดติดแบบมีมลสารหลายชนิดในน้ำเสีย (Multi – component) ซึ่งนิยมเรียกว่า (Extended – Langmiur) แสดงดังสมการ

$$(X/M)_i = \frac{a_i b_i C_{ei}}{1 + \sum_{j=1}^{m} b_j C_{ej}}$$

X_i = ปริมาณของสาร i ที่ถูกดูดติด (มิลลิกรัม)

M = ปริมาณสารดูดติด (กรัม)

a_i , b_i = ค่าคงที่ของสมการ Langmiur ซึ่งหาได้จากการดูดติดแบบมีมลสารชนิดเดียวในน้ำเสีย (Single – solute system)

C_{ei} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสาร i ที่ถูกดูดติด

m = จำนวนมลสารที่อยู่ในระบบ

5.2 Freundlich Adsorption Isotherm จัดว่าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้กันมากสมการหนึ่งในการอธิบายการดูดติดในระบบของเหลว สมการของ Freundlich เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$X/M = KC_e^{1/n}$$

X = ปริมาณของสารถูกดูดติด (มิลลิกรัม)

M = ปริมาณของสารดูดติด (กรัม)

K = ค่าคงที่ความจุการดูดติด (มิลลิกรัม / กรัม)

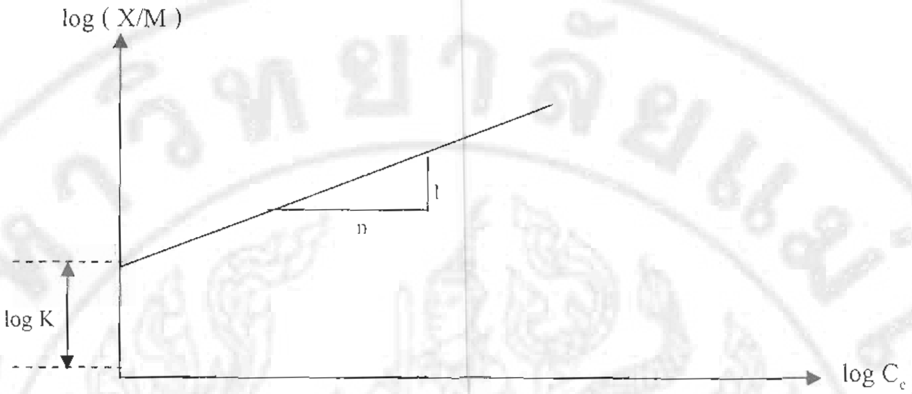
n = ค่าคงที่

C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดติด

จากสมการข้างต้นนำมาเขียนในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log (X/M) = \log K + (1/n) \log C_e$$

จากสมการเส้นตรงดังกล่าวเมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log (X/M) และ log C_e จะได้กราฟเส้นตรงดังนี้



ภาพ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log (X / M) และ log C_e

สมการของ Freundlich นี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาปริมาณของสารดูดติดหรือถ่านกัมมันต์ที่ต้องการใช้ในการลดค่าความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวได้ โดยแทนค่า X ในสมการเส้นตรงข้างต้นด้วยค่า (C_0 - C_e) โดยที่ค่า C_0 คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายในของเหลว ดังนี้

$$\log (C_0 - C_e) / M = \log K + (1/n) \log C_e$$

สมการข้างต้นนี้มีประโยชน์อย่างมากในการนำไปใช้เปรียบเทียบค่าความสามารถในการกำจัดสารต่าง ๆ ของสารดูดติดหรือถ่านกัมมันต์ทั้งที่เป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน ส่วนสมการของ Freundlich ที่ใช้ในการทำนายการดูดติดแบบมีมลสารหลายชนิดในน้ำเสีย (Multi - component) ซึ่งนิยมเรียกว่า Extended – Freundlich ได้แก่สมการดังต่อไปนี้

$$(X / M)_i = \frac{n(K_i/n_i)^{1/ni} C_{ei}}{((K_i / n_i)^{1/ni} C_{ei} + (K_j / n_j)^{1/nj} C_{ej})^{1-n}} + \Delta F_2$$

$$\Delta F_2 = \frac{(ni - nj)((K_i/n_i)^{1/ni} C_{ei})}{((K_i / n_i)^{1/ni} C_{ei} + (K_j / n_j)^{1/nj} C_{ej})^{2-n}} \times \ln (((K_i/n_i)^{1/ni} C_{ei})((K_j/n_j)^{1/nj} C_{ej}))$$

$$n = \frac{n_i (K_i/n_i)^{1/ni} C_{ei} + n_j (K_j/n_j)^{1/nj} C_{ej}}{(K_i/n_i)^{1/ni} C_{ei} + (K_j/n_j)^{1/nj} C_{ej}}$$

X_i = ปริมาณของสาร i ที่ถูกดูดติด (มิลลิกรัม)

M = ปริมาณของสารดูดติด (กรัม)

K_i, n_i = ค่าคงที่ของสมการ Freundlich ซึ่งหาได้จากการดูดติดแบบมีมลสารชนิดเดียวในน้ำเสีย (Single–solute system)

C_{ei} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสาร i ที่ถูกดูดติด

C_{ej} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสาร j ที่ขัดขวางการดูดติดสาร i

6. ศักยภาพในการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์

เมื่อพิจารณาบนพื้นฐานของขนาดและรูปร่างของถ่านกัมมันต์สามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดเส้นใย (ACF) ถ่านกัมมันต์ชนิดแผ่น (ACC) ขึ้นกับความแตกต่างของแหล่งวัตถุดิบ การกระตุ้นทางเคมี และลักษณะทางเคมี – กายภาพ ซึ่งถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดมีการนำไปใช้ประโยชน์ที่จำเพาะเจาะจงแตกต่างกันออกไปขึ้นกับข้อดีข้อเสียในการบำบัดน้ำเสีย ถึงแม้ว่าสารดูดซับต้นทุนต่ำจะถูกค้นพบเป็นจำนวนมากเท่าใด แต่ปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเพื่อการค้าก็ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และนักวิจัยจำนวนมากก็ยังคงศึกษาถึงการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ปรอท ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม แคดเมียม นิเกิล สังกะสี และลิเทียม ตามลำดับ ปัจจุบันราคาถ่านกัมมันต์เกรดอุตสาหกรรมที่มีการซื้อขายกันในท้องตลาดนั้นมีค่าค่อนข้างสูง (ประมาณ 20 – 22 ดอลลาร์สหรัฐฯต่อกิโลกรัม) ขึ้นกับคุณภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดนั้น ๆ (CSIRO, 2002) และถ่านกัมมันต์ต่างชนิดกันย่อมมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้แตกต่างกัน ในปี ค.ศ. 1984 มีการรายงานถึงผลการศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดปรอทโดยถ่านกัมมันต์ชนิดผง 2 ชนิด คือ Nucha SA และ SN ว่าสามารถกำจัดปรอทจากสารละลายปรอท (0.2 มิลลิโมลาร์) ได้ถึง 99 –100% ที่ระดับ pH 4.0 – 5.0 และงานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งที่คล้าย ๆ กันได้ทำการเปรียบเทียบปรากฏการณ์การดูดซับของโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ทองแดงและโคบอลท์ จากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) (Netzer and Hughes, 1984) พบว่า ความจุของการดูดซับโลหะสองชนิดโดยถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า (CAC) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ pH 4.0 GAC สามารถกำจัดโคบอลท์จากสารละลายโคบอลต์ 10 พีพีเอ็ม ได้ถึง 99 % ส่วนทองแดงสามารถกำจัดได้ 93% ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน นอกจากนี้ Reed and Arunachalam (1994) ได้ศึกษาถึงการใช้ GAC ในการกำจัดตะกั่ว และพบว่าความจุของการดูดซับตะกั่วของถ่านกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 30 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และปริมาณตะกั่วที่ไม่ถูกกำจัดมีค่าสอดคล้องกับปริมาณที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA การใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัดโครเมียม (Cr^{6+}) ก็เป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่มีการศึกษากันอย่างเข้มข้นในช่วงเวลาไม่นานมานี้ ในปี ค.ศ. 1995 Candela et al. ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ที่สังเคราะห์

จากวัตถุดิบต่างชนิดกัน ได้แก่ หนัง เปลือกมะกอก และเปลือกอัลมอนด์ พบว่ากระบวนการดูดซับนั้นขึ้นกับวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นของถ่านกัมมันต์และถ่านกัมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกระบวนการทางกายภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด และที่ pH 1.0 พบว่าปริมาณโครเมียมในระบบมีผลต่อการกำจัดโครเมียมของถ่านกัมมันต์ด้วย ส่วนในปี ค.ศ. 1996 Charma และ Forster ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมออกจากสารละลาย (Cr^{6+}) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (GAC) ชนิด Filtrasorb 400 พบว่าค่าความจุของสารดูดซับดังกล่าวเท่ากับ 145 มิลลิกรัมของโครเมียมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ ที่ระดับ pH 2.5 – 3.0 แต่ผลการทดลองดังกล่าวกลับไม่สอดคล้องกับผลการทดลองการศึกษาที่คล้าย ๆ กันในเวลาต่อมา โดย Han et al. (2000) ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับโครเมียมของถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือ LB 830 และ Filtrasorb 400 และพบว่าความจุของการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 มีค่าเพียง 0.18 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ เท่านั้น

7. สารดูดซับต้นทุนต่ำ

วัสดุธรรมชาติหรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการเกษตรหลายชนิด มีความจุของการดูดซับโลหะหนักที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ยังมีราคาถูกและเหมาะที่จะนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปของสารดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมบางประเภท ในช่วงเวลาที่ผ่านมาของเสียจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเกษตรส่วนใหญ่ถูกนำไปกำจัดโดยการเผาและทำปุ๋ยหมัก ต่อมาได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่รายงานถึงศักยภาพของสารดูดซับต้นทุนต่ำที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติและของเสียจากอุตสากรรมบางประเภท เช่น ลิกนิน เปลือกไม้ เปลือกหุ้มลำตัวของสัตว์ทะเล เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานถ่านหิน และซากผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น สารดูดซับต้นทุนต่ำเหล่านี้มีศักยภาพสูงในการดูดซับโลหะหนักหลายประเภท ได้แก่ โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว และปรอท ดังนี้ 1,587 มิลลิกรัมปรอทต่อกรัมลิกนิน 1,123 มิลลิกรัมปรอทต่อกรัมไคโตซาน 92 มิลลิกรัมโครเมียมต่อกรัมไคโตซาน 215 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมสาหร่ายทะเล เป็นต้น (Bailey et al., 1999)

7.1 เปลือกไม้และวัสดุที่มีปริมาณแทนนินสูง

เปลือกไม้เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเนื้อไม้ และจัดเป็นวัสดุที่มีปริมาณแทนนินสูงประเภทหนึ่ง หมู่ฟังก์ชัน Polyhydroxy และ Polyphenol ของแทนนินเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีศักยภาพในกระบวนการการดูดซับ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของโลหะหนักจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Phenolic hydroxy group ของแทนนินเกิดเป็น สารประกอบ Chelate (Randall et al., 1974 ; Vazquez et al., 1994) แต่ปัญหาหนึ่งของของวัสดุที่มีแทนนินเป็นองค์ประกอบคือการกำจัดสีที่เกิดจากสารประกอบฟีนอลพวกที่สามารถละลายน้ำ ซึ่งสามารถทำได้โดยการบำบัดขั้นต้นด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น Acidified formaldehyde (Vazquez et al., 1994) และวิธีการบำบัดโดยใช้กรด เบส หรือ ฟอร์มาลดีไฮด์นั้น (Alves et al., 1993) สามารถกำจัดสีที่ไม่พรึงประสงค์ออกไปได้

โดยไม่มีผลต่อค่าความจุของการดูดซับของวัสดุแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามการบำบัดขั้นต้นเหล่านี้อาจก่อให้เกิดต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เป็นวิธีที่มีความจำเป็นสำหรับการควบคุมสีที่เกิดจากวัสดุดังกล่าว ส่วนวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่มีปริมาณแทนนินสูงชนิดอื่น ๆ ที่ถูกนำมาทดสอบใช้เป็นสารดูดซับโลหะหนักนั้น Orhan and Buyukgungor (1993) ได้ทำการทดสอบการดูดซับโลหะหนักของเปลือกถั่วบางชนิด กากชา และกาแฟเพื่อเปรียบเทียบความจุของการดูดซับโลหะหนักกับถ่านกัมมันต์ พบว่า ความจุของการดูดซับโลหะหนักของซากวัสดุจากการเกษตรมีค่าต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีราคาสูงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ Bryant et al. (1992) ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดซับทองแดง และเฮกซะวาแลนซ์โครเมียมของเปลือก Red firsawdust ว่าโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดจะถูกดูดซับไว้ในเปลือกไม้ตรงบริเวณที่มีลิกนินหรือแทนนินเป็นองค์ประกอบก่อนบริเวณที่เป็นโครงสร้างเซลลูโลสของเปลือก Sawdust

7.2 ลิกนิน

Srivastava et al. (1994) ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่วและสังกะสีโดยลิกนินที่สกัดจากน้ำเสียที่ซื้อมาจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษในราคาตันละ 1 ดอลลาร์สหรัฐฯ และมีต้นทุนในการสกัดลิกนินจากน้ำเสีย 60 ดอลลาร์สหรัฐฯต่อตัน ซึ่งมีต้นทุนที่ต่ำกว่าต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ต้องสูญเสียต้นทุนถึง 100 ดอลลาร์สหรัฐฯต่อตัน พบว่าความจุของการดูดซับโลหะสองชนิดของลิกนินที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1.587 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมลิกนิน และ 73 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมลิกนิน และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น 1,865 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมลิกนิน และ 95 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมลิกนิน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความจุของการดูดซับโลหะของลิกนินที่ค่อนข้างสูงนี้ เนื่องจากส่วนของหมู่ฟังก์ชั่น Polyhydric phenol และหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ ที่บริเวณผิวลิกนินนั่นเอง และพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนมีบทบาทสำคัญยิ่งในการดูดซับโลหะของลิกนิน นอกจากนี้ยังพบว่ามีบางรายงานที่ระบุว่า Sulfuric acid lignin สามารถดูดซับปรอทได้สูงถึง 150 มิลลิกรัมปรอทต่อกรัมลิกนิน

7.3 ไคโตซานและของเสียจากกระบวนการแปรรูปอาหารทะเล

วัสดุอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการดูดซับโลหะ คือ ไคติน โดยปกติมักพบใน Exoskeletons ของปูและพวก Arthropods อื่น ๆ นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของฟังไจบางชนิดด้วย (Rorrer et al., 1993) ไคติน เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมปูกระป๋อง แต่สิ่งที่มีความสำคัญมากกว่าไคติน คือ อนุพันธ์ของไคตินที่สูญเสียหมู่อะเซทิล กลูโคซามีน หรือ ไคโตซาน นั่นเอง ซึ่งไคโตซานสามารถผลิตได้จากไคตินที่ผ่านกระบวนการทางเคมีบางอย่าง ส่วนไคตินที่พบในสภาพธรรมชาตินั้นมักพบในผนังเซลล์ของฟังไจบางชนิด ซึ่งราคาในการผลิตไคโตซานในท้องตลาด มีค่าเท่ากับ 1 – 2 ดอลลาร์สหรัฐฯต่อปอนไคโตซาน นอกจากไคโตซานจะมีราคาไม่แพงและถูกปล่อยทิ้งเป็นของเสียแล้ว ไคโตซานยังมีศักยภาพในการดูดซับโลหะสูงมาก โดยสามารถดักจับโลหะได้มากกว่าไคตินถึง 5 – 6 เท่า เนื่องจากมีกรดอะมิโนอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสูญเสียหมู่อะเซทิลของไคติน ศักยภาพในการดูดซับโลหะของไคโตซานถูกนำไปเปรียบเทียบกับเปลือกไม้ Activated sludge Poly (p - aminostyrene) และ

วัสดุอื่น ๆ พบว่าความจุของการดูดซับโลหะหลายชนิดของไคโตซาน ยกเว้นโครเมียม มีค่ามากกว่าวัสดุอื่น ๆ ประมาณ 1 มิลลิโมลของโลหะต่อกรัมของวัสดุดูดซับ และยังพบว่าความจุของการดูดซับโลหะเกือบทุกชนิด (ยกเว้นปรอท) ของไคโตซานยังมีค่ามากกว่า ความจุของการดูดซับโลหะของ Poly (p - aminostyrene) ซึ่งเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนราคาแพงอีกด้วย ถึงแม้ว่าไคโตซานจะมีสถานภาพในการดูดซับโลหะที่ค่อนข้างสูง แต่ความจุของการดูดซับโลหะของไคโตซานนั้นสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้อีกด้วยการแทนที่หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น กรดอินทรีย์ในโครงสร้างหลักของไคโตซาน หมู่ฟังก์ชันบางชนิดที่เชื่อมต่อกับไคโตซานแล้วทำให้ความจุของการดูดซับของไคโตซานเพิ่มขึ้น ได้แก่ Amino acid ester (Ishii et al., 1995) Pyridyl (Baba and Hirakawa, 1992) Oxoglutaric acid (Guibal et al., 1994) และ Polyethylenimine (Kawamura et al., 1993)

7.4 ซากมวลชีวภาพ

Matis and Zouboulis (1994) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โดยซากมวลชีวภาพ พบว่า เซลล์ตายสามารถสะสมโลหะหนักได้มากกว่าหรือเท่ากับเซลล์ที่มีชีวิต ผิวเซลล์ของแบคทีเรียมีสภาพเป็นไอออนลบเนื่องจากประกอบด้วยหมู่ที่มีไอออนของโพลีเมอร์ของผนังเซลล์ส่งผลให้เซลล์สามารถดูดจับไอออนบวกของโลหะหนักได้ดี ของเสียที่เป็นมวลชีวภาพของจุลินทรีย์มีปริมาณค่อนข้างมากจากอุตสาหกรรมหลายประเภท ตัวอย่างเช่น กระบวนการผลิตกรดซิตริก และเพนนิซิลิน เป็นต้น Niu et al. (1993) รายงานว่า ซากมวลชีวภาพของ *Penicillium chrysogenum* สามารถดูดซับตะกั่วได้ถึง 116 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมซากมวลชีวภาพ ซากมวลชีวภาพของจุลินทรีย์อื่น ๆ หลายชนิดที่ถูกนำมาศึกษา ได้แก่ *Bacillus mycoide* Penicillium sp. และ *S. longwoodensis* แต่ซากมวลชีวภาพของจุลินทรีย์เหล่านั้นมีประสิทธิภาพไม่เทียบเท่ากับ *Penicillium chrysogenum* Roy et al. (1993) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยมวลชีวภาพของสาหร่ายสีเขียว *Chlorella minutissima* และเปลือกข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีปริมาณมากจากการผลิตข้าวเพื่อการค้า เปลือกข้าวมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับสาหร่ายสีเขียว และพบว่าความจุของการดูดซับโครเมียมและตะกั่วของเปลือกข้าวมีค่าใกล้เคียงกับสาหร่ายสีเขียว แต่สำหรับความจุของการดูดซับแคดเมียมของเปลือกข้าวมีค่าเป็น 2 เท่าของค่าความจุของการดูดซับของสาหร่ายสีเขียว

7.5 เถ้าลอย

เถ้าลอยเป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนมากประกอบด้วยคาร์บอนออกไซด์ของซิลิกา อะลูมิเนียม และเหล็ก แต่รายงานของ Kapoor and Viraraghavan (1996) ระบุว่าคุณสมบัติของเถ้าลอยมีความผันแปรสูงมากรวมทั้งความจุของการดูดซับของเถ้าลอยก็ผันแปรไปตามปริมาณปูนขาวที่เป็นองค์ประกอบ ต่อมา Banerjee et al. (1997) ได้นำเสนอข้อมูลจลนศาสตร์ของการดูดซับสารประกอบอินทรีย์และรายงานว่าความจุของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบ และพื้นที่ผิวของเถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 1 – 6 ตารางเมตรต่อกรัมเถ้าลอย นอกจากนี้เถ้าลอยยัง

มีศักยภาพที่เป็นประโยชน์คือสามารถทำให้แข็งตัวได้ง่ายหลังจากที่โลหะถูกดูดซับ เนื่องจากมันประกอบด้วยผงพอซโซแลนที่สามารถทำปฏิกิริยากับปูนขาวในสภาวะที่มีน้ำเกิดเป็นสารเชื่อมติด Calcium – siligate hydrate สิ่งสำคัญที่ต้องบันทึกคือเถ้าลอยอาจมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่และธาตุกัมมัตภาพรังสีอีกปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่สิ่งเจือปนเหล่านี้จะถูกชะล้างออกมาและแทนที่ด้วยไอออนอื่น

7.6 ของเสียจากอุตสาหกรรม

Iron (III) hydroxide เป็นของเสียประเภทหนึ่งจากอุตสาหกรรมปุ๋ยที่ถูกศึกษาถึงอย่างเข้มข้นเกี่ยวกับศักยภาพในการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสีย (Namasivayam and Ranganathan, 1992) และมีรายงานว่าค่าความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 0.47 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม ที่ pH 5.6 ซึ่งรายงานดังกล่าวไม่มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ของ Aokiand Munemori (1982) ที่พบว่า $HCrO_4^-$ มีผลต่อการดูดซับของ Iron (III) hydroxide ที่ pH 8.5 ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักความจริงที่ว่าการดูดซับโครเมียมในการศึกษาครั้งหลังนี้ถูกจำกัดโดยไอออนลบ 2 ชนิด คือ SO_4^- และ SCN^- ที่ไปแข่งขันในพื้นที่ของการดูดซับกับไอออนเป้าหมาย Waste slurry ผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรมอีกชนิดหนึ่งจากโรงงานผลิตปุ๋ย ที่มีความจุในการดูดซับที่ดี ในปี ค.ศ. 1989 มีการศึกษาถึงการใช้ Waste slurry ในการกำจัด Cr^{6+} Hg^{2+} และ Pb^{2+} จากสารละลาย ซึ่งมีรายงานว่ามีค่าความจุของการดูดซับที่ดี คือ 1,030 560 และ 640 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัม Waste slurry การศึกษาที่คล้าย ๆ กันเกี่ยวกับการกำจัด Cu^{2+} และ Cd^{2+} โดยใช้ Waste slurry จากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล (Lee and Davis, 2001) พบว่ามีค่าความจุของการดูดซับเท่ากับ 20.97 และ 15.73 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัม Waste slurry สำหรับทองแดงและแคดเมียม ตามลำดับ

7.7 วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเป็นสารดูดซับโลหะหนัก

เมื่อไม่นานมานี้มีนักวิจัยจำนวนมากที่เสนอรายงานเกี่ยวกับการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น Peat หยวกกล้วย เปลือกไม้ รำข้าว เปลือกข้าว ขนแกะ เปลือกถั่ว และกะลามะพร้าว มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย วัสดุเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักได้โดยตรง หรือหลังจากนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งวิธีการกระตุ้นเหล่านี้อาจจำแนกได้เป็น วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) และวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) สำหรับการกระตุ้นทางกายภาพ อาจพบว่ามีการนำไปใช้บ่อยครั้งกับถ่านวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรเพื่อการผลิตถ่านกัมมันต์ (Guo and Lua, 2001) ที่มีกระบวนการผลิตอยู่ 2 ขั้นตอน คือ Carbonisation และ Activation โดยในขั้นตอนแรกวัสดุจะถูกเผาให้เป็นถ่านภายใต้สภาวะเฉื่อย (Innert atmosphere : ก๊าซไนโตรเจน หรือฮีเลียม) ที่อุณหภูมิระดับกลาง ซึ่งผลผลิตจากขั้นตอนนี้คือถ่านของวัสดุจากการเกษตรที่มีโครงสร้างแบบรูพรุน จากนั้นจะนำไปเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่า (900 องศาเซลเซียส) กับไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่สามารถทะลุทะลวงสู่โครงสร้างภายในได้ดี ส่วนการกระตุ้นทางเคมีนั้นขึ้นกับสารดูดซับที่นำมาใช้ในการกระตุ้นด้วยสารเคมีก่อนนำไปใช้ต่อในกระบวนการดูดซับ และตัวอย่างการกระตุ้นทางเคมี ได้แก่ การกระตุ้นเส้นผมด้วย สารละลาย Alkali และ Alkaline Na_2S solution (Kulkarni and Rane, 1980) หรือการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก ซัลฟูริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ และการใช้สารผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับไดโซเดียมซัลไฟด์ (Tan et al., 1985) หรืออาจใช้ Quaternary ammonium cation ในการกระตุ้น Smectite clay (Mortland et al., 1986) การใช้ Anion surfactant เพื่อการกระตุ้นใบชา (Tee and Kharn, 1988) ซึ่งการกระตุ้นทางเคมีนี้ต้องดำเนินการก่อนนำไปใช้ในกระบวนการดูดซับ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจึงมีหลายทางเลือกในการพัฒนาให้มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย

Al – asheh et al. (2003) ศึกษาการดูดซับเพื่อกำจัดสังกะสีและทองแดงจากน้ำเสียของขนไก่ที่ถูกกระตุ้นทางเคมี 2 วิธี คือ การกระตุ้นด้วย Alkaline solution และ Anionic surfactant และขนไก่ธรรมชาติ พบว่า การกระตุ้นด้วย 0.2 N NaOH มีประสิทธิภาพสูงสุดในกระบวนการดูดซับ และการกระตุ้นด้วย Dodesyl sulfate (As anion surfactant) ให้ผลการดูดซับดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นด้วย 0.2 N NaOH สามารถดูดซับไอออนของโลหะได้มากที่สุดรองลงมาคือการกระตุ้นด้วย Anionic surfactant และขนไก่ที่ไม่มีการกระตุ้นใด ๆ สามารถดูดซับไอออนของโลหะได้น้อยที่สุด ขณะที่การศึกษาการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้เกล็ดเปลือกถั่ว Peanut ในระบบแบบ Batch system (Johnson et al., 2002) โดยพิจารณาอิทธิพลของ pH และขนาดของสารดูดซับต่ออัตราการดูดจับโลหะพร้อมทั้งศึกษา Langmiur และ Freundlich isotherm พบว่าผลการศึกษาข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกับ Langmiur model มากที่สุด และในการทดสอบทางด้านจลนศาสตร์ทั่วไปพบว่าปริมาณทองแดงอย่างน้อย 75% ถูกกำจัดออกไปภายใน 20 นาทีแรกของการทดสอบ และถูกกำจัดออกไปเป็น 92% ภายใน 50 นาที โดยช่วง pH ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 7.5 โดยความจุของการดูดซับของสารดูดซับจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ pH มากกว่า 4.0 และความจุโดยรวมของเกล็ดเปลือกถั่ว Peanut มีค่ามากกว่าเปลือกถั่ว Peanut ที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเปลือกถั่ว Peanut ในการดูดซับทองแดงและผลของลักษณะที่เป็นผลมาจากการแปรสภาพสารดูดซับในรูปของเกล็ดว่าสามารถใช้เป็นสารดูดซับต้นทุนต่ำในการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียได้อย่างดี ในปีเดียวกัน Demirbas et al. (2002) ได้ศึกษาถึงสมดุลของการดูดซับในการกำจัดนิเกิลจากสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกถั่ว Hazelnut โดยศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายโลหะเริ่มต้น ความเร็วของการเขย่า อุณหภูมิ และขนาดของถ่านกัมมันต์ ในระบบแบบ Batch พบว่าต้องใช้ระยะเวลาการสัมผัส 180 นาที เพื่อการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลของสมดุลของการดูดซับและหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของไอโซเทอร์มด้วย Langmiur Freundlich และ Temkin isotherm พบว่า ข้อมูลของสมดุลการดูดซับนิเกิลโดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกถั่ว Hazelnut สอดคล้องกับ Langmiur isotherm มากที่สุด และจากการวิเคราะห์ตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกแสดงให้เห็นว่าการดูดซับดังกล่าวเป็นระบบคายความร้อนในสภาพธรรมชาติ Ahmet et al. (2004) ได้ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดย Dehydrated wheat bran

(DWB) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแป้ง โดยพิจารณาผลของ pH อุณหภูมิ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะ และปริมาณสารดูดซับที่ใช้ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ คือ การใช้สารดูดซับ 0.1 กรัม ในสารละลายทองแดงความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับ pH 5.0 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สมดุลของการดูดซับในการศึกษานี้มีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับ Langmiur isotherm model โดยมีความจุของการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 51.5 มิลลิกรัมทองแดงต่อกรัมของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับทองแดงโดย DWB เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ๆ

8. การเปรียบเทียบศักยภาพของการดูดซับโลหะหนักของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า (CAC) และสารดูดซับต้นทุนต่ำ

สารดูดซับต้นทุนต่ำหลายชนิด เช่น Chitosan Zeolites waste slurry และlignin นั้นมีสภาพการดูดซับโลหะหนักค่อนข้างสูง และมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า (CAC) หลายชนิด โลหะหนักที่เป็นพิษส่วนใหญ่ เช่น ไอออนของทองแดง สังกะสี แคดเมียม และปรอท สามารถถูกดูดซับออกไปได้ค่อนข้างดีจากสารละลายโดยการใช้ไคโตซาน ปกติแล้วไคโตซานมีข้อได้เปรียบด้านการกำจัดโลหะหนักหลายชนิด คือ Cr^{6+} Hg^{2+} Cu^{2+} และ Cd^{2+} ในแง่ของความจุของภาระบรรทุกโลหะหนักเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตามไคโตซานก็ถูกพิจารณาว่าเป็นสารดูดซับทางเลือกที่มีราคาสูงที่สุดใกล้เคียงกับถ่านกัมมัรต์เพื่อการค้าทั่วไป คือมีราคาประมาณ 16 ดอลลาร์สหรัฐฯ /กิโลกรัม ขณะที่ถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีราคาประมาณ 20 – 22 ดอลลาร์สหรัฐฯ / กิโลกรัม Clinoptiolite เป็น Zeolite ชนิดหนึ่งที่ถูกปล่อยทิ้งในสภาพธรรมชาติและเป็นสารดูดซับต้นทุนต่ำที่ดีประเภทหนึ่งในการกำจัดแคดเมียมและตะกั่ว แต่อย่างไรก็ตาม Chabazite มีความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกมากกว่า Clinoptiolite ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณตะกั่วและแคดเมียมที่ถูกดูดซับโดย Chabazite นั้นมีค่ามากกว่าปริมาณที่ถูกดูดซับโดย Clinoptiolite ถึงสองเท่า อย่างไรก็ตามราคาของ Zeolite ในท้องตลาด (1 ดอลลาร์สหรัฐฯ/กิโลกรัม) ก็ต่ำกว่าราคาถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าชนิดต่าง ๆ ถึง 20 เท่าและมีค่าความจุการดูดซับตะกั่วสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิด HD 400 ถึง 4 เท่า Waste slurry เป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการพัฒนาสารดูดซับต้นทุนต่ำ โดย Waste slurry สามารถกำจัด Cr^{6+} Pb^{2+} และ Hg^{2+} จากสารละลายอย่างได้ผลโดยใช้ต้นทุนต่ำ ในการกำจัดโครเมียม Waste slurry มีความจุของการดูดซับสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสารดูดซับต้นทุนต่ำอื่น ๆ และมีค่ามากกว่าความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าชนิด Filtrasorb 400 เกือบ 4 เท่า แต่ที่จริงแล้วความจุของการดูดซับตะกั่วและปรอทของ Waste slurry มีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าชนิดต่าง ๆ ถึง 10 และ 20 เท่าตามลำดับ ถึงแม้ว่าจะไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับราคาในท้องตลาดของ Waste slurry แต่เชื่อว่ามันจะมีราคาที่ต่ำมาก หรืออาจได้มาฟรีเลยทีเดียว ลิกนินถูกพิจารณาว่าเป็นสารดูดซับต้นทุนต่ำที่ดีที่สุดสำหรับการกำจัดตะกั่ว และสังกะสี ลิกนินสามารถกำจัดไอออนของโลหะทั้ง 2 ชนิด ได้อย่างได้ผลที่อุณหภูมิ 30 – 40 องศาเซลเซียส โดยมันสามารถดูดซับตะกั่วได้มากกว่า Waste slurry เกือบ 2 เท่า และดูดซับสังกะสีได้มากกว่าไคโตซานถึง 2 เท่าเช่นกัน นอกจากนี้ลิกนินยังมีความจุของการดูดซับตะกั่วมากกว่าถ่านกัม

มันต์เพื่อการค้าถึง 10 เท่า ถึงแม้ว่าลิกนินจะมีราคาไม่แพงในท้องตลาด (ประมาณ 0.06 ดอลลาร์สหรัฐฯ/กิโลกรัม) ดังนั้นลิกนินจึงเป็นสารดูดซับโลหะหนักที่ดีเลิศเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซาน อย่างไรก็ตามความจุของการดูดซับตะกั่วของลิกนินมีความโดดเด่นที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าและสารดูดซับต้นทุนต่ำอื่น ๆ เช่น ไคโตซาน Zeolites และ Waste slurry เป็นต้น (Babel and Kirnawan, 2003)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

1.1 ตัวดูดซับ

เปลือกลำไยจากกระบวนการแปรรูปลำไย จังหวัดลำพูน จะถูกนำมาคัดแยกเอาเมล็ด และเนื้อลำไยออกให้เหลือเฉพาะเปลือกแล้วล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดเศษดิน และทรายที่ติดมากับเปลือกลำไยออกไปแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นครั้งสุดท้าย จากนั้นนำไปตากแดดบนตะแกรงในลอนเพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 3 วัน ก่อนที่จะนำไปปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง หรือ กรดซัลฟูริกเข้มข้น ดังนี้

1.1.1 การทำแห้ง

นำเปลือกลำไยแห้งไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดไฟฟ้า ร่อนด้วยตะแกรงให้ได้ขนาด 250 - 850 ไมครอน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desicator) เก็บไว้ในภาชนะแห้งที่มีฝาปิดสนิท ณ อุณหภูมิห้อง

1.1.2 การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง

แช่เปลือกลำไยบดในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.2 นอร์มอล เขย่าโดยใช้ Orbital shaker 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 1 เพื่อแยกเปลือกลำไยออกจากสารละลาย ล้างเปลือกลำไยบดด้วยน้ำปราศจากไอออนหลาย ๆ ครั้ง แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำไปบดเครื่องบดไฟฟ้าแล้วเก็บรักษาไว้ในภาชนะแห้งที่มีฝาปิดสนิท เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการดูดซับต่อไป

1.1.3 การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น

นำเปลือกลำไยบดมาแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้นในอัตราส่วน 1:1.8 [เปลือกลำไยบด : กรดซัลฟูริกเข้มข้น (w/v)] แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนหลาย ๆ ครั้งจนหมดกลิ่นกรด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ นำไปบดด้วยเครื่องบดไฟฟ้าแล้วเก็บรักษาไว้ในภาชนะแห้งที่มีฝาปิดสนิท เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการดูดซับต่อไป

1.1.4 การหาคุณสมบัติของตัวดูดซับ

วิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวดูดซับได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ปริมาณเยื่อใย ปริมาณเถ้า ขนาดรูพรุน และ ความเป็นกรด-ด่าง

1.2 สารเคมี

1.2.1 Cadmium sulfate octahydrate ($3CdSO_4.8H_2SO_4$)

1.2.2 Lead (II) nitrate [$Pb(NO_3)_2$]

1.2.3 Sodium hydroxide (NaOH)

1.2.4 Conc.Sulfuric acid (Conc. H_2SO_4)

1.2.5 Glacial acetic acid (CH_3COOH)

1.2.6 Sodium acetate trihydrate ($CH_3COONa.3H_2O$)

1.2.7 Ammonium hydroxide (NH_4OH)

1.2.8 Ammonium chloride (NH_4Cl)

1.2.9 Hydrochloric acid (HCl)

1.2.10 Standard buffer pH 4, 7, 10 solution

1.2.11 Deionized water

1.3 เครื่องมือ

1.3.1 Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (FAAS)

1.3.2 เครื่องบดผลไม้ไฟฟ้า

1.3.3 Orbital shaker

1.3.4 pH meter

1.3.5 Hot air oven

1.3.6 Desicator

1.3.7 เครื่องแก้วและอุปกรณ์ที่จำเป็นในห้องปฏิบัติการ

2. วิธีการทดลอง

2.1 การทดสอบการดูดซับ

ทดสอบการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด คือ แคดเมียมและตะกั่ว โดยใช้เปลือกลำไยที่ได้รับการปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง การปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และเปลือกลำไยบดที่ถูกปรับสภาพด้วยน้ำปราศจากไอออน เป็นตัวดูดซับ แล้วทำการทดลองโดยใช้วิธีการทดลองแบบกะ (Batch experiment) เพื่อศึกษาผลของ ความเป็นกรด - ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ และขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบ ต่อการดูดซับโลหะแคดเมียมและตะกั่ว

2.1.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะต่อการดูดซับแคดเมียม

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมต่าง ๆ กัน คือ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะแคดเมียมหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.2 การศึกษาผลของความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะต่อการดูดซับแคดเมียม

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 2 4 6 และ 8 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะแคดเมียมหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.3 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับแคดเมียม

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ในปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะแคดเมียมหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.4 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับต่อการดูดซับแคดเมียม

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคต่าง ๆ กัน คือ 250 - 450 450 – 500 และ 500 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะแคดเมียมหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะต่อการดูดซับตะกั่ว

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วต่าง ๆ กัน คือ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่วหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.6 การศึกษาผลของความเป็นกรด – ด่างของสารละลายโลหะต่อการดูดซับตะกั่ว

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 2 4 6 และ 8 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่วหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.7 การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับตะกั่ว

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ในปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่วหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.1.8 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับต่อการดูดซับตะกั่ว

ทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่ว

เท่ากับ 20 พีพีเอ็ม โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง+ H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคต่าง ๆ กัน คือ 250 - 450 450 - 500 และ 500 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม เขย่าด้วย Orbital shaker 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง แล้วตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะตะกั่วหลังจากสิ้นสุดการทดลองโดยใช้ FAAS ที่ใช้น้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายโลหะเป็น Blank และทำการทดลอง 3 ซ้ำ เพื่อหาประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.2 การศึกษา Equilibrium isotherm

ศึกษาสมดุลของการดูดซับโลหะหนัก 2 ชนิด คือ ตะกั่วหรือแคดเมียมโดยสารดูดซับชนิดต่าง ๆ คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ในสารละลายโลหะแต่ละชนิดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะต่าง ๆ กัน คือ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เป็นเวลา 90 นาที โดยทำการวัดความเข้มข้นของสารละลายทุก ๆ 10 นาที โดยข้อมูลของการดูดซับที่สมดุลของการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะที่สมดุลของการดูดซับ (C_e) ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q_e) จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยแบบจำลอง Langmiur Adsorption Model เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าความจุสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) และค่าความแข็งแกร่งของพันธะดูดติด (b) เพื่อใช้สำหรับการอธิบายกระบวนการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมหรือตะกั่ว โดยตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด

2.3 การกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์โดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ

การกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ของคณะเทคโนโลยี การประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยใช้เปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาคุณภาพน้ำทางเคมีและกายภาพบางประการของน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ทั้งก่อน และหลังการทดลอง ดังนี้ ปริมาณโลหะแคดเมียม ค่าความเป็นกรด – ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ซีโอดี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเกี่ยวกับ ประสิทธิภาพของการดูดซับ ความจุสูงสุดของการดูดซับ ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ และข้อมูลของการดูดซับที่สมดุลของการดูดซับ จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์โดยสมการ Langmiur Adsorption Model

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิจารณ์

1. ตัวดูดซับ (Adsorbents)

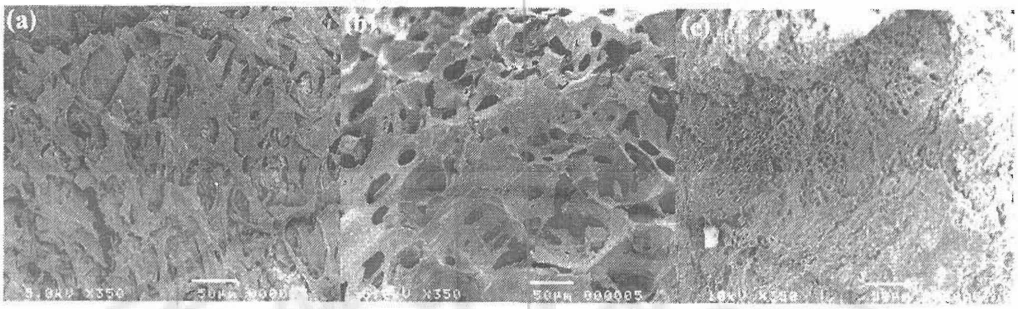
เปลือกลำไยสายพันธุ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้จากกระบวนการแปรรูปลำไยในจังหวัดลำพูน สายพันธุ์ดอ ซึ่งน้ำหนักสดเฉลี่ยของแต่ละส่วนประกอบของผลลำไย ได้แก่ เปลือก เมล็ด เนื้อผลของลำไย มีค่าเท่ากับ 0.222 0.158 0.845 และ 1.225 กิโลกรัมต่อลำไย 100 ผล ตามลำดับ คิดเป็น 18.13 12.90 68.97 และ 100.00 เปอร์เซ็นต์ และน้ำหนักแห้งเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 0.104 0.108 0.197 และ 0.409 กิโลกรัมต่อลำไย 100 ผล คิดเป็น 25.37 43.90 48.05 และ 100.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตาราง 1) อย่างไรก็ตามโชคชัย (2547) รายงานว่า ผลลำไยสายพันธุ์ต่างๆ ได้แก่ สายพันธุ์แห้ว ดอก้านแข็ง เบี้ยวเขียว ดอที่กระตุ้นด้วยสารโปแตสเซียมคลอเรต ชมพู และดอก้านอ่อน มีคุณภาพที่แตกต่างกัน เมื่อทำการทดลองอบแห้งลำไยทั้งเปลือกสายพันธุ์ต่างๆ คือ เบี้ยวเขียว แห้ว ชมพู ดอก้านแข็ง ดอก้านอ่อน และดอใส่สารโพแทสเซียมคลอเรต โดยใช้เตากะบะแบบไต้หวัน ตามวิธีการมาตรฐาน พบว่า ผลลำไยพันธุ์เบี้ยวเขียวมีขนาดของผลใหญ่กว่าทุกพันธุ์ ทั้งผลสดและแห้ง ขณะที่ลำไยพันธุ์แห้วมีน้ำหนักเปลือกสดและแห้งสูงกว่าพันธุ์อื่น ลำไยพันธุ์เบี้ยวเขียวมีน้ำหนักเนื้อลำไยสดสูงสุด คือ 1.13 กก./100 ผล ส่วนดอก้านอ่อนมีน้ำหนักเนื้อลำไยสดต่ำสุด คือ 0.65 กก./100 ผล อย่างไรก็ตาม น้ำหนักเนื้อลำไยแห้งของพันธุ์ดอใส่สารโพแทสเซียมคลอเรต และดอก้านอ่อนมีค่าต่ำกว่าน้ำหนักผลแห้งของสายพันธุ์อื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

ตาราง 1 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของ เปลือก เมล็ด เนื้อ และเนื้อ ของลำไยที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปลำไยในจังหวัดลำพูน

	น้ำหนักสด				น้ำหนักแห้ง			
	เปลือก	เมล็ด	เนื้อ	ผล	เปลือก	เมล็ด	เนื้อ	ผล
เฉลี่ย (กก. / 100 ผล)	0.222	0.158	0.845	1.225	0.104	0.108	0.197	0.409
เฉลี่ย (%)	18.13	12.90	68.97	100.0	25.43	26.41	48.17	100.0

1.1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีบางประการของเปลือกลำไย

เปลือกลำไยที่ใช้ในการทดลองได้จากการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ การทำแห้ง การกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น (เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น) การกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล (เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล) มีลักษณะทางกายภาพและเคมีบางประการ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน เยื่อใย เถ้า ขนาดของรูพรุน และ ค่าความกรด - ด่างเมื่อละลายน้ำ ดังนี้ (ตาราง 2)



ภาพ 9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ คือ (a) เปลือกลำไยแห้ง (b) เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น (c) เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล

เปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมจากวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ มีความชื้นเท่ากันคือ 0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณโปรตีนมีค่าไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ 6.48 4.42 และ 4.89 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนไขมันของเปลือกลำไยแห้งมีค่าเท่ากับ 13.21 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณไขมันของเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นและเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีค่าไม่ต่างกัน คือ 0.46 และ 0.84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพเปลือกลำไยด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล มีผลทำให้ปริมาณไขมันของเปลือกลำไยลดลงซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Figueira et. al. (2000) ที่ศึกษาการเตรียมมวลชีวภาพของสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล 4 ชนิด คือ *Laminaria Durvillaea Ecklonia* และ *Homosira* ด้วยการล้างด้วยสารละลายกรดไนตริก เพื่อใช้เป็นสารดูดซับชีวภาพสำหรับโลหะทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณคาร์บอนอินทรีย์รวม (TOC)ในปริมาณที่ต่างกัน คือ 37.99 73.36 58.68 และ 76.41 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งการล้างด้วยกรดนี้ยังทำให้เกิดการปลดปล่อยสารประกอบส่วนที่ละลายน้ำได้ อันได้แก่ โมเลกุลและไอออนของอินทรีย์สารขนาดเล็กบางชนิดออกมาด้วย อันทำให้เกิดบริเวณแอคทีพไซท์ที่เป็นประโยชน์สำหรับการเกาะติดของประจุบวก ซึ่งปรากฏการณ์นี้สอดคล้องและคล้ายกันกับการรายงานอื่น ๆ ได้แก่ Lee and Volesky (1997) และ Kratochvil and Volesky (2006) ที่เตรียมมวลชีวภาพของสาหร่ายทะเลโดยใช้กรดก่อนที่จะใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดโลหะในสารละลาย เพื่อให้เกิดกลไกของการแลกเปลี่ยนประจุเป็นกลไกหลักในกระบวนการดูดซับโลหะของมวลชีวภาพของสาหร่ายด้วย ขณะที่ Hisarli (2005) รายงานว่ายังคงมีรายงานอีกจำนวนมากเกี่ยวกับการกระตุ้นแร่ดินเหนียวด้วยกรดหรือด่างก่อนที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับไอออนประจุบวกหรือลบ ซึ่งในการศึกษาเหล่านี้รายงานว่าการกระตุ้นด้วยกรดจะทำให้เกิดการสูญเสีย Octahedral และ Tetrahedral cation ออกจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียว อันเป็นกระบวนการสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของแร่ดินเหนียวให้สามารถดูดซับสีที่มีฤทธิ์เป็นกรดได้ดีกว่าสีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง นอกจากนี้ Ghosh and Bhattacharyya (2002) ความจุของการดูดซับ Methylene blue โดย Kaolin มีค่าเพิ่มขึ้นอย่าง

ชัดเจน หลังจากการกระตุ้นด้วยด่าง ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นด้วยด่างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง NaOH ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ Basic site ของพื้นผิวของแร่ดินเหนียวที่สามารถดูดซับกับประจุบวกของ Methylene blue ได้มากขึ้น ขณะที่ปริมาณเยื่อไยและเถ้าของเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นและเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล มีค่าสูงสุดและไม่แตกต่างกัน คือ 45.98 และ 45.14 เปอร์เซ็นต์ และ 11.78 และ 11.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเยื่อไยและเถ้าของเปลือกลำไยแห้ง คือ 30.45 และ 6.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ขณะที่ขนาดของรูพรุนของเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นมีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 12.97 ไมครอน ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของรูพรุนเท่ากับ 7.83 และ 5.93 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพื้นผิวถ่านคือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างออกซิเจนและพื้นผิวของถ่านรวมทั้งยังทำให้พื้นผิวเดิมของถ่านมีความพรุนเพิ่มมากขึ้นด้วย (Chen and Wu, 2004; Chen et. al., 2002; Bhattacharyya and Gupta, 2006)

ส่วนความเป็นกรด – ด่าง ของเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล มีค่าเท่ากับ 4.7 2.5 และ 5.1 ตามลำดับ ซึ่งการเตรียมเปลือกลำไยด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ การทำแห้ง การกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น และ การกระตุ้นด้วยสารละลายด่างความเข้มข้น 0.25 นอร์มอล มีผลทำให้เกิดความแตกต่างในลักษณะทางกายภาพและเคมีบางประการของเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด Ozer and Ozer (2004) ที่ศึกษาการใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นในการกำจัดน้ำออกจากรำข้าวสาลีเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดโครเมียมออกจากสารละลาย ทำให้ความหนาแน่นของรำข้าวสาลีลดลง นอกจากนี้

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ การกระตุ้นเปลือกลำไยด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ จึงมีผลทำให้เกิดความแตกต่างทั้งในลักษณะทางเคมีและกายภาพของพื้นผิวเปลือกลำไยก่อนที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่ว อันจะเป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในสารละลาย และน้ำเสียจากกระบวนการผลิตได้

2. การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลาย

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 2 4 6 และ 8 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ขนาดต่าง ๆ คือ 250 – 450 ไมครอน 450 – 500 ไมครอน และ 500 – 850 ไมครอน ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม เป็นสารดูดซับ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะ ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะ ขนาดอนุภาคและปริมาณของสารดูดซับต่อการดูดซับไอออน

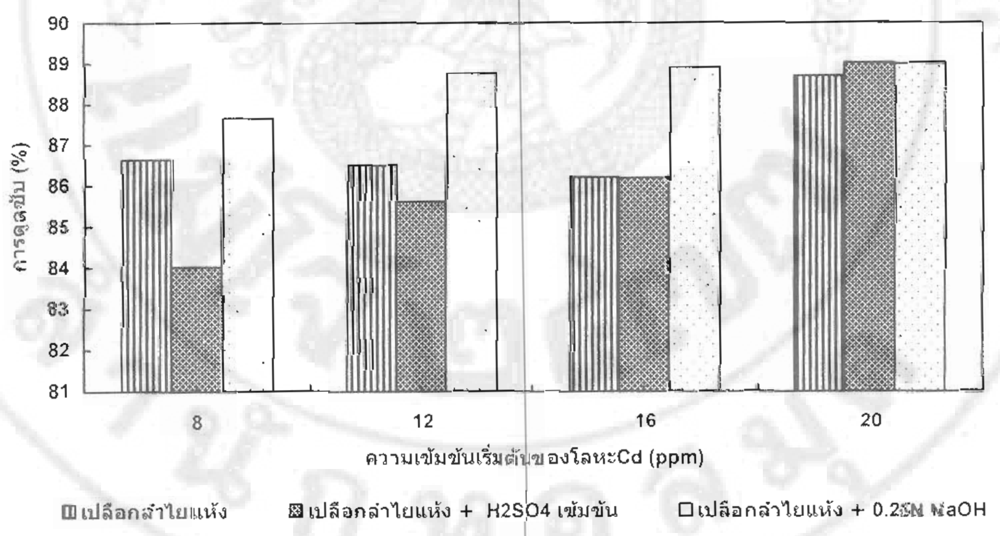
ของโลหะแคดเมียมในระบบสารละลายของสารดูดซับทั้ง 3 ประเภท ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง (25 ± 0.3 องศาเซลเซียส) ได้ผลดังนี้

ตาราง 2 ลักษณะทางกายภาพ และเคมีบางประการของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลาย

	เปลือกลำไยแห้ง	เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น	เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล

สารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 12 16 และ 20 พีพีเอ็มได้ไม่แตกต่างกัน และมีค่าสูงสุด คือ 88.77 ± 0.21 88.90 ± 0.46 และ 89.04 ± 0.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบกับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 8 พีพีเอ็ม ที่สามารถดูดซับได้เท่ากับ 87.65 ± 0.39 เปอร์เซ็นต์ (ภาพ 10)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาข้างต้นจะพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายของตัวดูดซับทั้ง 3 ประเภท มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายทั้งอาจเป็นเพราะความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายที่เพิ่มขึ้นทำให้โอกาสที่ไอออนของโลหะพบกับบริเวณดูดซับที่ไม่อิ่มตัวและเป็นประโยชน์ต่อการดูดติดโลหะของตัวดูดซับมีมากขึ้นจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียม ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Singh et. al. (2006) ที่รายงานว่าการใช้รำข้าวสาลีเป็นตัวดูดซับต้นทุนต่ำเพื่อกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสีย พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสียแปรผันตรงอย่างสูงต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมในสารละลาย เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้น 73.65 80.12 และ 86.80 เปอร์เซ็นต์ ตามปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมในน้ำเสียที่เพิ่มเป็น 10.0 12.5 และ 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพ 10 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

อย่างไรก็ตามการใช้เปลือกลำไย + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้มากกว่าการใช้ตัวดูดซับประเภทอื่นอย่างชัดเจนในทุกระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียม แต่มีแนวโน้มเริ่มคงที่ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะที่สูง ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากบริเวณดูดซับที่ยังไม่อิ่มตัวที่เหลืออยู่ในระหว่างปฏิกิริยาการดูดซับของเปลือกลำไย + NaOH 0.25 นอร์

มอล มีมากกว่าตัวดูดซับประเภทอื่น ๆ และเมื่ออยู่ในสภาพที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง ๆ อนุภาคของเปลือกลำไย + NaOH 0.25 นอร์มอล มีการเกาะตัวกันเองทำให้ ไอออนของโลหะแคดเมียมที่เกาะอยู่กับอนุภาคของเปลือกลำไย + NaOH 0.25 นอร์มอล อย่างหลวม ๆ หลุดออกมา

Katsumata et. al. (2003) รายงานว่ามีปัจจัยจำนวนมากที่เชื่อมโยงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ อย่างแรกที่สำคัญคือบริเวณการดูดซับที่ยังคงไม่อิ่มตัวในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ส่วนสาเหตุที่สองคือการเกาะตัวหรือรวมตัวกันของตัวดูดซับในสภาพที่มีความเข้มข้นสูง ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะตัวกันเองของตัวดูดซับจะทำให้พื้นที่รวมของอนุภาคตัวดูดซับที่เป็นประโยชน์สำหรับการดูดติดโลหะลดน้อยลง และมีเส้นทางในการแพร่ของตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของตัวดูดซับอาจทำให้ไอออนของโลหะที่เกาะติดกับอนุภาคตัวดูดซับอย่างหลวม ๆ หลุดออกมาได้ และในการทดลองใช้ Montmorillonite และ Silica gel เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 1 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 5 นั้นพบว่าตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากสารละลายได้สูงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามเปอร์เซ็นต์การกำจัดโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายมีค่าสูงกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคล้ายกันกับ การรายงานของ Ajmal et. al. (2006) ที่ได้ศึกษาการใช้หญ้า *Parthenium Hysterophorous* เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสีย โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมในน้ำเสียเพิ่มขึ้นจาก 10 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับโลหะแคดเมียมยังคงสูงสุด คือ 99.5 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นเกินกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ผลของความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม

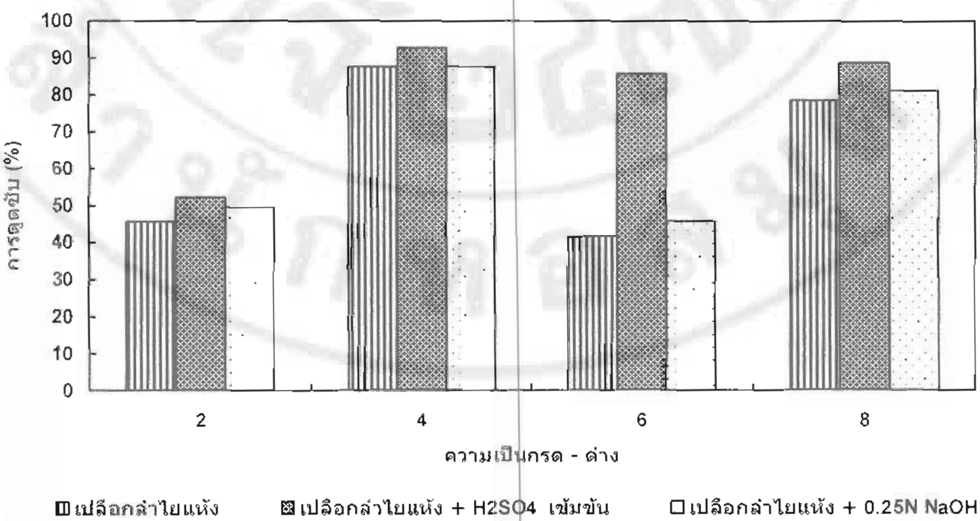
การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายต่าง ๆ กัน คือ 2 4 6 และ 8 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ได้ผลดังนี้

เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้สูงสุดในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 4 คือสามารถดูดซับได้ 87.53 $\pm$ 0.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 ที่มีค่ารองลงมาเป็นอันดับสอง คือ 78.43 $\pm$ 0.42 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 2 และ 6 มีค่าการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมติดตามมาเป็นอันดับสามและสี่ ตามลำดับ คือ 45.65 $\pm$ 0.31 และ 41.50 $\pm$ 0.68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพ 1) ขณะที่การใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ได้สูงสุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P > 0.05$) กับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 6

และ 2 ที่มีค่ารองลงมาเป็นอันดับสอง สาม และสี่ ตามลำดับโดยสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้เท่ากับ 88.72 ± 0.16 85.72 ± 0.25 และ 52.06 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ได้สูงสุด คือ 87.65 ± 0.39 เปอร์เซ็นต์ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 ที่มีค่ารองลงมาเป็นอันดับสอง ขณะที่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 6 กับ 2 มีค่าไม่ต่างกันและมีค่าต่ำสุดโดยสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้เท่ากับ 81.17 ± 0.60 45.73 ± 0.36 และ 49.43 ± 2.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพ 11)

จากการผลทดลองข้างต้นพบว่าการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายโลหะมีค่าเท่ากับ 4 และ 8 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับค่าการดูดซับโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 2 และ 6

Panda et. al. (2006) รายงานว่า การดูดซับโลหะแคดเมียมของมวลชีวภาพที่ใช้เป็นตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ ที่ค่าความเป็นกรด ด่าง เท่ากับ 2 มีค่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากในสภาพดังกล่าวเกิดการแข่งขันระหว่างไอออนของโลหะแคดเมียมและไฮโดรเจนไอออนที่ปรากฏในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดเพื่อเข้าจับกับบริเวณที่มีประจุเป็นลบของตัวดูดซับ Lee et. al. (1998) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้เศษแอปเปิ้ลรายงานว่าในสภาพที่ความเป็นกรด – ด่าง ระหว่าง 3 – 4 หมู่ Carboxylic group ซึ่งเป็นหมู่ฟังค์ชันที่สำคัญสำหรับการดูดติดโลหะในซากอินทรีย์ จะสูญเสียโปรตอนและมีประจุเป็นลบดังนั้นจึงทำให้เกิดการดึงดูดประจุบวกของโลหะได้มากยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมที่ระดับความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 2 และ 6 มีค่าต่ำกว่าความเป็นกรด – ด่างที่ระดับอื่น ๆ



ภาพ 11 ผลของความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายโลหะแคดเมียมต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

แต่การดูดซับโลหะแคดเมียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายที่มีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 4 ซึ่งสอดคล้องกับ Ajmal et. al. (2006) ที่รายงานว่า ความเป็นกรด – ด่างของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้พื้นผิวที่เป็นประจุลบของตัวดูดซับที่เป็นประโยชน์สำหรับการดูดติดโลหะแคดเมียมของหญ้า *Parthenium Hysterophorous* มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นและทำให้เกิดการดูดซับโลหะแคดเมียมได้ดีขึ้นด้วย ซึ่งที่ความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลายเท่ากับ 4 ตัวดูดซับดังกล่าวสามารถดูดซับโลหะแคดเมียมได้ถึง 99.16 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามในสภาพที่ความเป็นกรด - ด่างสูง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมากกว่า 7 โลหะแคดเมียมจะเกิดการตกตะกอนในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ [$Cd(OH)_2$] ทำให้ในสภาพที่เป็นด่างปริมาณโลหะที่ถูกดูดติดตัวดูดซับมีน้อยลง แต่ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายก็มีค่าลดลงด้วย (Ozer and Pirincci, 2006) ดังนั้นที่ระดับความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 8 ในการศึกษานี้จึงมีปริมาณไอออนของโลหะที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าค่อนข้างต่ำนั่นเอง

2.3 ผลของปริมาณสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ได้ผลดังนี้

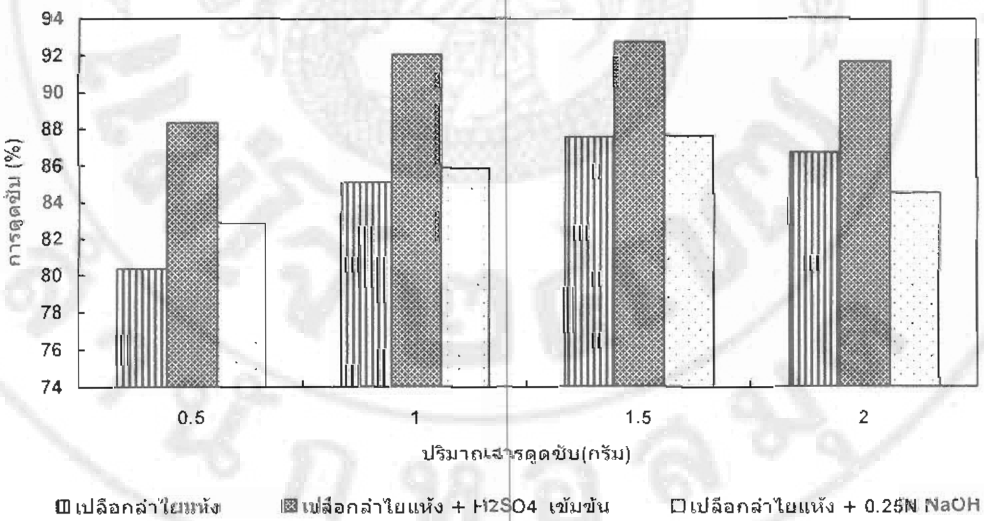
เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้สูงสุดและไม่แตกต่างกัน($P > 0.05$) เมื่อถูกใช้ในปริมาณ 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม คือสามารถดูดซับได้ 85.07 ± 1.59 87.53 ± 0.64 และ 86.72 ± 0.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งที่ใช้ในปริมาณ 0.5 กรัม ซึ่งมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 80.37 ± 1.13 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นสารดูดซับ ที่สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมในสารละลายได้สูงสุดและไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) เมื่อถูกใช้ในปริมาณ 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม คือสามารถดูดซับได้ 92.02 ± 0.14 92.68 ± 0.30 และ 91.63 ± 0.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งที่ใช้ในปริมาณ 0.5 กรัม ซึ่งมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 88.32 ± 0.07 เปอร์เซ็นต์

ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเปลือกลำไยทั้ง 2 ชนิดข้างต้นสามารถดูดซับโลหะแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารดูดซับที่ใช้จาก 0.5 เป็น 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Cay et. al. (2004) ที่รายงานว่าผลของปริมาณกากชาที่ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะทองแดงและแคดเมียมในแบบเดี่ยวและแบบคู่ ในสภาพที่เหมาะสมทำให้ปริมาณโลหะรวมที่ถูกกำจัดออกไปจากสารละลายมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณกากชาที่ใช้เป็นสารดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเท่ากับเป็นการเพิ่มพื้นที่ที่เป็นประโยชน์สำหรับการดูดติดโลหะให้มากขึ้น ทำให้ปริมาณโลหะที่ถูกดูดติดมีมากขึ้นตาม ทำให้ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายลดลง โดยที่สมดุลของการดูดซับความจุของการดูดซับ

สูงสุดของกากชาสำหรับทองแดงและแคดเมียมทั้งแบบเดี่ยวและคู่ เท่ากับ 8.64 ± 0.53 และ 11.29 ± 0.48 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 6.65 ± 0.31 และ 2.59 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้การเพิ่มประมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้น ในระบบสารละลายที่มีปริมาตรคงที่นั้นทำให้ปริมาณไอออนของโลหะที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณตัวดูซับที่ใช้ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับดังกล่าวเท่ากับเป็นการเพิ่มจำนวนอนุภาคตัวดูดซับที่ดูดติดไอออนของโลหะไว้โดยรอบ หรือการเพิ่มสัดส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคตัวดูดซับกับปริมาณไอออนของโลหะทำให้มีอนุภาคตัวดูดซับที่ดูดติดไอออนของโลหะไว้ที่ผิวของมันได้มากขึ้น ตามลำดับ

ซึ่งสอดคล้องกับ Ajmal et. al. (2006) ที่ศึกษาการใช้หญ้า *Parthenium Hysterophorous* เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสีย รายงานว่าการทดลองใช้ตัวดูดซับปริมาณตั้งแต่ 0.1 – 1 กรัม ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มจาก 92.2 ถึง 99.0 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพราะบริเวณที่ไม่อิ่มตัวที่เหลืออยู่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าบริเวณที่เป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับโลหะมีมากขึ้นจึงเป็นผลให้ปริมาณโลหะแคดเมียมที่ถูกดูดซับรวมมีมากขึ้น รวมทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะแคดเมียมโดยรวมมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

ส่วนการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมในสารละลายได้ไม่แตกต่างกัน($P > 0.05$) เมื่อใช้ในปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม คือ 82.89 ± 1.14 85.88 ± 1.39 87.65 ± 0.39 และ 84.52 ± 2.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพ 12)



ภาพ 12 ผลของปริมาณสารดูดซับที่ใช้ต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

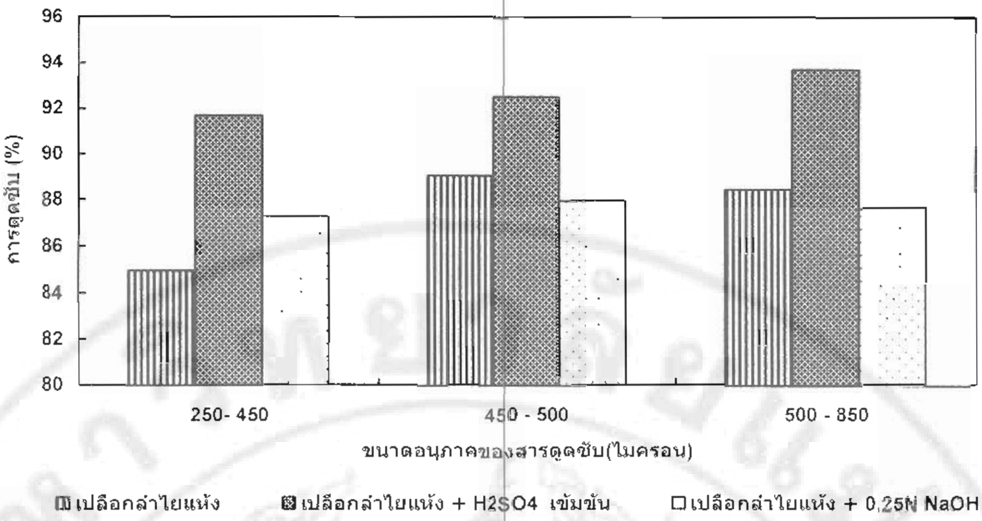
2.4 ผลของขนาดอนุภาคสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคต่าง ๆ กัน คือ 250 - 450 450 – 500 และ 500 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ได้ผลดังนี้ (ภาพ 13)

เปลือกลำไยแห้งขนาด 450 – 500 ไมครอน สามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 89.08 $\pm$ 0.01 เปอร์เซ็นต์ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ($P < 0.05$) กับการใช้เปลือกลำไยแห้งขนาด 500 – 850 และ 250 – 450 ไมครอน ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้มากเป็นอันดับสองและสามตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 88.52 $\pm$ 0.07 และ 84.98 $\pm$ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่การใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น ขนาด 500 – 850 ไมครอน เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้สูงสุดคือ 93.78 $\pm$ 0.02 เปอร์เซ็นต์ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับการใช้เปลือกลำไยแห้งขนาด 450 – 500 และ 250 – 4500 ไมครอน ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้มากเป็นอันดับสองและสามตามลำดับ โดยมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 92.55 $\pm$ 0.02 และ 91.70 $\pm$ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับโลหะแคดเมียมของสารดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดของตัวดูดซับที่ใช้ อันเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการรายงานของ Pino et. al. (2006) รายงานว่าการดูดซับชีวภาพโลหะแคดเมียมของผงเปลือกมะพร้าวเขียว พบว่าการลดลงของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ใช้ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะแคดเมียมลดลง โดย Leusch and Volesky (1995) ให้เหตุผลว่าสิ่งสำคัญที่จะต้องเน้นย้ำคือขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ใหญ่กว่าและมีสัณฐานทรงกลม โดยทั่วไปจะมีการถ่ายเทมวลด้านนอกได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งในกรณีนี้การดูดซับไอออนของโลหะที่สูงกว่าของอนุภาคเหล่านี้ มักเป็นการถ่ายเทมวลภายในอนุภาคของตัวดูดซับ

อย่างไรก็ตามการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ทั้ง 3 ขนาด คือ 250 – 450 450 – 500 และ 500 - 850 ไมครอน เป็นสารดูดซับสามารถดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมในสารละลายได้ไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ สามารถดูดซับได้ 87.28 $\pm$ 0.74 87.98 $\pm$ 0.83 และ 87.68 $\pm$ 0.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการดูดซับโลหะเนื่องจากมีผลกระทบสำคัญด้านต้นทุนการผลิตตัวดูดซับที่เหมาะสม

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับทั้ง 3 ประเภท มีสภาวะที่เหมาะสมที่แตกต่างกันสำหรับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลาย คือเปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้งที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 450 - 500 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ในสารละลายโลหะแคดเมียมปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4

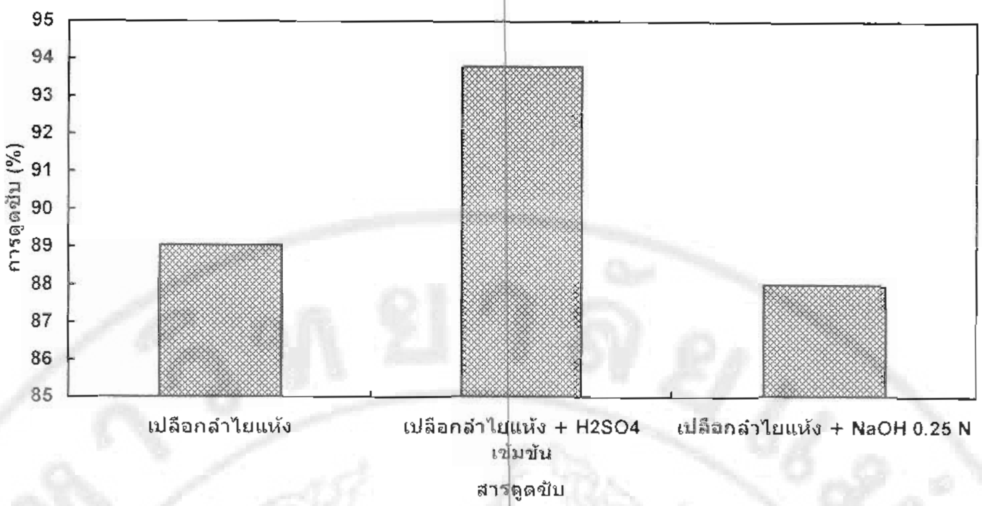


ภาพ 13 ผลของขนาดอนุภาคของสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

ขณะที่เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น ที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 500 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ในสารละลายโลหะแคดเมียมปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4

ส่วนเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล สามารถดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 450 - 500 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ในสารละลายโลหะแคดเมียมปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ตามลำดับ

ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับแต่ละประเภท ยังคงมีประสิทธิภาพในการดูดไอออนของโลหะแคดเมียมที่แตกต่างกันดังนี้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลาย คือ สามารถดูดซับได้ถึง 93.78 $\pm$ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีค่าไม่แตกต่างกัน คือ 89.03 $\pm$ 0.02 และ 87.98 $\pm$ 0.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ภาพ 14)



ภาพ 14 การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภทที่สภาวะที่เหมาะสม

3. การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลาย

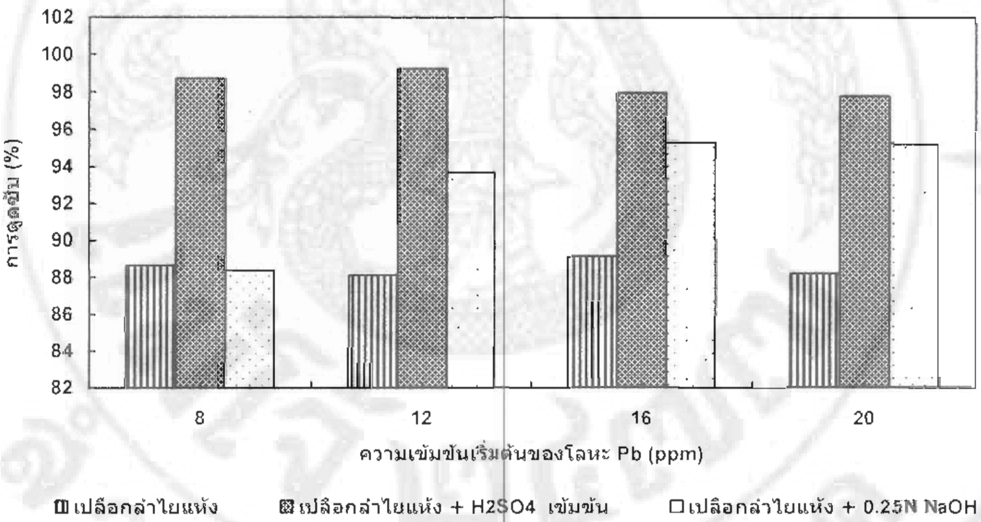
การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 2 4 6 และ 8 โดยใช้เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ขนาดต่าง ๆ คือ 250 – 450 ไมครอน 450 – 500 ไมครอน และ 500 – 850 ไมครอน ปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม เป็นสารดูดซับ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะ ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะ ขนาดอนุภาคและปริมาณของสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะในระบบสารละลายของสารดูดซับทั้ง 3 ประเภท ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง (25 ± 0.3 องศาเซลเซียส) ได้ผลดังนี้

3.1 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วต่าง ๆ กัน คือ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ได้ผลดังนี้ (ภาพ 15)

เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ได้ไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ 88.65 ± 0.16 88.12 ± 0.18 89.12 ± 0.17 และ 88.19 ± 0.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เช่นเดียวกับการใช้เปลือกลำไยแห้ง+ H_2SO_4 เข้มข้น เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วทั้ง 4 ระดับดังกล่าวข้างต้นได้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยสามารถดูดซับ

ไอออนของโลหะตะกั่วได้เท่ากับ 98.72 ± 0.47 99.22 ± 0.40 97.93 ± 0.70 และ 97.77 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ได้ไม่ต่างกัน คือ 93.71 ± 0.32 95.33 ± 0.27 และ 95.22 ± 0.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว ของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ในสารสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 พีพีเอ็ม ที่มีค่าต่ำสุด คือ 88.36 ± 1.07 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันของตัวดูดซับแต่ละชนิด พบว่า เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้ดีกว่าสารดูดซับชนิดอื่น ๆ ในทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วในสารละลาย โดยสามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้มากขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเพิ่มจาก 8 เป็น 12 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารละลายเพิ่มจาก 12 เป็น 16 และ 20 พีพีเอ็ม ตามลำดับ



ภาพ 15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

ขณะที่การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 12 และ 16 พีพีเอ็ม ตามลำดับ แต่มีแนวโน้มเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 16 เป็น 20 พีพีเอ็ม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วกับการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีแนวโน้มคล้ายกันกับผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ

สารละลายโลหะกับการดูดซับโลหะแคดเมียมของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด และการรายงานของ Katsumata et. al. (2003) ที่ได้อ้างไว้ในตอนต้น

Singh et. al. (2006) รายงานว่า การกำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกข้าวโพดที่เป็นของเสียจากการเกษตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่ค่อนข้างสูงของโลหะตะกั่วในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 125 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลายลดลงจาก 96.8 เป็น 92.0 และ 85.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม Bayramoglu et. al. (2006) รายงานว่า ความจุของการดูดซับของเซลล์สาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* ที่ถูกตรึงไว้ใน Alginate bead สำหรับโลหะตะกั่ว มีค่ามากกว่า โลหะแคดเมียม และปรอท ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Yan Hui et. al. (2003) ที่ระบุว่า Multiwalled cabon nanotubes สามารถดูดซับ (แบบแข่งขัน) ไอออนของโลหะ $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Cd^{2+}$ ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงกว่าการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมเมื่ออยู่ในสภาวะเดียวกัน

จากการศึกษา Adsorption Isotherm ของโลหะตะกั่วของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า Adsorption Affinity/ Strange สำหรับตะกั่วของเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีค่าสูงสุด คือ 21.1416 ลิตรต่อมิลลิกรัม รองลงมา คือ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล และ เปลือกลำไยแห้ง มีค่าเท่ากับ 0.6575 และ 0.0322 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (ตาราง) ที่อาจเป็นปัจจัยที่ทำให้ลำดับการดูดซับโลหะตะกั่วของสารดูดซับทั้ง 3 ชนิด จากมากไปน้อย คือ เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล และเปลือกลำไยแห้ง ตามลำดับ

3.2 ผลของความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายต่าง ๆ กัน คือ 2 4 6 และ 8 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ได้ผลดังนี้ (ภาพ 16)

เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้สูงสุดในสารละลายที่มีความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 4 คือสามารถดูดซับได้ 88.19 ± 0.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้งในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 ซึ่งมีค่ารองลงมาเป็นอันดับสอง ขณะที่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 6 และ 2 เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้มากตามมาเป็นอันดับสามและสี่ ตามลำดับ คือ 79.09 ± 0.41 42.16 ± 0.23 และ 46.31 ± 0.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ขณะที่การใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ได้สูงสุด คือ 97.77 ± 0.63 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 และ 6 ที่สามารถดูดซับได้ไม่แตกต่างกัน คือ 89.37 ± 0.21 และ 88.67 ± 0.45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเป็นอันดับสอง และมีค่ามากกว่าการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 2 ที่สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ต่ำสุด อย่างมีนัยสำคัญ คือ 51.19 ± 1.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

และการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ได้สูงสุด คือ 88.36 ± 1.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) กับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 คือ 82.33 ± 1.02 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($P < 0.05$) กับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด - ด่าง เท่ากับ 6 และ 2 ที่มีค่ารองลงมาเป็นอันดับสองและสาม คือ 48.52 ± 0.76 และ 41.72 ± 2.56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

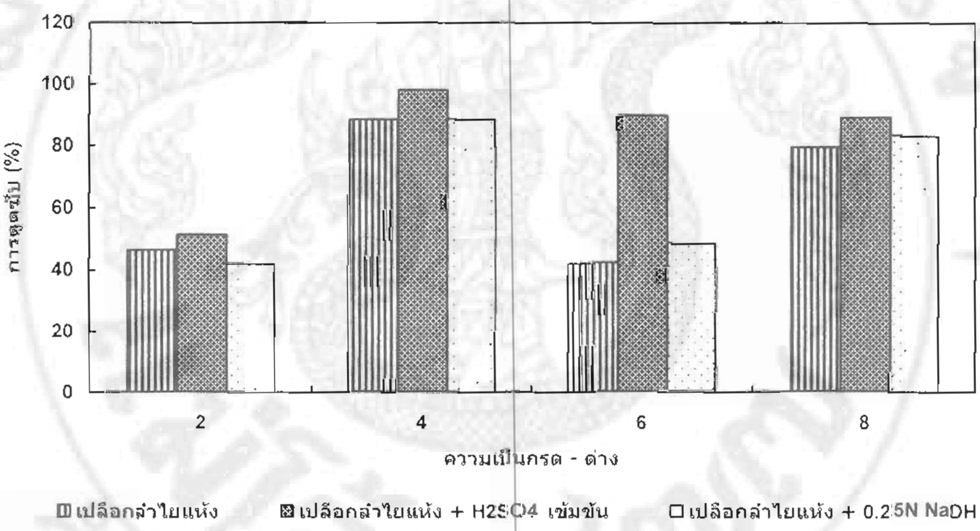
จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าผลของความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายต่อการดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด นั้นมีลักษณะที่คล้ายกับผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว คือ การดูดซับโลหะตะกั่วของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีค่าสูงสุดที่ความเป็นกรด – ด่างของสารละลายมีค่าเท่ากับ 4 และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความเป็นกรด – ด่าง อื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องความเป็นกรด – ด่าง เป็นปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญยิ่งต่อทั้งพื้นที่ดูดติดของตัวดูดซับ เคมีของสารละลายโลหะ การแตกตัว การเกิดสารอินทรีหรืออนินนทรีที่ทำหน้าที่ดูดติด ปฏิกิริยารีดอกซ์ รวมทั้งการตกตะกอนของโลหะ (Esposito et.al., 2002)

ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sekar et. al (2006) ที่รายงานว่าในการศึกษาจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับตะกั่วของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวในสารละลายที่มีความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4.5 สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด สำหรับความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายที่สูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้มีการดูซับตะกั่วได้ค่อนข้างต่ำ

ทั้งนี้ในสภาพที่ความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายมากกว่า 5.5 โลหะตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนในรูปของตะกั่วออกไซด์ ในสภาพที่เป็นกรดผิวของตัวดูดซับจะมีรสภาพเป็นประจุบวก และไม่สามารถดูดซับไอออนของตะกั่วในรูป Pb^{2+} และ $Pb(OH)^+$ ได้ดีเท่าที่ควรเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างพื้นผิวตัวดูดซับและไอออนของโลหะตะกั่วที่มีประจุเหมือนกัน Singh et. al. (2006) รายงานว่าการกำจัดตะกั่วออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร พบว่าเมื่อความเป็นกรด - ด่าง ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 3.2 ถึง 6.5 การดูดซับโลหะตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 23.6 ถึง 96.8 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงจาก 96.8 ถึง 31.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 6.5 ถึง 8.0 ถ้าหากอธิบายบนพื้นฐานธรรมชาติของตัวดูดซับที่ประกอบด้วยโลหะออกไซด์ที่หลากหลาย ซึ่งโลหะออกไซด์เหล่านี้เมื่อผสมรวมกับสารละลายโลหะตะกั่วแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาไฮดรอก

ซิเลชันเกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับเกิดเป็นประจุบวกหรือลบ อันเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในรูปของกรดหรือเบสในเวลาต่อมา ซึ่งที่ระดับความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายโลหะตะกั่วน้อยกว่า 6.5 ไอออนของโลหะตะกั่วจะปรากฏในรูปอิสระ ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด แต่ที่ความเป็นกรด – ด่าง สูงกว่า 6.5 โลหะตะกั่วปรากฏอยู่ในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์นานาชนิดอันเป็นผลให้การดูดซับลดลงอย่างต่อเนื่อง (Bancroft, 1986)

นอกจากนี้ Lee et. al. (1998) ที่ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้เศษแอปเปิ้ลรายงานว่าในสภาพที่ความเป็นกรด – ด่าง ระหว่าง 3 – 4 หมู่ Carboxylic group ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญสำหรับการดูดติดโลหะในซากอินทรีย์ จะสูญเสียโปรตอนและมีประจุเป็นลบดังนั้นจึงทำให้เกิดการดึงดูดประจุบวกของโลหะได้มากยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับตะกั่วที่ระดับความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 2 และ 6 มีค่าต่ำกว่าความเป็นกรด – ด่างที่ระดับอื่น ๆ



ภาพ 16 ผลของความเป็นกรด – ด่าง ของสารละลายโลหะตะกั่วต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

3.3 ผลของปริมาณสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว

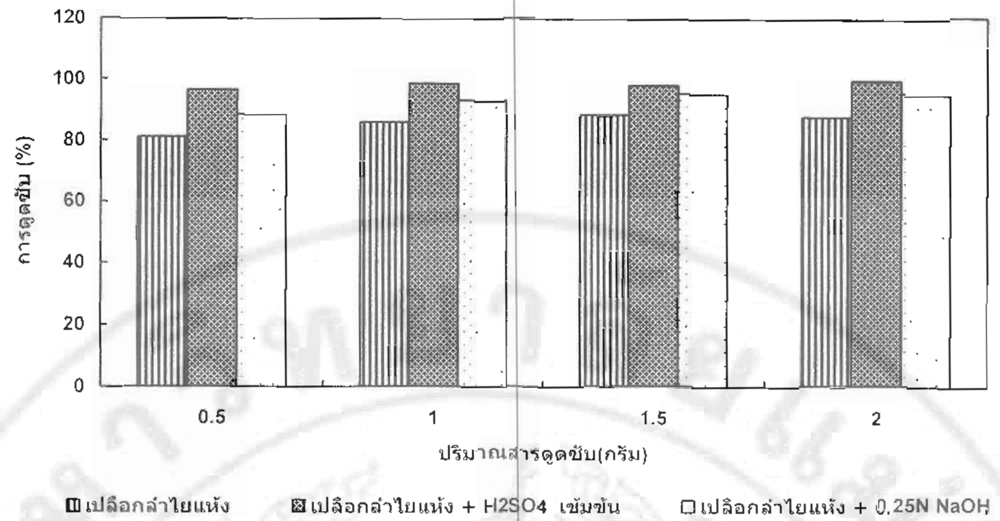
การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาค 250 – 850 ไมครอน ปริมาณต่าง ๆ กัน คือ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม ได้ผลดังนี้ (ภาพ 17)

เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้สูงสุดและไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) เมื่อถูกใช้ในปริมาณ 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม คือสามารถดูดซับได้ 85.73 ± 1.59 88.19 ± 0.64 และ

87.38 ± 0.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้งที่ใช้ในปริมาณ 0.5 กรัม ที่สามารถดูดซับได้ เท่ากับ 80.37 ± 1.13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายกันกับการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับในปริมาณต่าง ๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือ 1.5 และ 2.0 กรัม สามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วได้สูงสุดและไม่แตกต่างกัน คือ 95.15 ± 0.44 และ 95.17 ± 0.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นสารดูดซับในปริมาณ 1.0 และ 0.5 กรัม สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้รองลงมาเป็นอันดับสอง และ สาม คือ 92.81 ± 0.34 และ 88.36 ± 0.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ถึงแม้ว่าจะไม่ชัดเจนมากนัก เนื่องจากการใช้ตัวดูดซับบางประเภทที่มีแนวโน้มของการดูดซับโลหะตะกั่วเริ่มคงที่เมื่อใช้ในปริมาณ 1-2 กรัม หรืออาจไม่มีความแตกต่างกันเลยเมื่อใช้ เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นสารดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sekar et. al. (2004) ที่รายงานว่าการศึกษาจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับของตะกั่วโดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับในสารละลายโลหะตะกั่วที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กันนั้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลายเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อถึงระดับปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม ถึงแม้ว่าปริมาณตัวดูดซับที่ใช้จะเพิ่มเกินกว่าระดับดังกล่าวเพียงใดก็ตาม ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลายจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วคงที่ แล้วมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ใช้นั้นจะทำให้เกิดพื้นที่ผิวมากกว่าหรือบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดติดโลหะตะกั่วเพิ่มมากขึ้นด้วย (Rengaraj and Moon, 2002)

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองข้างต้นจะพบว่าการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของการใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นเป็นตัวดูดซับมีค่าสูงสุดในทุกระดับของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับประเภทอื่น โดยสามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายได้ไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) เมื่อถูกใช้ในปริมาณ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 กรัม คือสามารถดูดซับได้ 96.38± 0.0.18 98.31 ± 0.42 97.77± 0.23 และ 99.26 ± 0.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Nadeem et. al. (2006) รายงานว่าความแตกต่างในประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะออกจากสารละลายของไอออนโลหะต่างชนิดกันภายใต้สภาวะเดียวกัน นั้นขึ้นกับความแตกต่างในความสามารถการดึงดูดทางเคมีหรือความจุของการแลกเปลี่ยนประจุของโลหะชนิดนั้น ๆ ต่อหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ แต่หากเป็นโลหะชนิดเดียวกัน ความเด่นของบริเวณดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษา Adsorption Isotherm ที่พบว่าค่า Adsorption Affinity/ Strange สำหรับตะกั่วของเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีค่าสูงสุด คือ 21.1416 ลิตรต่อมิลลิกรัม ที่น่าจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับแบบอื่น ๆ



ภาพ 17 ผลของปริมาณสารดูดซับที่ใช้ต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

3.4 ผลของขนาดอนุภาคสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว

การทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 20 พีพีเอ็ม ที่มีค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายเท่ากับ 4 โดยสารดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคต่าง ๆ กัน คือ 250 - 450 450 – 500 และ 500 - 850 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ได้ผลดังนี้ (ภาพ 18)

เปลือกลำไยแห้งขนาด 450 – 500 และ 500 - 850ไมครอน สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้สูงสุดและไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ 89.74 ± 0.02 และ 89.18 ± 0.027 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับการใช้เปลือกลำไยแห้งขนาด 250 – 450 ไมครอน เป็นสารดูดซับที่สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ เท่ากับ 85.64 ± 0.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มในทางตรงกันข้ามกับ Sekar et al. (2006) ที่รายงานว่าในการศึกษาจลนศาสตร์ และสมดุลของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ 75 – 850 ไมครอน เป็นตัวดูดซับโลหะตะกั่วในสารละลายความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้การดูดซับโลหะตะกั่วลดลงตามขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นจาก 99 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการส่งเสริมให้เกิดกระบวนการดูดซับโลหะตะกั่วให้มากขึ้นทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ที่จำเพาะต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว ซึ่งในกรณีนี้ตัวดูดซับที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่จำเพาะต่อการดูดซับโลหะตะกั่วมากกว่าตัวดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้ตัวดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ยังมีความต้านทานการถ่ายเทมวลเข้าสู่บริเวณภายในอนุภาคโดยการแพร่มากกว่าตัวดูดซับที่มีอนุภาค

ขนาดเล็ก และพื้นที่ภายในอนุภาคส่วนใหญ่ไม่เป็นประโยชน์สำหรับการดูดซับจึงทำให้ปริมาณโลหะตะกั่วที่ถูกดูดติดกับตัวดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่มีน้อยกว่าตัวดูดซับที่มีอนุภาคขนาดเล็ก

นอกจากนี้ Bulet and Baysal (2006) รายงานว่าการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียโดยใช้เปลือกข้าวสาลีเป็นตัวดูดซับ พบว่า การดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้เปลือกข้าวสาลีขนาด 500 1,000 และ 1,500 ไมครอน เป็นตัวดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียมีค่าลดลงตามขนาดของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น คือ 98.35 96.43 และ 93.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวมีแนวโน้มตามพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาคที่ลดลง ดังนั้นการดูดซับโลหะตะกั่วในกรณีนี้จึงเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกของอนุภาคตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นรูพรุน (Non – porous) (Al – Asheh and Duvnjak, 1998)

ขณะที่การใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น ขนาด 250 - 450 450 – 500 และ 500 – 850 ไมครอน เป็นสารดูดซับ สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ไม่ต่างกัน ($P > 0.05$) คือ 98.52 ± 0.55 97.39 ± 0.48 และ 98.28 ± 0.52 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เช่นเดียวกับการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ทั้ง 3 ขนาด คือ 250 – 450 450 – 500 และ 500 – 850 ไมครอน เป็นสารดูดซับสามารถดูดซับไอออนโลหะตะกั่วในสารละลายได้ไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) คือ สามารถดูดซับได้ 92.41 ± 1.08 93.27 ± 1.25 และ 92.93 ± 1.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแนวโน้มของผลของขนาดอนุภาคตัวดูดซับต่อการดูดซับของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ยังคงไม่ชัดเจนเท่าที่ควร

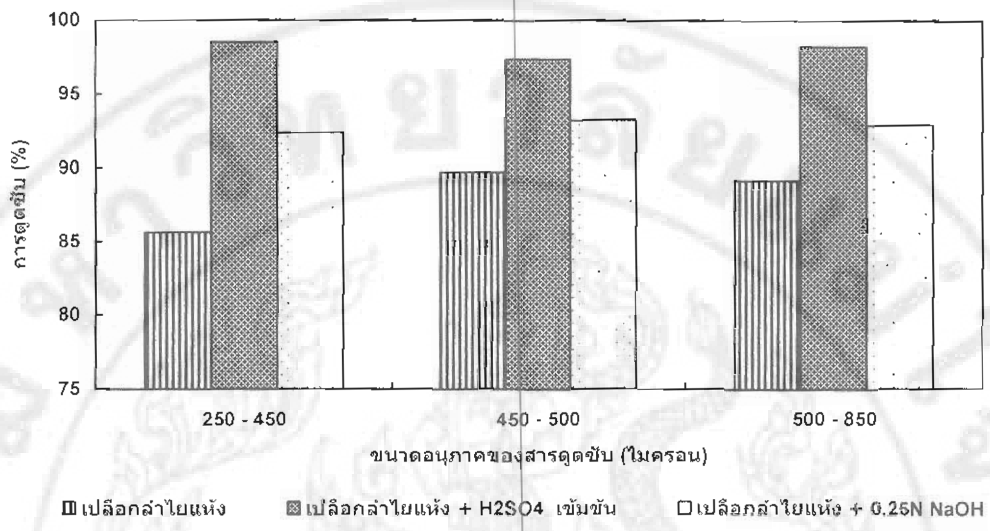
จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าเปลือกลำไยทั้ง 3 ประเภท ที่ใช้เป็นสารดูดซับ มีสภาวะที่เหมาะสมที่แตกต่างกันสำหรับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลาย คือ เปลือกลำไยแห้งสามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้งที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 450 - 500 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ในสารละลายโลหะตะกั่วปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 16 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4

ขณะที่เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น ที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 250 - 450 ไมครอน ปริมาณ 2.0 กรัม ในสารละลายโลหะตะกั่วปริมาณ 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 12 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4

ส่วนเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วได้ดีที่สุดเมื่อใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากับ 450 - 500 ไมครอน ปริมาณ 1.5 กรัม ในสารละลายโลหะตะกั่ว 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ16 พีพีเอ็ม ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ตามลำดับ

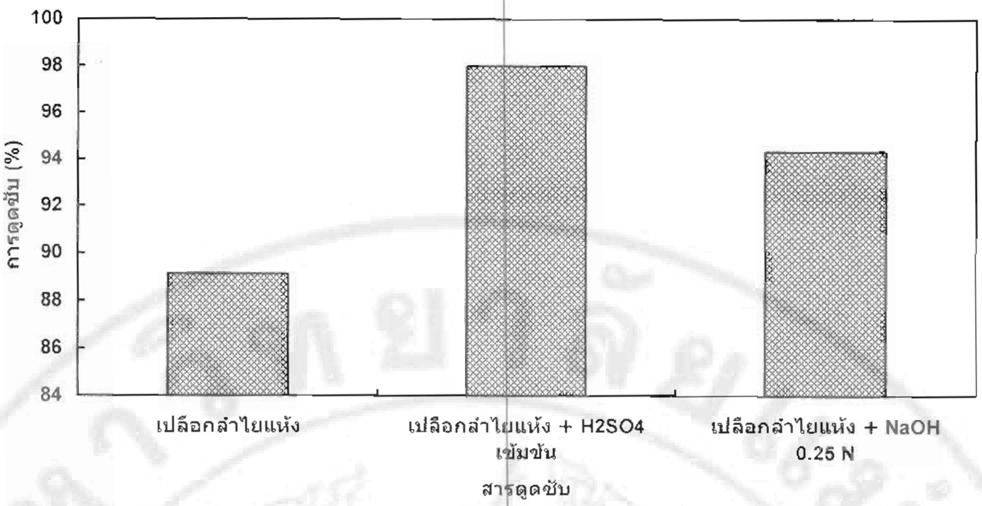
ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับแต่ละประเภทยังคงสามารถดูดไอออนของโลหะตะกั่วที่แตกต่างกันดังนี้ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายได้สูงสุด คือ สามารถดูดซับได้ถึง 98.00 ± 1.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อ

เปรียบเทียบกับการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล คือ 94.36 ± 0.01 เปอร์เซ็นต์ ที่มีค่าเป็นอันดับสอง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเปลือกลำไยแห้ง ที่สามารถดูดซับได้ 87.98 ± 0.83 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุด (ภาพ 19)

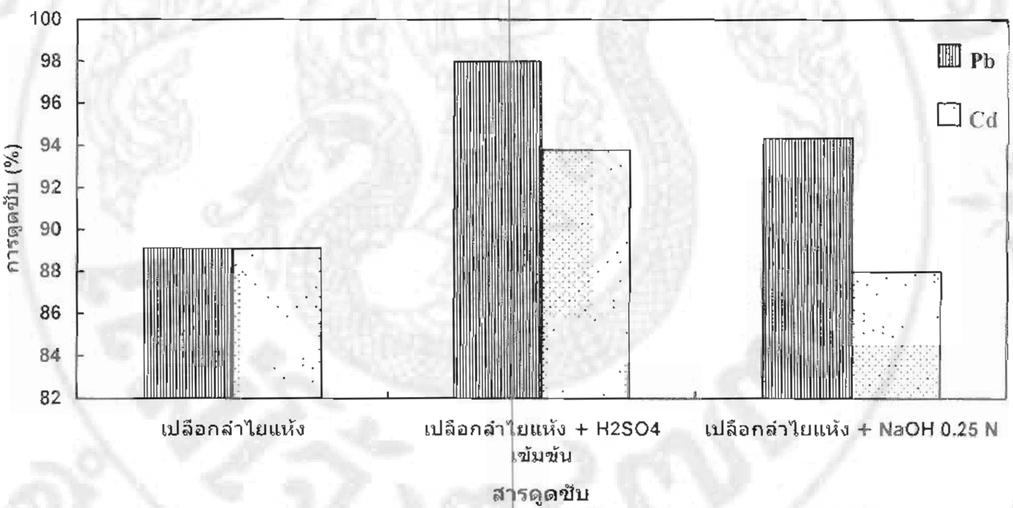


ภาพ 18 ผลของขนาดอนุภาคของสารดูดซับต่อการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภท

อย่างไรก็ตามการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมหรือตะกั่วภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของเปลือกลำไยทั้ง 3 ประเภทนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือ เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น สามารถดูดซับไอออนของตะกั่วได้มากที่สุดคือ 98.0 ± 1.39 เปอร์เซ็นต์ และสามารถดูดไอออนของแคดเมียมได้เป็นอันดับสอง คือ 94.36 ± 0.01 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างกับการดูดซับไอออนของแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ขณะที่การดูดซับไอออนของแคดเมียม และตะกั่วของเปลือกลำไยแห้งมีค่าเท่ากับ 89.08 ± 0.02 และ 89.12 ± 0.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งไม่แตกต่างกับการดูดซับไอออนของแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ที่มีค่าเท่ากับ 87.98 ± 0.83 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าต่ำสุด



ภาพ 19 การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภทที่สภาวะที่เหมาะสม



ภาพ 20 การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมหรือตะกั่วของเปลือกลำไยที่ใช้เป็นสารดูดซับ 3 ประเภทที่สภาวะที่เหมาะสม

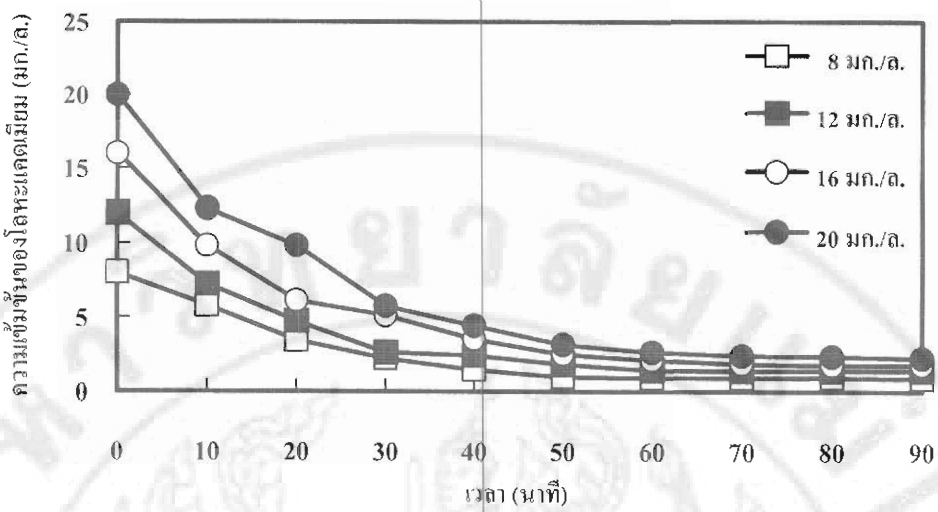
4. การศึกษา Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการแตกต่างกัน 3 วิธี

4.1 การศึกษาสมดุลการดูดซับ

การทดลองใช้เปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 0.3 องศาเซลเซียส) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม แล้วตรวจหาความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายทุก 10 นาที จนครบระยะเวลาที่กำหนด พบว่า

ชุดการทดลองที่ใช้เปลือกลำไยแห้งเป็นตัวดูดซับ ในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 0 – 40 และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในนาทีที่ 50 – 90 (ภาพ 7) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในนาทีที่ 50 – 90 ของการทดลอง โดยความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่สมดุลของการดูดซับในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม คือ 0.92 1.43 1.91 และ 2.45 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ภาพ 21) ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ คือ ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 0 – 40 และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในนาทีที่ 50 – 90 ซึ่งแสดงถึงการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล และ ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่สมดุลของการดูดซับในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม คือ 0.83 1.34 1.73 และ 2.29 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ภาพ 23)

อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เป็นตัวดูดซับ ในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมในสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 0 – 60 และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในนาทีที่ 60 – 90 (ภาพ 7) ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในนาทีที่ 60 – 90 ของการทดลอง โดยความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่สมดุลของการดูดซับในสารละลายโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม คือ 0.37 0.76 1.18 และ 1.25 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ภาพ 22) ซึ่งสอดคล้องกับ Singh et. al. (2006) ที่รายงานว่าการใช้เปลือกข้าวสาลีเป็นตัวดูดซับชีวภาพต้นทุนต่ำเพื่อกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสีย โดยศึกษาถึงจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับ พบว่า ในการทดลองการดูดซับโลหะแคดเมียมความเข้มข้นเริ่มต้นระดับต่าง ๆ คือ 1.0 12.5 และ 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามช่วงเวลา ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 8 นั้น ได้ผลดังนี้ การดูดซับโลหะตะกั่วเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลองจากนั้นจะเริ่มช้าลงและเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในช่วงปลายของการทดลอง โดยระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับของเปลือกข้าวสาลีเท่ากับ 110 นาที



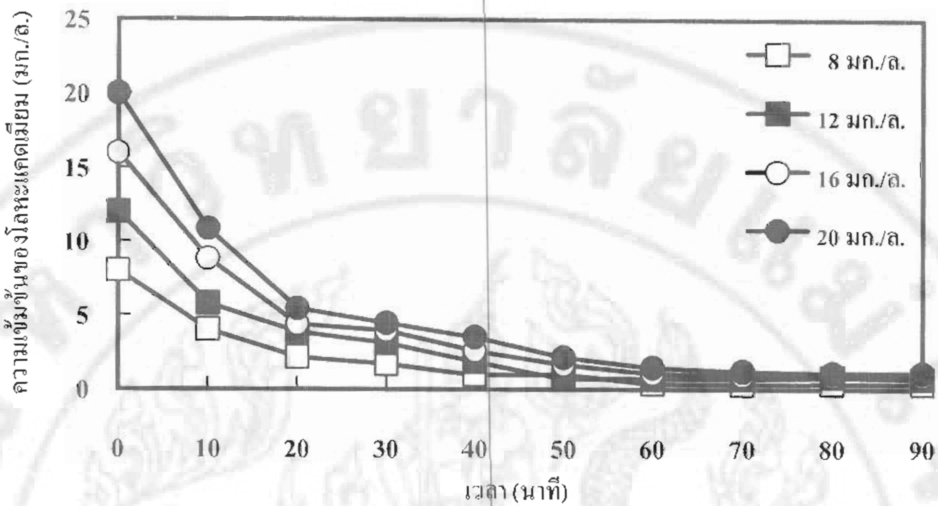
ภาพ 21 การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยแห้งในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 การศึกษา Langmiur Isotherm

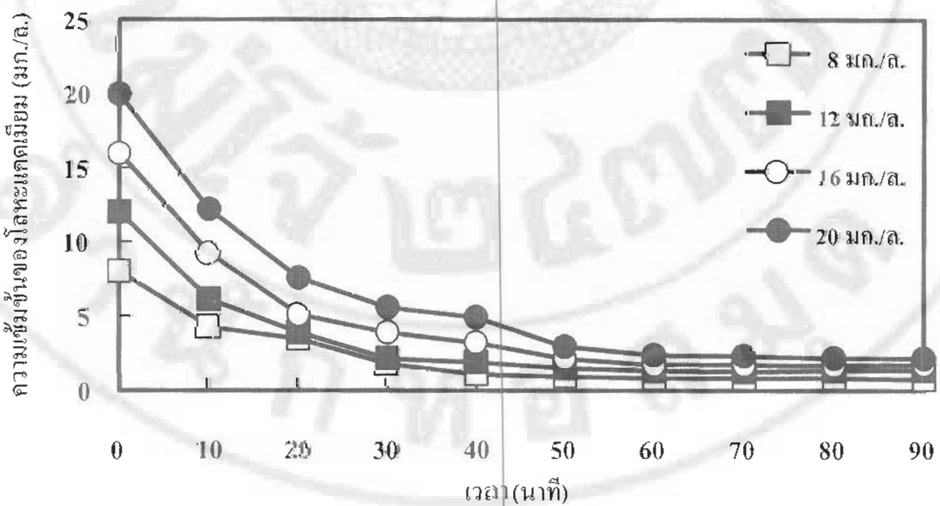
เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมดุลของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด ไปเปรียบเทียบกับ Langmiur adsorption Isotherm เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่มีการเกาะติดของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) แบบชั้นเดียว แล้วคำนวณหาความจุสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) ไอออนของโลหะแคดเมียม และ ค่าคงที่ไอโซเทอร์ม (b) ซึ่งหาได้จากความชันและจุดตัดแกน Y ของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัดส่วนของความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมและปริมาณโลหะแคดเมียมที่ถูกดูดซับที่สมดุลของการดูดซับกับความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่สมดุลของการดูดซับ พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นของการใช้เปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมดังแสดงไว้ในภาพ 24

ค่าของสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมและปริมาณโลหะแคดเมียมที่ถูกดูดซับที่สมดุลของการดูดซับ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโลหะแคดเมียมที่สมดุลของการดูดซับ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นของการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ มีความเหมาะสมกับ Langmiur adsorption Isotherm มากที่สุด (R^2 = 0.9832) รองลงมา คือ เปลือกลำไยแห้ง (R^2 = 0.9177) และเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีความเหมาะสมน้อยสุด (R^2 = 0.6908) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความจุสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) ไอออนของโลหะแคดเมียม และ ค่าคงที่ไอโซเทอร์ม อันเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะดูดติดของการใช้เปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม มีค่าเท่ากับ 5.7405 1.2680 และ 3.5273 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.0463

0.6232 และ 0.0872 ลิตรต่อมิลลิกรัม สำหรับ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ตามลำดับ (ตาราง 3)

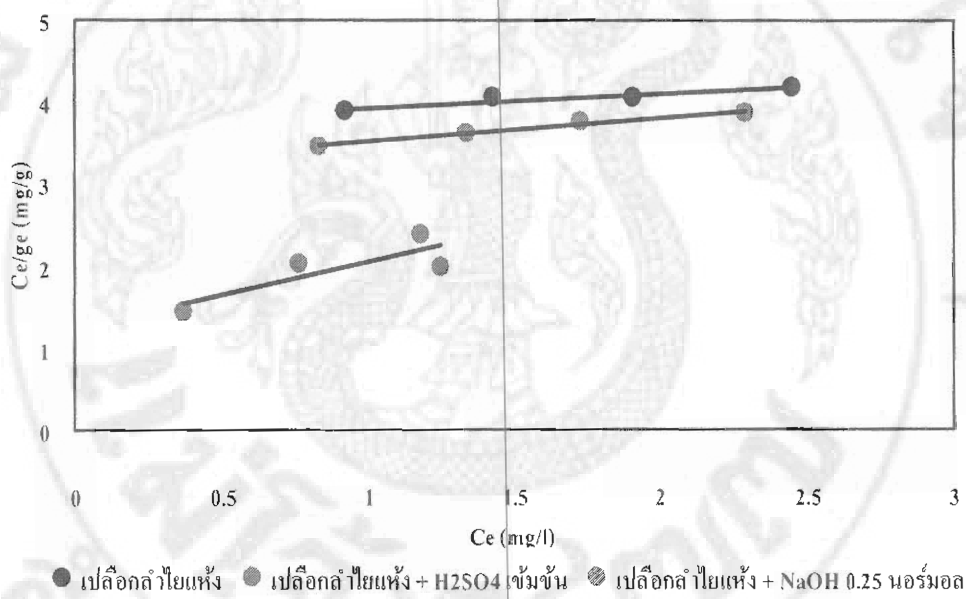


ภาพ 22 การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพ 23 การดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25นอร์มอล เข้มข้นในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองข้างต้นที่สภาวะที่เหมาะสมของการดูดติดของเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากสารละลาย รองลงมา คือ เปลือกลำไยแห้ง และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล มีค่าต่ำสุด นั่นอาจเป็นเพราะตัวดูดซับที่มีความแข็งแกร่งของพันธะดูดติดที่มีค่าสูงมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดมากกว่าความจุสูงสุดของการดูดซับ อย่างไรก็ตามในกรณีที่ตัวดูดซับที่มีความแข็งแกร่งของพันธะดูดติดใกล้เคียงกัน เช่น เปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ความจุสูงสุดของการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีผลทำให้เกิดความแตกต่างในประสิทธิภาพของการดูดติด อันเป็นผลให้เปลือกลำไยแห้ง มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากสารละลายมากกว่าเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล



ภาพ 24 แผนภูมิ Langmiur Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไย 3 ชนิด ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่เหมาะสม คือ ขนาดอนุภาค 450 – 500 500 – 850 และ 450 – 500 ไมครอน สำหรับ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ตามลำดับ ปริมาณ 1.5 กรัม ดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4

ตาราง 3 ค่าคงที่ของ Langmiur adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมโดยเปลือกลำไยที่เตรียมจากวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี

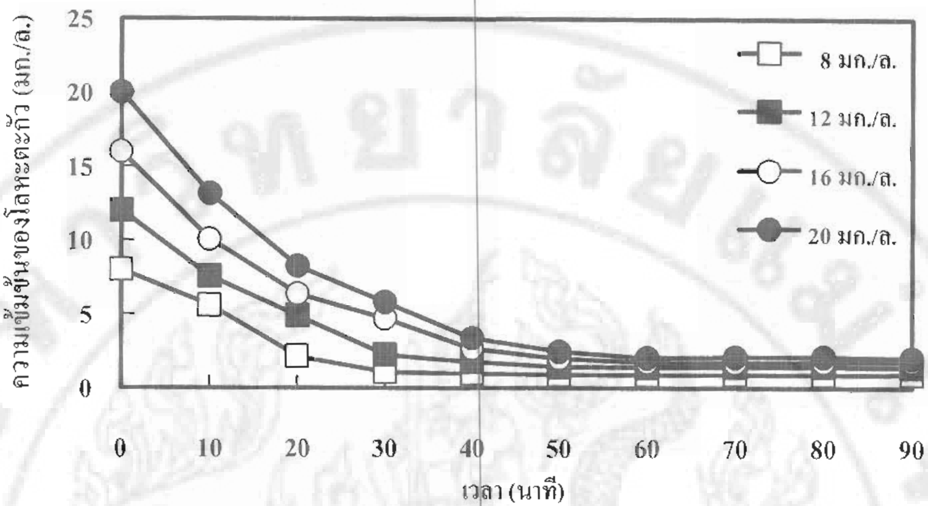
ตัวดูดซับ	Q^0(มก./ก.)	b (มก./ล.)	R^2
เปลือกลำไยแห้ง	5.7405	0.0463	0.9177
เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น	1.2680	0.6232	0.6908
เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล	3.5273	0.0872	0.9832

5. การศึกษา Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการแตกต่างกัน 3 วิธี

5.1 การศึกษาสมดุลของการดูดซับ

การทดลองใช้เปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายโลหะตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 0.3 องศาเซลเซียส) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม แล้วตรวจหาความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารละลายทุก 10 นาที จนครบระยะเวลาที่กำหนด พบว่าชุดการทดลองที่ใช้เปลือกลำไยแห้งและ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ ในสารละลายโลหะตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะตะกั่วไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 0 – 50 และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในนาทีที่ 50 - 90 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายโลหะตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในนาทีที่ 50 – 90 ของการทดลอง โดยความเข้มข้นของโลหะตะกั่วที่สมดุลของการดูดซับในสารละลายโลหะตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม คือ 0.87 1.32 1.78 และ 2.26 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ภาพ 25 และ27) อย่างไรก็ตามชุดการทดลองที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เป็นตัวดูดซับ ในสารละลายโลหะตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะตะกั่วไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเข้มข้นของโลหะตะกั่วในสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในนาทีที่ 0 – 60 และเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในนาทีที่ 60 – 90 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายโลหะตะกั่วที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นทั้ง 4 ระดับ เริ่มเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในนาทีที่ 60 – 90 ของการทดลอง โดยความเข้มข้นของโลหะตะกั่วที่สมดุลของการดูดซับในสารละลายโลหะตะกั่วความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม คือ 0.010 0.018 0.028 1.18 และ 0.038 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ภาพ 26) Fiol et. al. (2006) รายงานว่าการดูดซับโลหะตะกั่ว นิเกิล ทองแดง และแคดเมียม จากสารละลายโดยเปลือกหุ้มเมล็ดมะกอกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะประมาณ 2.0 x 10^{-4} มิลลิโมลต่อลิตร ความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 5.5 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโลหะเทียบกับเวลา แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกการดูดซับโลหะชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 20 นาที และช่วงที่สองการดูดซับค่อย ๆ

ช้าลงใน 40 นาที ถัดมาจนกระทั่งเข้าสมดุลของการดูดซับ ซึ่งในช่วงแรกที่มีการดูดซับอย่างรวดเร็ว อาจเนื่องมาจากในช่วงแรกบริเวณแอคทีฟไซท์สำหรับการดูดติดโลหะที่ผิวของตัวดูดซับยังว่างอยู่ และต่อมาเมื่อมีการดูดติดเกิดได้ระยะเวลาหนึ่งบริเวณดังกล่าวเหลือน้อยลงทำให้การดูดซับในช่วงถัดมาเกิดขึ้นช้าลง

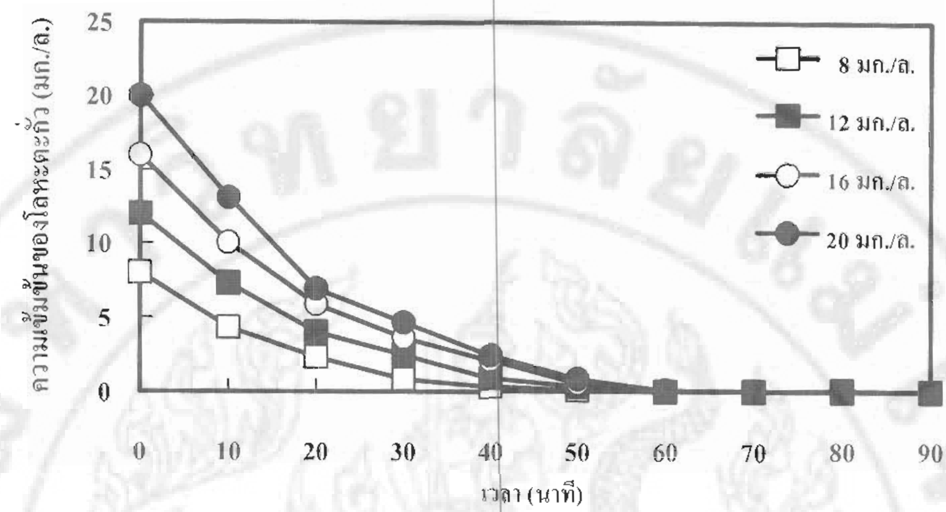


ภาพ 25 การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยแห้งในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

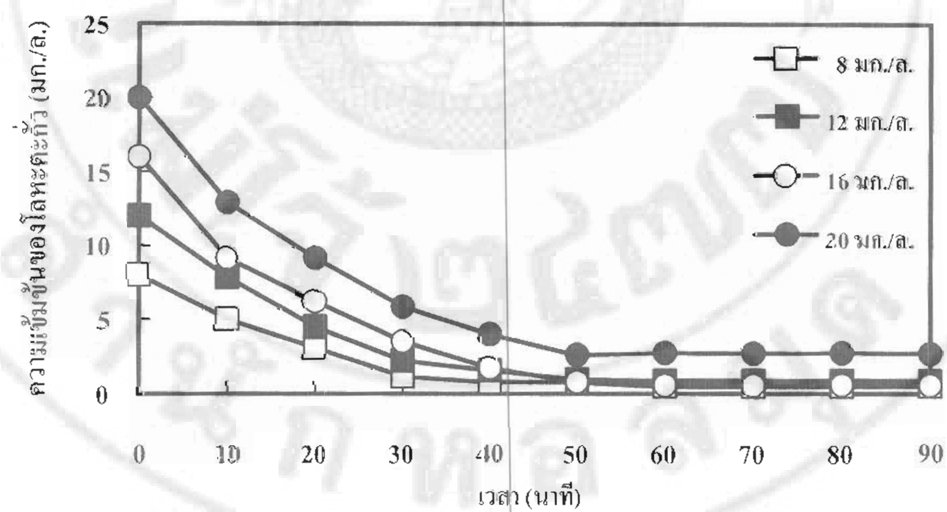
5.2 การศึกษา Langmiur Isotherm

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมดุลของการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่ว โดยเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด ไปเปรียบเทียบกับ Langmiur adsorption Isotherm เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับที่มีการเกาะติดของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) บนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) แบบชั้นเดียว แล้วคำนวณหาความจุสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) ไอออนของโลหะตะกั่ว และ ค่าคงที่ไอโซทอร์ม (b) ซึ่งหาได้จากความชันและจุดตัดแกน Y ของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัดส่วนของความเข้มข้นของโลหะตะกั่ว และปริมาณโลหะตะกั่วที่ถูกดูดซับที่สมดุลของการดูดซับกับความเข้มข้นของโลหะตะกั่วที่สมดุลของการดูดซับ พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นของการใช้เปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วดังแสดงไว้ในภาพ 28 และ 15 ตามลำดับ โดยค่าของสัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของโลหะตะกั่วและปริมาณโลหะตะกั่วที่ถูกดูดซับที่สมดุลของการดูดซับ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของโลหะตะกั่วที่สมดุลของการดูดซับ โดยความสัมพันธ์เชิงเส้นของการใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ มีความเหมาะสมกับ Langmiur adsorption Isotherm มากที่สุด (R^2 = 0.9934) รองลงมา คือ เปลือกลำไยแห้ง (R^2 = 0.9177) และเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีความเหมาะสมน้อยสุด (R^2 = 0.9862) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความจุสูงสุดของการดูดซับ (Q^0) ไอออนของโลหะตะกั่ว และ ค่าคงที่ไอโซเทอร์มของการใช้เปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะ

ตะกั่วมีค่าเท่ากับ 8.7034 1.0075 และ 1.4766 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.0322 21.1416 และ 0.6575 ลิตรต่อมิลลิกรัม สำหรับ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ตามลำดับ (ตาราง 4)



ภาพ 26 การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้นในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพ 27 การดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เข้มข้นในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 8 12 16 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองข้างต้นที่สภาวะที่เหมาะสมของการดูดติดของเปลือกลำไยทั้ง 3 ชนิด เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลาย รองลงมาคือ เปลือกลำไยแห้ง และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล มีค่าต่ำสุด ซึ่งประสิทธิภาพในการ

กำจัดโลหะตะกั่วออกจากสารละลายนี้ มีค่าแปรผันตามความแข็งแกร่งของพันธะดูดติดของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด นั่นอาจเป็นเพราะตัวดูดซับที่มีความแข็งแกร่งของพันธะดูดติดมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดมากกว่าความจุสูงสุดของการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด

6. การกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์โดยใช้เปลือกลำไยเป็นสารดูดซับ

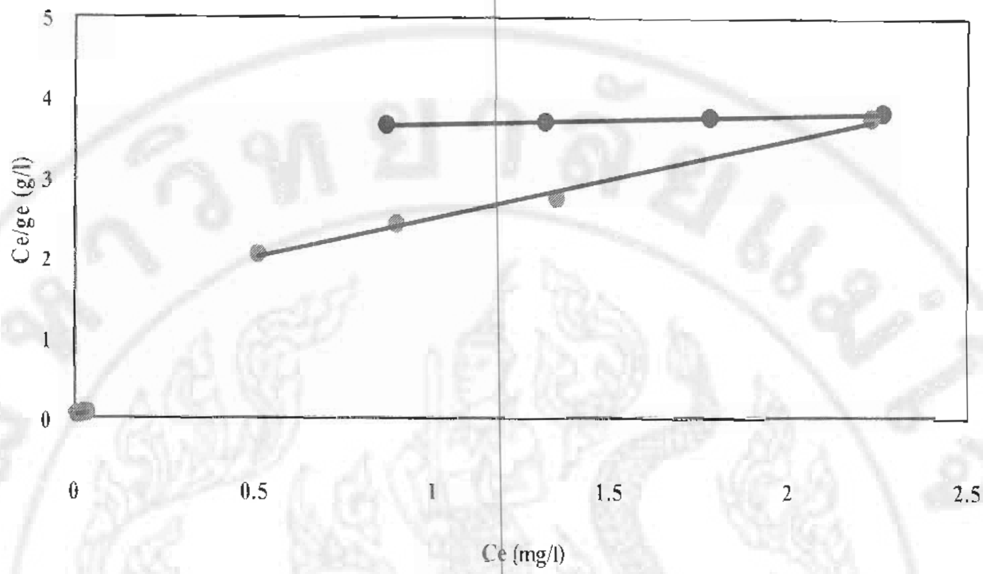
การกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ของคณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มีคุณภาพน้ำทางเคมีและกายภาพบางประการดังนี้ ค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 1.95 ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 8,000 ไมโครซีเมนท์ต่อเซนติเมตร ปริมาณของแข็งละลายน้ำรวม เท่ากับ 3,000 พีพีเอ็ม ซีโอดี เท่ากับ 392 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณโลหะแคดเมียม เท่ากับ 6.40 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตาราง 5) โดยใช้เปลือกลำไยที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่า หลังการกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์คุณภาพน้ำทางเคมีและกายภาพบางประการของน้ำทิ้งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) คือ การใช้เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ มีค่าความเป็นกรด – ด่างของน้ำเสียสูงสุด คือ 2.55 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นกรด – ด่างของน้ำเสียก่อนการกำจัดโลหะแคดเมียม ค่าความเป็นกรด – ด่าง ของน้ำเสียหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นตัวดูดซับ ที่มีค่าเท่ากับ 2.05 และ 1.95 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามปริมาณซีโอดีของน้ำเสียหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมโดยใช้เปลือกลำไย + NaOH 0.25 นอร์มอล ยังคงมีค่าสูงสุด คือ 4,960 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณซีโอดีของน้ำเสียหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมด้วยเปลือกลำไยแห้งที่มีค่ารองลงมา คือ 3,680 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณซีโอดีของน้ำเสียและน้ำเสียหลังการกำจัดโลหะแคดเมียที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นตัวดูดซับ ที่มีค่าไม่แตกต่างกันคือ 392 และ 264 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการใช้เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น เป็นตัวดูดซับ สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับ การใช้เปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณโลหะแคดเมียมในน้ำเสียก่อนการกำจัดโลหะแคดเมียมที่มีค่าเท่ากับ 6.40 พีพีเอ็ม หรือคิดเป็นสามารถในการกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้ 0 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ค่าการนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายน้ำรวมของน้ำเสียก่อนการกำจัดโลหะแคดเมียมและหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมโดยใช้เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH

0.25 นอร์มอล มีค่าเท่ากับ 8,000 11,000 4,000 และ 18,000 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และ 3,000 5,000 2,000 และ 9,000 พีพีเอ็ม ตามลำดับ (ตาราง 5)



ภาพ 28 แผนภูมิ Langmiur Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไย 3 ชนิด ในสารละลายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 8 12 16 และ 20 พีพีเอ็ม 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่เหมาะสม คือ ขนาดอนุภาค 450 – 500 250 – 450 และ 450 – 500 ไมครอน และปริมาณ 1.5 2.0 และ 1.5 กรัม สำหรับ เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และ เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล ตามลำดับ ดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4

ตาราง 4 ค่าคงที่ของ Langmiur adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะตะกั่วโดยเปลือกลำไยที่เตรียมจากวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี

ตัวดูดซับ	Q^0 (มก./ก.)	b (ล./มก.)	R^2
เปลือกลำไยแห้ง	8.7032	0.0322	0.9944
เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น	1.4766	21.1416	0.9862
เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล	1.0075	0.6575	0.9934

ตาราง 5 คุณภาพน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการก่อนและหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมโดยวิธีการดูดซับที่ใช้เปลือกลำไยแห้ง เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	pH	EC	TDS	COD	Cd
คุณภาพน้ำเสียก่อนการกำจัดโลหะแคดเมียม	1.95	8000	3000	392	6.42
คุณภาพน้ำเสียหลังการกำจัดโลหะแคดเมียมโดยใช้					
- เปลือกลำไยแห้ง	2.05	11000	5000	3680	0.98
- เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น	1.95	4000	2000	264	0.65
- เปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล	2.65	18000	9000	4960	1.02

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ มีลักษณะทางกายภาพและเคมีบางประการแตกต่างกัน โดยเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นและเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง มีปริมาณเยื่อใยและเถ้าสูงกว่าและมีปริมาณไขมันต่ำกว่าเปลือกลำไยแห้ง นอกจากนี้การปรับสภาพเปลือกลำไยแห้งด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นยังทำให้เปลือกลำไยเกิดรูพรุนขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง รวมทั้งค่าความเป็นกรด - ด่างของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นยังมีค่าต่ำกว่าค่าความเป็นกรด - ด่างของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง อย่างมีนัยสำคัญด้วย

ภายใต้สภาวะสมดุลของการดูดซับแบบกะ (Batch Condition) ที่ระยะเวลาการดูดซับเท่ากับ 60 นาที ที่ใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ เป็นตัวดูดซับ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมและตะกั่วของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ ได้รับอิทธิพลที่แตกต่างกันจากความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะ ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายโลหะ ปริมาณและขนาดของตัวดูดซับที่ใช้ ดังนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่ต่างกันทั้ง 3 แบบ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะแคดเมียมจาก 8 - 20 พีพีเอ็ม และมีค่าสูงสุดเมื่อใช้ในสารละลายโลหะแคดเมียมที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 ขณะที่ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้จาก 0.5 – 2.0 กรัม ในสารละลาย 50 มิลลิลิตร ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่างมีค่าไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ใช้เพิ่มจาก 250 – 450 เป็น 450 – 500 หรือ 500 – 850 ไมครอน ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ใช้จาก 250 – 450 ถึง 500 – 850 ไมครอน ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่างมีค่าไม่แตกต่างกัน

สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบ ภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่างมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 8 - 20 พีพีเอ็ม ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นมีค่าไม่ต่างกัน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ มีค่าสูงสุดเมื่อใช้ในสารละลายโลหะตะกั่วที่มีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4 นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วของเปลือกลำไยแห้งและเปลือก

ลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่างมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณและขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ใช้จาก 0.5 – 2.0 กรัมต่อสารละลาย 50 มิลลิลิตร และ 250 – 450 ถึง 500 – 850 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นมีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วไม่ต่างกัน

จากการศึกษา Adsorption Isotherm ของการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วโดยใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกันทั้ง 3 แบบ เป็นตัวดูดซับ พบว่าข้อมูลที่สมดุลของการดูดซับของเปลือกลำไยแห้งและเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายด่างสำหรับโลหะแคดเมียม และเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกันทั้ง 3 แบบสำหรับโลหะตะกั่ว สามารถอธิบายได้อย่างน่าพอใจโดยใช้แบบจำลองการดูดซับ Langmiur Isotherm Model อย่างไรก็ตามข้อมูลที่สมดุลของการดูดซับโลหะแคดเมียมของเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นมีระดับของความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับ Langmiur Isotherm Model ที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีข้างต้น

การกำจัดโลหะแคดเมียมในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ โดยใช้เปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการที่ต่างกัน 3 แบบ เป็นตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่เหมาะสม พบว่าเปลือกลำไยที่ถูกปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นสามารถกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับ การใช้เปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล เป็นตัวดูดซับที่สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

บรรณานุกรม

โชคชัย ไชยมงคล. 2547. ผลของพันธุ์ลำไยต่อคุณภาพลำไยอบแห้ง. **วิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร.** 21(2): 1 - 13.

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. 2537. **ถ่านกัมมันต์มาตรฐาน. มอก. 674-2537.** กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม. 92 น.

อรอนงค์ ปัญโญ. 2537. **เคมีพื้นผิว.** เชียงใหม่: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 90 น.

Ahmet, O., O. Dursan and O. Ayla. 2004. The adsorption of copper (II) ions on to dehydrated wheat bran (DWB) : determination of the equillibrium and thermodynamic parameter. **Process. Biochem.** 20(3): 214 – 219.

Ajmal, M., A. R. Khanrao, R. Ahmad and A. M. Khan. 2006. Adsorption study on *Parthenium hysterophorous* weed : Removal and recovery of Cd (II) from wastewater. **J. Haz Mater.**, 135(2): 242 – 248.

Al – Asheh, S. and Z. Duvnjak. 1998. Sorption of cadmium and other heavy metals by pine bark. **J. Haz Mater.**, 56(1): 35 – 51.

Al – asheh, S., F. Banat and D. Al – rousan. 2003 Beneficial reuse of chicken feathers in removal of heavy metals from wastewater. **J. Cleaner Production.** 11(2): 321 – 326.

Alves, M. M., C. G. Gonzalez Beca, R. Guedes de Carvalho, J. M.Castanheira. M. C. Sol Pereira and L. A. T. Vasconcelos. 1993. Chromium removal in tanery wastewater "polishing" by Pinus sylverstris bark. **Water Res.**, 27(8): 1333 – 1338.

Aoki, T. and M. Munemori. 1982. Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by water hyacinth (*Eichchornia crassipes*) **Water Res.**, 16(6): 793 - 796.

Baba, Y. and H. Hirakawa. 1992. Selective adsorption of palladium (II), platinum (IV) and mercury (II) on anew chitosan derivative processing pyridyl group. **Chem. Lett.**, 10(10): 1905 – 1908.

Babel, S. and T. A. Kirniawan. 2003. Low – cost adsorpbents for heavy metal uptake from contaminated water : review. **J. Haz Mater.**, B97(2): 219 – 243.

Baily, S. E., T. J. Olin, R. M. Bricka and D. D. Adrian. 1999. A review of potentially low – cost sorbents for heavy metals. **Water Res.**, 33(11): 2469 – 2479.

Bancroft, G. M 1986. Cation adsorption by hydrous manganese dioxide: A semi-quantitative X-ray photoelectron spectroscopic (ESCA) study. **Chemical Geology.**, 28(2): 331 – 339.

Banerjee, K., P. N. Cheromisinoff and S. L. Cheng. 1997. Adsorption kinetics of o - xylene by flyash. **Water Res.,** 31(2): 249 - 261.

Bayramoglu, G., I. Tuzun, G.Celik, M. Yilmaz and Y. Alica. 2006. Biosorption of mercury(II) ion from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobillied in alginate beads. **Int. J. Miner. Process** (In press).

Bhattacharyya, K. G. and S.S. Gupta. 2006. Pb(II) uptake by kaolinite and montmorillonite in aqueous medium : Influence of acid activation of the clays. Colloid surf. A : Physicochem. **Eng. Aspects.,** 277(2): 191 – 200.

Bryant, P. S., J. N. Peterson, J. M. Lee and T. M. Brouns. 1992. Sorption of heavy metal by untreat red firsawdust. **Appl. Biochem. Biotechnol.,** 34(3): 777 - 788.

Bulet, F. G. and J. H. Baysal. 2006. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. **Separation and Purification Technology**., 50(8): 1312 - 1320.

Candela, M. P., J. M. Martinez. and R. T. Macia. 1995. Biosorption of mercury(II) ion from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobillied in alginate beads. **Water Res.,** 18(10): 2174 – 2180.

Casarett, L.J. and J. Doull. 1980. **Toxicology.** 2 nd ed. New York: Mecmillan Publishing. 560 p.

Cay, S., A. Uyanik and A. Ozer. 2004. Single and binary component adsorption of copper (II) and cadmium (II) from aqueous solution using tea industry waste. **Separation and Purification Technology**. 48(9): 1031 - 1040.

Chen, J. P. and S. Wu. 2004. Acid/base treated activated carbon: Characterization of functional groups and metal adsorption property. **Langmiur.,** 20(10): 2205 - 2223.

Chen, J.P., D. Lie, L. Wang, S. Wu and B. Zhang. 2002. Dried waste activated sludge as biosorbent for metal removal : Adsorptive characterization and prevention of organic leaching. **J. Chem. Technol. Biotechnol.,** 77(3): 657- 665.

CSIRO. **Activated carbon.** [Online]. Available ftp://enecon.com.au/activated.html (5May 2002).

Demirbas, E., M. Kobya, S. Oncel and S. Sencan. 2002. Removal of Ni (II) from aqueous solution by adsorption onto hazelnut shell activated carbon : equillibrium study. **Bioresource Tech.,** 84(2): 291 – 293.

Esposito, A., F. Pagnanelli, A. Lodi, C. Solisio and F. Vegio. 2002. Biosorption of heavy metal by spherotilus natans: An equilibrium study at difference pH and biomass concentration. **Hydrometuugy.** 60(1). 129 - 141.

Faust, S.D. and O.M. Aly. 1987. **Adsorption process for water treatment**. Massachusetts: M. Butter Worth Publisher. 1150 p.

Figueira, M. M., B. Volesky, V. S. T. Ciminelli. and A. Roddick. 2000. Biosorption of metals in brown seaweed biomass. **Water Res.,** 34 (1): 196 – 204.

Fiol, N., J. Villaescusa, M. Martinez, M. Miralles, P. Jordi and J. Serarols. 2006. Sorption of Pb (II), Ni(II), Cu(II) and Cd(II) from aqueous solution by olive stone waste. **Separation and Purification Technology**. 50(1): 132 – 140.

Ghosh, M.K. and J. L. Bhattacharyya. 2002. Adsorption of heavy metals from electroplating wastewater by wood sawdust. **Bioresource Technology.** 98(2): 402 – 409.

Guibal, E., I. Saucedo, M. Janssin-Charrier, B. Delanghe and P. Le Cloirec. 1994. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. **Water Sci. Tech**., 30 (1): 183 - 190.

Guo, J. and A. C. Lua. 2001. Kinetics study on pyrolytics process of oil – palm solid waste using two – step consecutive reaction model. **Biomass and Bioenergy**. 20(2): 223 - 233.

Han, I., M. A. Schlautman and B. Batchelor. 2000. Removal of Zn^{2+} and Cu^{2+} by a sequencing batch reactor (SBR) system Water Environ. **Water Res.**, 72(1): 29 – 39.

Heimenz, P.C. and R. Rajagopalan. 1997. **Principle of Colloid and Surface Chemistry**. 3rd ed. New York: Marcel Dekker. 1015 p.

Ishii, H., M. Minegishi, B. Lavitpichayawong and T. Mitani. 1995. Synthesis of chitosan – amino acid conjugated and there use in heavy metal uptake. **Int. J. Bio. Macromol.**, 17(1): 21 - 23.

Johnson, P. D., M. A. Watson, J. Brown and I. A. Jefcoat. 2002. Peanut hull pellets as a single use sorbent for the capture of Cu (II) from wastewater. **Waste Management**. 22(2): 471 – 480.

Kapoor, A. and T. Viraragehavan. 1996. Treatment of metal industrial wastewater by ash and cement fixation. **J. Environ. Eng.** ASCE 122(3): 243 - 255.

Katsumata, H., S. Kaneco, K. Inomata, K. Itoh, K. Funasaga, K. Masuyama, T. Suzuki and K. Ohta. 2003. Removal of heavy metal in rinsing wastewater from plating factory by adsorption with economical viable materials. **J. Environmental Management.** 69(1): 187 – 191.

Kawamura, Y., M. Mitsuhashi, H. Tanibe and H. Yoshida. 1993. Adsorption of metal ions on Polyaminateed highly porous chitosan chelating resin. **Ind. Eng. Chem. Res.** 32(2): 386 – 391.

Kratochvil, D. and B. Volesky. 2006. Multicomponent biosorption in fixbeds. [Online]. Available http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=7cd6d27c3c7aaac829c8cc30cd78d836 (23 November 2006).

Kulkarni, M. V. and V. C. Rane. 1980. Studies in treatment of liquid effluent from chlor – akali industry. **Chem. Age. India.** 31(2): 499 – 503.

Lee, S. M. and A. P. Davis. 2001. Ternary biosorption studies of Cd(II), Cr(III) and Ni(II) on shelled *Moringa oleifera* seeds. **Water Res.**, 35(3): 534 - 540.

Lee, H. S. and B. Volesky. 1997. Interaction of light metal and protons with *Sargassum fluitans* biomass. **Water Res.**, 31(12): 3082 – 3088.

Leusch, A. and B. Volesky. 1995. Influence of film diffusion on cadmium biosorption by marine biomass. **Journal of Biotechnology.** 43(1): 1 – 10.

Marinsky A. J. 1966. **Ion exchange.** New York: Marcel Dekker. 865 p.

Matis, K. A. and A. I. Souboulis. 1994. Floatation of cadmium - loaded biomass. **Biotechnol. Bioeng.**, 44(2): 354 - 360.

Mortland, M. M., S. Shaobia and S. A. Boys. 1986. Clay – organic complexes as adsorpbent for phenol and chlorophenols. **Clay and Clay Minerals.** 34(3): 581 – 585.

Nadeem, M., A. Mahmood, S.A. Shahid and S.S. Shah. 2006. Sorption of lead from aqueous solution by chemically modified carbon adsorbents. **J. Haz Mater**.(In press).

Nastrand, D. V. 1968. **Scientific Encyclopedia.** 4^{th} ed. New York: Mecmillan Publishing. 595 -525.

Namasivayam, C. and K. Ronganathan. 1992. Select metal adsorption by activated carbon made from peanut shells. **Environ. Pollut.**, 82(2): 255 – 261.

Netzer, A. and D. E. Hughes. 1984. Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2-}, and Cd^{2+}) adsorption on clinoptilolite. **Water Res.**, 18(5): 927 – 933.

Niu, H., X. S. Xu and J. H. Wang. 1993. Removal of lead from aqueous solutions by penicillium biomass. **Biotechnol. Bioeng.**, 42(4): 785 – 787.

Orhan, Y. and H. Buyukgunor. 1993. The removal of heavy metal by agricultural wastes. **Water Sci. and Technol.**, 28(2): 247 – 255.

Ozer, A. and H. B. Pirincci. 2006. The adsorption of Cd(II) ions on sulfuric acid treated wheat ban. **J. Haz Mater**. (In press).

Ozer, A. and D. Ozer. 2004. The adsorption of Cr(IV) on sulfuric acid treated weed ban. **Environ. Technol**. 25(3): 689 – 697.

Pino, G. H., M. L. Souza de Mesquita, M. L. Torem and G. A. Saavedra Pinto. 2006. Biosorption of cadmium by green coconut shell powder. **Mineral Engineering**. 19(3): 380 – 387.

Randall, J. M., R. L. Bermann, V. Garrett and A. C. Jr. Waiss. 1974. Use of bark to remove heavy metal ions from waste solution on natural and activated bentonite. **J. Chem. Tech. Biotechnol**., 59(2): 289 – 295.

Reed, B. E. and S. Arunachalam. 1994. Influence of film diffusion on cadmium biosorption by marine biomass. **J. Environ. Eng.**, 120(3): 416 - 436.

Rorrer, G. L., T. Y. Hsien and J. D. Way. 1993. Synthesis of porous - magnetics chitosan beads for removal of cadmium ions from wastewater. **Ind. Eng. Chem. Res.** 32(10) : 2170 – 2178.

Roy, D., P. N. Greenlaw and B. S. Shane. 1993. Adsorption of heavy metal by green algae and ground rice hulls. **J. Environ. Sci. Health. A**. 28(1): 37 - 50.

Sekar, M., V. Sakthi and S. Rengaraj. 2006. Kinetic and equilibrium adsorption study of lead (II) on to activated carbon prepare from coconut shell. [Online]. Available http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method= 7cd6d27e3c7aaac801c8aad20cd78d321 (23 November 2006).

Sharma, D. C. and C. F. Forster. 1994. Continuous adsorption and desorption of chromium ions by Sphagnum moss peat. **Process. Biochem.**, 30(4): 293 – 298.

Singh, K. K., A. K. Singh and S. H. Hason. 2006. Lowcost bio – sorbent 'wheat bran' for removal of cadmium from wastewater : Kinetic and equilibrium studies. **Bioresource Technology.** 97(9): 994 – 1001.

Srivastava, S. K., A. K. Singh and A. Sharma. 1994. Studies on the uptake of lead and zinc by lignin obtained from black liquor – a paper industrial waste material. **Environ. Technol.**, 15(2): 353 - 361.

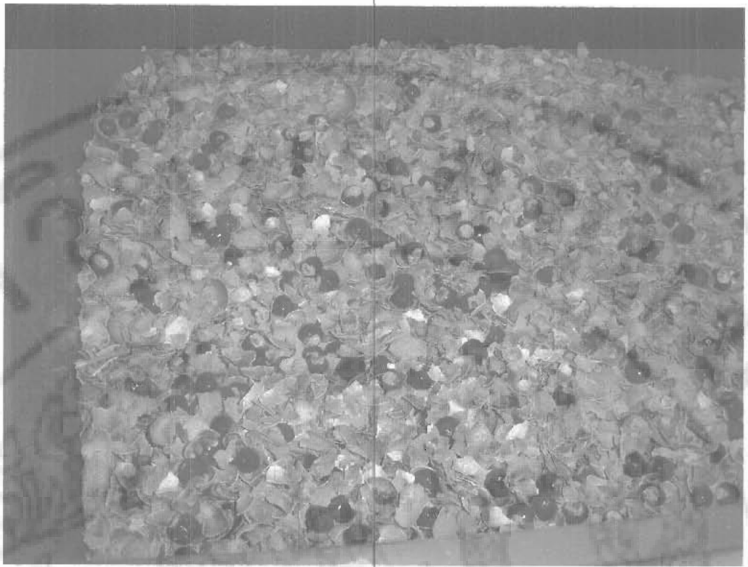
Tan, T. C., C. K Chia and C. K. Teo 1985. Uptake of metal ion by chemically treated human hairs. **Water Res.,** 19(1): 157 – 162.

Tee, T. W. and A. Kharn. 1988. Removal of lead, cadmium and zinc by waste tea leave. **Environmental Technology Letters.** 9(10): 1223 - 1232.

Vaquez, G., G. Antorrena, J. Gonzalez and M. D. Doval. 1994. Adsorption of heavy metalions by chemically modified pinus pinaster bark. **Bioreesource Technol.,** 48(2): 251 - 255.

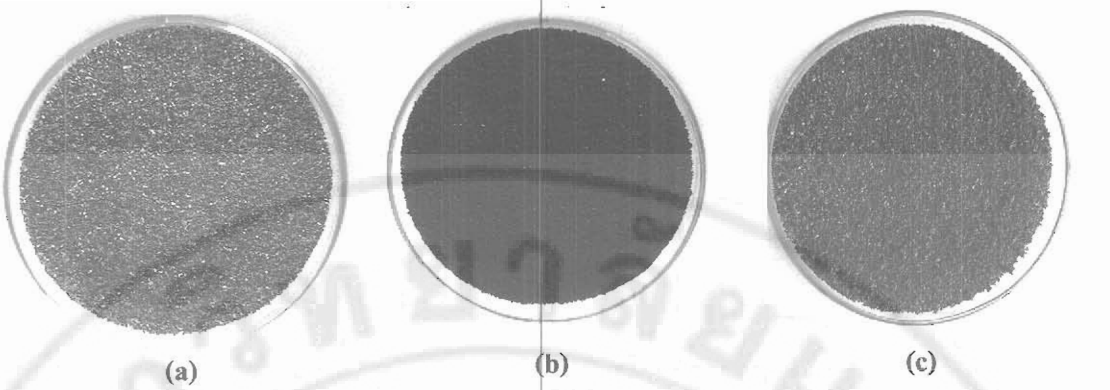
Yao, K. M. 1971. Removal of particulate matter by filtration. **Environmental Technology.** 5(2) 378 – 382.

ภาคผนวก ก



ภาพ 29 เปลือกลำไยสายพันธุ์ดอจากกระบวนการแปรรูปลำไยในจังหวัดลำพูน

ภาพ 30 การทดสอบการดูดซับโลหะแคดเมียม และตะกั่วแบบกะโดยใช้เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ เป็นตัวดูดซับในสารละลายโลหะปริมาตร 50 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิห้อง ที่เขย่าด้วยความเร็ว 125 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพ 31 เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ คือ เปลือกลำไยแห้ง **(a)** เปลือกลำไยแห้ง + H_2SO_4 เข้มข้น **(b)** และเปลือกลำไยแห้ง + NaOH 0.25 นอร์มอล **(c)**

ภาพ 32 เปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบในสารละลายโลหะแคดเมียมและตะกั่ว ปริมาตร 50 มิลลิลิตร (a) สารละลายโลหะแคดเมียม และตะกั่วปริมาตร 50 มิลลิลิตร หลังการกรองแยกออกจากตัวดูดซับคือเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยวิธีการต่างกัน 3 แบบ(b)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายบัญชา ชวาลไชย	
เกิดเมื่อ	วันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2520	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2536	มัธยมศึกษาตอนต้นโรงเรียนหนองวัวซอพิทยาคม จังหวัดอุดรธานี
	พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนอุดรพิชัยรักษ์พิทยา จังหวัดอุดรธานี
	พ.ศ. 2543	ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่