การกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสีย ด้วยมะขามและเปลือกทับทิม

Removal of Cadmium (II) and Lead (II) Ions from Wastewater by Tamarind and Pomegranate Shell

ยุพดี เส้นขาว*

หลักสูตรวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180

Yupadee Senkao*

Department of Sciene Education, Faculty of Science and Technology,

Valaya Alongkorn Rajabhat University under Royal Patronage,

Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 13180

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสีย โดยใช้มะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีและที่ปรับสภาพทางเคมีด้วยกรดซัลฟุริกเป็นตัวดูดซับ และศึกษาสมบัติของตัวดูดซับด้วยการหาค่าการดูดซับไอโอดีน รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับ ผลการศึกษาจากการทดลองแบบกะพบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพ ส่วนมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพต่างก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ใกล้เคียงกับมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำเสีย รวมทั้งมีแนวโน้มว่าการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมีความเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมากกว่าแบบแลงเมียร์ ซึ่งพบว่าในการดูดซับแคดเมียมด้วยมะขามปรับสภาพ มีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 0.91, 0.08 และ 0.5424 ตามลำดับ และมีค่า X_m, b และ R^2 เท่ากับ -0.88, -0.12 และ 0.154 ตามลำดับ ส่วนเปลือกทับทิมปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 49, -0.05 และ 0.8121 ตามลำดับ และมีค่า X_m, b และ R^2 เท่ากับ 2.57, -1.41 และ 0.0002 ตามลำดับ สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยมะขามปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 23.66, 1.02 และ 0.5138 ตามลำดับ และมีค่า X_m, b และ R^2 เท่ากับ -256.41, -0.06 และ 0.2775 ตามลำดับ ส่วนเปลือกทับทิมปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 17.79, 0.76 และ 0.534 ตามลำดับ และมีค่า X_m, b และ R^2 เท่ากับ -55.25, -0.18 และ 0.2668 ตามลำดับ นอกจากนี้มะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพการดูดซับ

***ผู้รับผิดชอบบทความ :** yupadeesenkao@gmail.com

แคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่องได้สูงกว่าการดูดซับตะกั่วมาก และสูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพ ส่วนมะขามที่ไม่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงใกล้เคียงกัน และสูงกว่ามะขามที่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ

คำสำคัญ: ไอออนแคดเมียม; ไอออนตะกั่ว; น้ำเสีย; มะขาม; เปลือกทับทิม

Abstract

The objective of this research is to determine the efficiency of tamarind and pomegranate shell, as the adsorbent for removing cadmium (II) and lead (II) ions from wastewater. The property of absorbent was studied using iodine adsorption value. The optimum condition for the efficiency of the absorbent was studied by sulfuric acid treatment with a batch experiment. The continuous operation was performed by using the synthetic wastewater and wastewater from chemical laboratory. The result indicated that the treated tamarind and pomegranate shell could remove lead from synthetic wastewater more than those untreated. It also showed that the treated and untreated tamarind and pomegranate shell could similarly remove cadmium. In addition the efficiency of metal ion adsorption increased when the time and the concentration of metal ion in the wastewater increased. Freundlich adsorptive isotherm test was shown to be more appropriate than Langmuir absorbtive isotherm test. The Freundlich constant (K), adsorptive energy constant (n) and correlation coefficient (R^2) for cadmium removing by the treated tamarind were 0.91, 0.08 and 0.542 and 0.513, respectively while maximum adsorbate quantity (X_m), Langmuir constant (b) and R^2 were -0.88, -0.12 and 0.154, respectively. For the treated pomegranate shell, K, n และ R^2 were 49, -0.05 and 0.8121, respectively and X_m, b and R^2 were 2.57, -1.41 and 0.0002, respectively. K, n และ R^2 for removing lead of the treated tamarind were 23.66, 1.02 and 0.5138, respectively and X_m, b and R^2 were -256.41, - 0.06 and 0.2775, respectively. K, n และ R^2 of the treated pomegranate shell were 17.79, 0.76 and 0.534, respectively and X_m, b and R^2 were -55.25, -0.18 and 0.2668 respectively. The efficiency of cadmium ion adsorption in synthetic wastewater of the treated tamarind and pomegranate shell in the continuous operation was higher than lead ion adsorption and higher than the untreated tamarind and pomegranate shell. The untreated tamarind and treated pomegranate shell could similarly remove cadmium and lead in the wastewater from chemical laboratory and could remove cadmium and lead more than the treated tamarind and untreated pomegranate shell.

Keywords: cadmium (II) ion; lead (II) ion; wastewater; tamarind; pomegranate shell

1. บทนำ

น้ำเป็นหนึ่งปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต จากการที่น้ำเป็นตัวทำละลายที่ดี หากมีสารพิษละลายปนอยู่ในน้ำ จะส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ และจะทำให้น้ำมีคุณภาพไม่เหมาะต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งในด้านการอุปโภคและบริโภค ซึ่งแหล่งที่มาของสารพิษในน้ำส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการกระทำของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นน้ำทิ้งตามบ้านเรือน หรือน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ปัญหามลพิษทางน้ำนี้จัดเป็นปัญหาสำคัญยิ่งปัญหาหนึ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจอย่างกว้างขวาง เพื่อควบคุมคุณภาพของแหล่งน้ำและป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำอีกต่อไป จึงมีการกำหนดมาตรฐานของน้ำทิ้ง ตลอดจนการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในการควบคุมและบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ สารพิษต่าง ๆ โดยเฉพาะแคดเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเมื่อถูกปล่อยทิ้งจะสะสมในแหล่งน้ำ ดินตะกอน และห่วงโซ่อาหาร ซึ่งส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสภาพแวดล้อมและส่งผลถึงสุขภาพอนามัยของมนุษย์ โดยโลหะหนักเหล่านี้จะเข้าสู่ร่างกายมนุษย์เมื่อรับประทานพืชหรือสัตว์ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน และจะสะสมเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงระดับที่ก่อให้เกิดความเจ็บป่วยจากพิษของโลหะหนักเหล่านี้

อุตสาหกรรมหลายประเภทในปัจจุบันต้องใช้วัตถุดิบที่มีแคดเมียมและตะกั่วเป็นส่วนผสม ทำให้ของเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้มีแคดเมียมและตะกั่วปนออกมา ไม่ว่าจะเป็นน้ำเสีย กากของเสีย หรือขยะมูลฝอยต่าง ๆ ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมดังกล่าวจะมีโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณโลหะหนักในน้ำถูกใช้เป็นดัชนีชี้วัดหนึ่งที่ใช้เพื่อควบคุมมาตรฐานคุณภาพน้ำ โดยมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติ เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีปริมาณแคดเมียมไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร [13] ทั้งนี้น้ำทิ้งดังกล่าวจะต้องได้รับการบำบัดให้มีความสะอาดเพียงพอก่อนที่จะทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำสาธารณะ แม่น้ำลำคลอง หรือก่อนที่จะมีการนำกลับมาใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคอีกครั้ง

แคดเมียมและตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายทั้งทางตรงและทางอ้อม แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจากการปนเปื้อนในอาหาร น้ำ และใบยาสูบ จะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหารแล้วแพร่กระจายไปที่ม้าม ตับ และลำไส้ และจะถูกสะสมไว้ที่ไต คนที่ได้รับฝุ่นหรือบริโภคอาหารที่ปนเปื้อนแคดเมียมปริมาณสูง จะส่งผลให้มีการหายใจติดขัด คลื่นไส้อาเจียน เจ็บหน้าอก ถุงลมโป่งพอง เยื่อปอดถูกทำลาย ปวดแขนขาและกระดูกสันหลัง โลหิตจางเรื้อรัง ไตพิการ อาจเสียชีวิตได้ โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่าโรคอิไตอิไต (Itai-Itai decease) ส่วนตะกั่วจะสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางอาหาร ทางการหายใจ และทางผิวหนัง สำหรับพิษเฉียบพลัน จะเกิดอาการทางสมอง คือ ทรงตัวไม่ได้ มึนซึม อาเจียนอย่างรุนแรง ชัก หมดสติ และมีโอกาสมีความผิดปกติทางระบบประสาท ในเด็กทำให้กลายเป็นปัญญาอ่อน ส่วนพิษเรื้อรังจะแสดงอาการทางประสาท มีอาการปวดศีรษะ นอนไม่หลับตาพร่าเกิดภาพหลอน โลหิตจางเนื่องจากเม็ดเลือดแดงถูกทำลาย เบื่ออาหาร กล้ามเนื้ออ่อนล้า ตับอักเสบ ไตพิการ ปวดข้อกระดูก อัมพาต [2]

ถึงแม้ว่าวิธีการบำบัดโลหะในน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีอยู่มากมาย แต่สำหรับวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับ เป็นวิธีที่หนึ่งที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง [22] ซึ่งเป็นเหตุให้นักวิชาการจำนวนมากหันมาสนใจและพยายามพัฒนาตัวดูดซับต้นทุนต่ำ ได้แก่ ไคติน [16] เปลือกถั่ว [17] และแกลบ [27] เป็นต้น โดยการ

เพิ่มประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่าง ๆ มาใช้ทดแทนตัวดูดซับราคาแพง ตัวอย่างวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การปรับสภาพด้วยสารละลายกรดหรือด่าง และการกระตุ้นด้วยความร้อนสูง [20] เป็นต้น

จากการศึกษาเอกสารงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าได้มีการนำส่วนของพืช เช่น ผล เมล็ด และเปลือกผลไม้ชนิดต่าง ๆ มาใช้ดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยเซลในส่วนของพืชมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ แทนนิน (tannin) ลิกนิน (lignin) และเซลลูโลส ซึ่งมีศักยภาพดูดซับไอออนของโลหะหนัก [28] เช่น ไอออนของทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี การศึกษาการใช้เปลือกลำไยเป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลาย [8] พบว่าเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟุริกเข้มข้น สามารถกำจัดโลหะแคดเมียมได้สูงสุด คือ 88.75 เปอร์เซ็นต์ เปลือกลำไยแห้ง และเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยสารละลายด่างกำจัดโลหะแคดเมียมได้ไม่แตกต่างกัน คือ 84.45 และ 83.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาการใช้เปลือกมังคุดและน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดดูดซับสารตะกั่ว [5] พบว่าน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดสามารถดูดซับสารตะกั่วจากสารละลายเลด (II) ไนเตรตได้ที่ความเข้มข้น 0.008, 0.004, 0.002 โมล/ลิตร ในอัตราส่วนระหว่างสารละลายเลด (II) ไนเตรตต่อน้ำสกัดจากเปลือกมังคุดเป็น 10:12, 10:5 และ 10:2 โดยปริมาตร ตามลำดับ ในระยะเวลา 15 นาที นอกจากนี้เปลือกมังคุดแปรรูปสามารถดูดซับสารตะกั่วได้ โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดของสารละลายเลด (II) ไนเตรตต่อปริมาณผงมังคุดแห้งคือ 20:1 โดยมวล อัตราส่วนระหว่างสารละลายเลด (II) ไนเตรตต่อน้ำมังคุดหมักคือ 10:10 โดยปริมาตร และอัตราส่วนระหว่างสารละลายเลด (II) ไนเตรตต่อเปลือกมังคุดสดคือ 10:4 โดยมวล การศึกษาการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขาม [9] พบว่าการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชมีค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม (K) ของถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 6.4912 และ 4.2854 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่า K ของการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 7.6839 และ 5.3654 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ที่ระดับความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม คิดเป็น 72.23, 56.18 และ 42.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และสามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมคิดเป็น 72.23, 64.21 และ 50.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยส่วนของพืชที่ใช้จะอุดมไปด้วยเซลลูโลส แทนนิน และลิกนินที่มีศักยภาพในการดูดซับโลหะได้ดี รวมทั้งถ่านจากเมล็ดมะขาม [9] และถ่านจากเปลือกทับทิม ที่ pH 7 สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย 47.69 เปอร์เซ็นต์ [20] ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้สนใจนำวัสดุธรรมชาติคือมะขามและเปลือกทับทิมซึ่งเป็นส่วนของพืชที่มีองค์ประกอบที่สำคัญส่วนใหญ่ คือ แทนนิน ลิกนิน และเซลลูโลส ซึ่งสามารถดูดซับไอออนของแคดเมียมและตะกั่วได้ มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยมะขามที่ใช้เป็นมะขามเปรี้ยวพันธุ์พื้นเมืองทั้งฝักรวมทั้งเปลือกและเมล็ดอายุประมาณ 7 เดือน ซึ่งเป็นมะขามดิบที่โตเต็มที่และมีขนาดใหญ่ ซึ่งยังคงมีแทนนิน ลิกนิน และเซลลูโลสปริมาณสูง ดังนั้นการใช้มะขามในปริมาณไม่มากอาจมีแนวโน้มดูดซับไอออนของแคดเมียมและตะกั่วได้คล้ายกับเมล็ดมะขาม [9] ซึ่งอาจนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยน่าจะมีความคุ้มค่าพอเมื่อเปรียบเทียบกับการนำมารับประทาน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีและปรับสภาพทางเคมี

นำมะขามเปรี้ยวพันธุ์พื้นเมืองจากตลาดสด แขวงบางชัน เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร โดยใช้มะขามทั้งฝักรวมทั้งเปลือกและเมล็ดอายุประมาณ 7 เดือน และเปลือกทับทิมพันธุ์เกษตรอายุประมาณ 4 เดือน ซึ่งเก็บจากบ้านเลขที่ 126/1 ในแขวงถนนเพชรบุรี เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร นำมาคัดแยกเอาเมล็ดและเนื้อทับทิมออกแล้วนำไปล้างทำความสะอาด ตากแดดบนตะแกรงไนลอนเป็นเวลา 3 วัน ปั่นให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 250-850 ไมครอน นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะได้มะขามและเปลือกทับทิมที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 2 จะเป็นมะขามและเปลือกทับทิมที่ถูกปรับสภาพทางเคมี โดยมีวิธีการดังนี้ นำมะขามและเปลือกทับทิมแช่ในกรดซัลฟูริคเข้มข้น สัดส่วนกรดซัลฟูริก : เปลือกทับทิม และกรดซัลฟูริก : มะขาม เท่ากับ 1:1.8 มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม เวลาประมาณ 2-3 นาที อบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยไม่มีการล้างกรดออก อบต่อที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ตามลำดับ [7,26]

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับโดยศึกษาพื้นที่ผิวของการดูดซับด้วยการหาค่าการดูดซับไอโอดีน นำตัวอย่างตัวดูดซับมะขามและเปลือกทับทิมที่อบแห้งและที่ปรับสภาพทางเคมีมาดูดซับไอโอดีนมาตรฐาน (standard iodine) และวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับด้วยวิธีไทเทรตโดยใช้สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM-D4607-94 (ASTM Committee on Standards, 1998a) [2]

2.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมและตะกั่ว

2.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งแคดเมียม (II) ไนเตรตเตตระไฮเดรต ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) จำนวน 2.7441 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI) จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งเลด (II) ไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) จำนวน 1.5986 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว

2.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักด้วยการทดลองแบบกะ (Batch experiment)

(1) การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว เจือจางน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมตัวดูดซับที่ปรับสภาพปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม ตามลำดับ นำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ (orbital shaker) (รุ่น UNIMAX 2010 บริษัท Heidolph-Instruments G, Germany) 125 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังการดูดซับกรองด้วย

กระดาษกรอง whatman เบอร์ 42 เก็บตัวอย่างส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma) (รุ่น JY 238 บริษัท Ultimaz, Swizzerland) ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากสารละลายแคดเมียมเป็นสารละลายตะกั่ว

(2) การศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว เจือจางน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากน้ำเสียสังเคราะห์ของแคดเมียมความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมตัวดูดซับที่ปรับสภาพ ปริมาณ 0.05 กรัม นำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ 125 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5, 10, 30, 60, 120 และ 240 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังการดูดซับกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บตัวอย่างส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากสารละลายแคดเมียมเป็นสารละลายตะกั่ว

(3) การศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว เจือจางน้ำเสียสังเคราะห์แคดเมียมที่มีความเข้มข้น 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมตัวดูดซับที่ปรับสภาพปริมาณ 0.05 กรัม นำไปเขย่าด้วยเครื่องออร์บิทัลเชกเกอร์ 125 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้หลังการดูดซับกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 เก็บตัวอย่างส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากสารละลายแคดเมียมเป็นสารละลายตะกั่ว

(4) การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ [2,29]

- ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir absorptive isotherm) เป็นการหาความ สัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิที่คงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสม และใช้อธิบายลักษณะการดูดซับตัวถูกดูดซับของตัวดูดซับ จากการศึกษาไอโซเทอมแบบ แลงเมียร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับ ตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับแสดงได้ดังสมการ

$$X = \frac{(X_m b C_e)}{1 + bC_e} \qquad \text{.......................................(2.1)}$$

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ

เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่อินฟินิตี (∞) แสดงสมการได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \qquad \text{..................................(2.2)}$$

เมื่อนำข้อมูลผลปริมาณตัวถูกดูดซับมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ แบบจำลองไอโซเทอมสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์แสดงดังสมการที่ 2.3

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \left[\frac{1}{C_e}\right]\frac{1}{bX_m} \qquad \text{........................(2.3)}$$

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich absorptive isotherm) ถูกใช้อย่างแพร่

หลายที่สุด เพื่ออธิบายการดูดซับในระบบของเหลว เมื่อนำข้อมูลผลปริมาณตัวถูกดูดซับมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง log (X/m) กับ log C_e จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ log K แสดงดังสมการที่ 2.4 ในรูปลอการิทึมได้ดังนี้

$$\log\left[\frac{X}{m}\right] = \log K\left[\frac{1}{n}\right] + \log C_e \quad ....(2.4)$$

X = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ

1/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

m = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

2.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแบบต่อเนื่อง โดยดัดแปลงวิธีการทดลองมาจาก รัตนา (2542) [5]

(1) ชั่งตัวดูดซับคือมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีและไม่ปรับสภาพทางเคมีลงในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร คอลัมน์ละ 5 กรัม จำนวน 4 คอลัมน์

(2) เติมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ผ่านตัวดูดซับอย่างละคอลัมน์ ปริมาตรในแต่ละคอลัมน์ 100 มิลลิลิตร โดยไม่มีการปรับอัตราการไหล เก็บน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์ลงในภาชนะรองรับทันที

(3) นำน้ำเสียที่ผ่านตัวดูดซับแล้วจากข้อ (2) มาวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง ICP

2.4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างมะขามและเปลือกทับทิม ทำการทดลองตามข้อ 2.4.1 (1) แต่เปลี่ยนจากมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีเป็นมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมี ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของมะขามและเปลือกทับทิมดังกล่าวต่อการดูดซับของไอออนแคดเมียมและตะกั่ว และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ [2,8]

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของการดูดซับของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพด้วยการหาค่าการดูดซับไอโอดีนผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

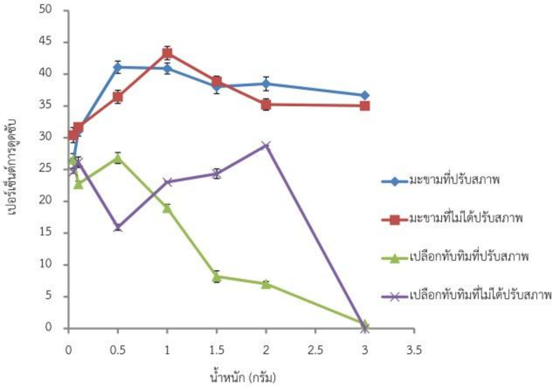
ตารางที่ 1 ค่าการดูดซับไอโอดีนของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพทางเคมี

ตัวดูดซับ	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
มะขามที่ปรับสภาพ	784.28 ± 10.07
มะขามที่ไม่ปรับสภาพ	759.82 ± 7.47
เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพ	759.87 ± 4.87
เปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพ	735.45 ± 9.75

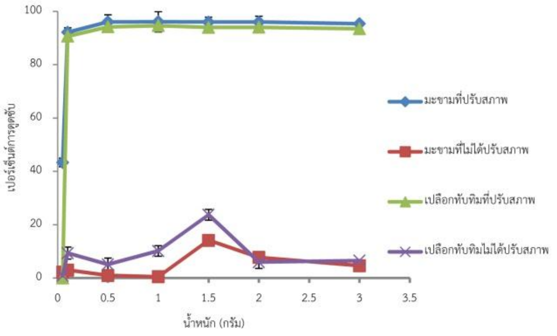
จากตารางที่ 1 พบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ได้ปรับสภาพทางเคมี มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 759.82 ± 7.47 และ 735.45 ± 9.75 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าการดูดซับต่ำกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 784.29 ± 10.07 และ 759.87 ± 4.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่าการปรับสภาพทางเคมีด้วยกรดซัลฟูริกอาจส่งผลต่อพื้นที่ผิวของการดูดซับจึงทำให้เกิดการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์เกรดทางการค้ามีค่า 600มิลลิกรัมต่อกรัม (มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม) [14] ค่าการดูดซับไอโอดีนของมะขามและเปลือกทับทิมมีค่ามากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณพื้นที่ผิวจึงมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนที่เพิ่มขึ้นนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการที่กรดซัลฟูริกมีผลต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดยเฉพาะเยื่อใยและเถ้าที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก ดังผลการวิจัยของประจวบและบัญชา [8] ซึ่งพบว่าปริมาณเยื่อใยและเถ้าของเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นและโซเดียมไฮดอกไซด์ 0.25 นอร์มัล มีค่าสูงสุดคือ 45.98 กับ 45.14 เปอร์เซ็นต์ และ 11.78 กับ 11.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขนาดรูพรุนของเปลือกลำไยที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริกมีขนาดใหญ่ที่สุด คือ 12.97 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีอบแห้งและโซเดียมไฮอกไซด์ 0.25 นอร์มัล ที่มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 7.83 และ 5.93 ไมครอน ทั้งนี้โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับได้เพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ [6]

3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพทางเคมี

การทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม ตามลำดับ ทำการเขย่าด้วยออร์บิทัลเชกเกอร์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลการทดลองดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1 ผลของการปรับสภาพมะขามและเปลือกทับทิมต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม



รูปที่ 2 ผลของการปรับสภาพมะขามและเปลือกทับทิมต่อประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว

จากกราฟในรูปที่ 1 และ 2 พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับคือที่มะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพเพิ่มมากขึ้น (0.05-0.5 กรัม) รวมทั้งปริมาณตัวดูดซับซึ่งดูดซับแคดเมียมคือมะขามและเปลือกทับทิมไม่ปรับสภาพเพิ่มมากขึ้น (0.05-1.0 และ 0.05-2.0 กรัม ตามลำดับ) และปริมาณของมะขามและเปลือกทับทิมไม่ปรับสภาพซึ่งดูดซับตะกั่วเพิ่มมากขึ้น (0.05-1.5 กรัม) เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนแคดเมียมและตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพและไม่ปรับสภาพมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมและตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของตัวดูดซับ [16] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพและไม่ปรับสภาพจึงมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนแคดเมียมและตะกั่วเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้อาจเป็นเพราะการแลกเปลี่ยนไอออนอาจเป็นกลไกหลักของการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำ เซลลูโลสที่มีหมู่คาร์บอกซิลในโครงสร้างของมะขามและเปลือกทับทิมจะมีสารแทนนิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่แลก เปลี่ยนไอออนได้ดี โดยมีหมู่ฟีโนลิกเป็นตำแหน่งที่ว่องไว (active site) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มตำแหน่งที่ว่องไวในการดูดซับ ทำให้ไอออนของโลหะในน้ำเสียสามารถดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับได้เพิ่มมากขึ้น [2] แต่เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมาก กว่าปริมาณที่กล่าวข้างต้นจนถึง 3 กรัม พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ทั้งนี้การแลกเปลี่ยนไอออนอาจเป็นกลไกหลักของการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำ เซลลูโลสที่มีหมู่ คาร์บอกซิลในโครงสร้างของมะขามและเปลือกทับทิมจะมีสารแทนนิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ดี โดยมีหมู่ฟีโนลิกเป็นตำแหน่งที่ว่องไว (active site) [2] เมื่อความเข้มข้นของไอออนตะกั่วในน้ำเสียลดลง (เนื่องจากการดูดซับ) ทำให้การแพร่ของไอออนจากสารละลายเข้าสู่ตำแหน่งที่ว่องไวได้ไม่มาก นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมที่มีแนวโน้มลดลง รวมทั้งเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของไอออนของโลหะในน้ำเสียลดลง (เนื่องจากการดูดซับ) ทำให้การแพร่ของไอออนจากสารละลายเข้าสู่ตำแหน่งที่ว่องไวลดลงไปมาก ดังนั้นการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การดูดซับมากนัก [2]

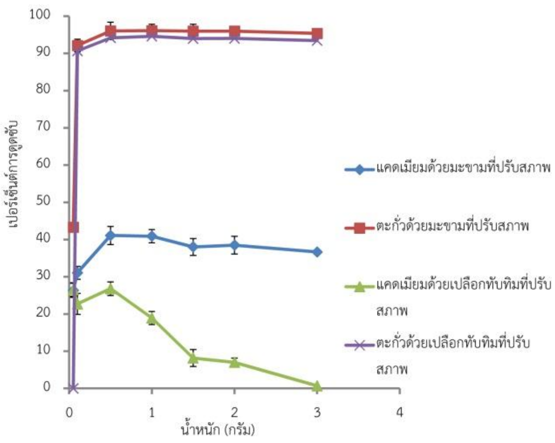
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยมะขามและเปลือกทับที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพทางเคมี (รูปที่ 1 และ 2) พบว่ามะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วได้สูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพมาก (รูปที่ 2) ซึ่งต่างจากประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมของมะขามและเปลือกทับที่ปรับสภาพและไม่ได้ปรับสภาพจะต่างกันไม่มากนัก (รูปที่ 1) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่กรดซัลฟูริกมีผลต่อพื้นที่ผิวของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพโดยเฉพาะเยื่อใยและเถ้าที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก [8] ทั้งนี้จะยิ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วมากกว่าแคดเมียม ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากแคดเมียมไอออนซึ่งมีประจุ +2 มีรัศมีไอออนเป็น 0.97 อังสตรอม และไอออนของตะกั่ว ซึ่งมีประจุ +2 มีรัศมีไอออนเป็น 1.20 อังสตรอม [7] จึงส่งผลให้อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตำแหน่งที่ว่องไวต่อการดูดซับกับไอออนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน [2] รวมทั้ง

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี แต่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น [6] ดังนั้นไอออนของตะกั่วซึ่งเป็นไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าแคดเมียมไอออน จึงมีความสามารถในการละลายน้ำลดลง โดยหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมากขึ้น

3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว

3.3.1 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

จากการทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0 กรัม ตามลำดับ ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลดังรูปที่ 3



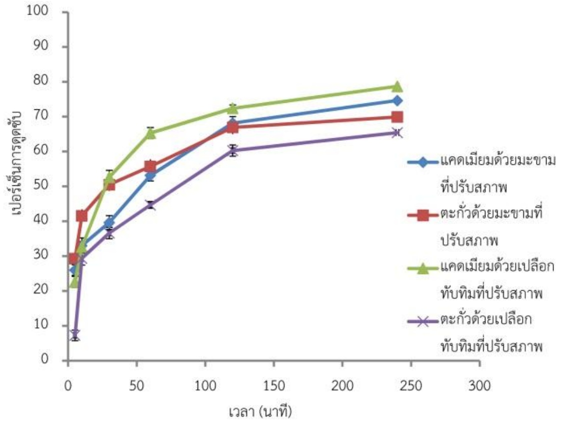
รูปที่ 3 ผลของปริมาณตัวดูดซับคือมะขามและเปลือกทับทิมต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว

จากกราฟในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตัวดูดซับมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพเพิ่มขึ้น (0.05-0.5 กรัม) และประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณตัวดูดซับเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพเพิ่มขึ้น (0.5-3.0 กรัม) ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อปริมาณตัวดูดซับมะขามที่ปรับสภาพเพิ่มขึ้น (0.5-3.0 กรัม) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมาก เมื่อปริมาณตัวดูดซับมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพเพิ่มขึ้น ดังนั้นมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในปริมาณที่แตกต่างจากแคดเมียม ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากประจุของไอออนตะกั่วและแคดเมียมมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ทั้งนี้ความหนาแน่นของประจุสัมพันธ์กับอัตราส่วนของประจุต่อรัศมี โดยแคดเมียมไอออนซึ่งมีประจุ +2 มีรัศมีไอออนเป็น 0.97 อังสตรอม และไอออนของตะกั่วซึ่งมีประจุ +2 มีรัศมีไอออนเป็น 1.20 อังสตรอม [7] จึงส่งผลให้อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตำแหน่งที่ว่องไวต่อการดูดซับกับไอออนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน [2] รวมทั้งความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ ซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะว่าก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำเพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากโมเลกุลของน้ำ ไอออนของตะกั่วซึ่งเป็นไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าแคดเมียมไอออน จะมีความสามารถในการละลายน้ำ

ลดลง โดยหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมากขึ้น [6]

3.3.2 อิทธิพลของเวลา

จากการทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 0.05 กรัม ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5, 10, 30, 60, 120 และ 240 นาที เมื่อนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลแสดงดังรูปที่ 4

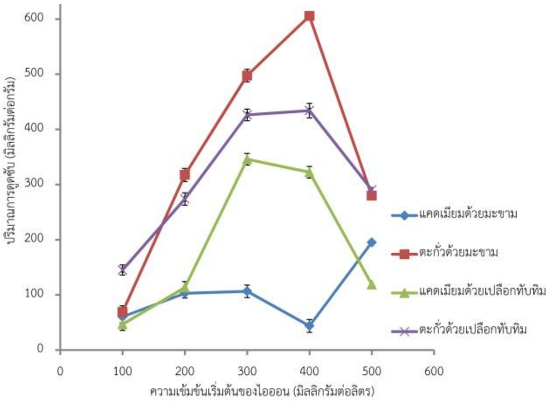


รูปที่ 4 อิทธิพลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว

จากกราฟในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาของการดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วง 5-30 นาที ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเวลาของการดูดซับเพิ่มขึ้นโอกาสที่ไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์จะแพร่ไปยังตำแหน่งที่ว่องไวต่อการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับจึงสูงขึ้น แต่เมื่อเวลาของการดูดซับเพิ่มเป็น 120-240 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องจากอัตราการดูดซับกับอัตราการคายออกมีค่าเท่ากัน แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่ภาวะสมดุล [6] เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมด้วยเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะมีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อย

3.3.3 อิทธิพลของความเข้มข้น

จากการทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100, 200, 300, 400 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 0.05 กรัม ทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำผลการทดลองไปสร้างกราฟตามสมการของชูและฮาชิม [18] ได้กราฟแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อิทธิพลของความเข้มข้นต่อปริมาณการดูดซับแคดเมียมและตะกั่ว

จากกราฟในรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพสามารถดูดซับตะกั่วได้มากขึ้นจนถึงความเข้มข้นที่ 400-500 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับตะกั่วจะลดลงและจะสามารถ

ดูดซับแคดเมียมที่มีความเข้มข้นสูง ๆ ได้มากขึ้น จนถึงความเข้มข้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับแคดเมียมจะลดลง ดังนั้นการที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นน้อย ๆ ค่าปริมาณการดูดซับจะสูงกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น เนื่องจากสัดส่วนระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับต่อตำแหน่งที่ว่องไวบนตัวดูดซับที่สามารถดูดซับตะกั่วและแคดเมียมได้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นน้อย ๆ มีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น [10] นอกจากนี้อาจเป็นเพราะที่ความเข้มข้นสูง การดูดซับได้เข้าสู่การดูดซับที่อิ่มตัวแบบมากเกินพอที่ตัวดูดซับจะดูดซับได้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำ [3] และมะขามที่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นอีกเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 400-500 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับของไอออนแต่ละชนิดพบว่า เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเพิ่มขึ้น มะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้มากกว่าไอออนแคดเมียม ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากประจุของไอออนตะกั่วและแคดเมียมมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ทั้งนี้ความหนาแน่นของประจุสัมพันธ์กับอัตราส่วนของประจุต่อรัศมี โดยแคดเมียมไอออนซึ่งมีประจุ +2 มีรัศมีไอออนเป็น 0.97 อังสตรอม และไอออนตะกั่วซึ่งมีประจุ+2 มีรัศมีไอออนเป็น 1.20 อังสตรอม [7] จึงส่งผลให้อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างตำแหน่งที่ว่องไวต่อการดูดซับกับไอออนแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน [2] รวมทั้งไอออนตะกั่วซึ่งเป็นไอออนที่มีขนาดใหญ่กว่าแคดเมียมไอออน จึงมีความสามารถในการละลายน้ำลดลง โดยหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมากขึ้น [6]

3.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณสมการของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์แสดงดังตารางที่ 2

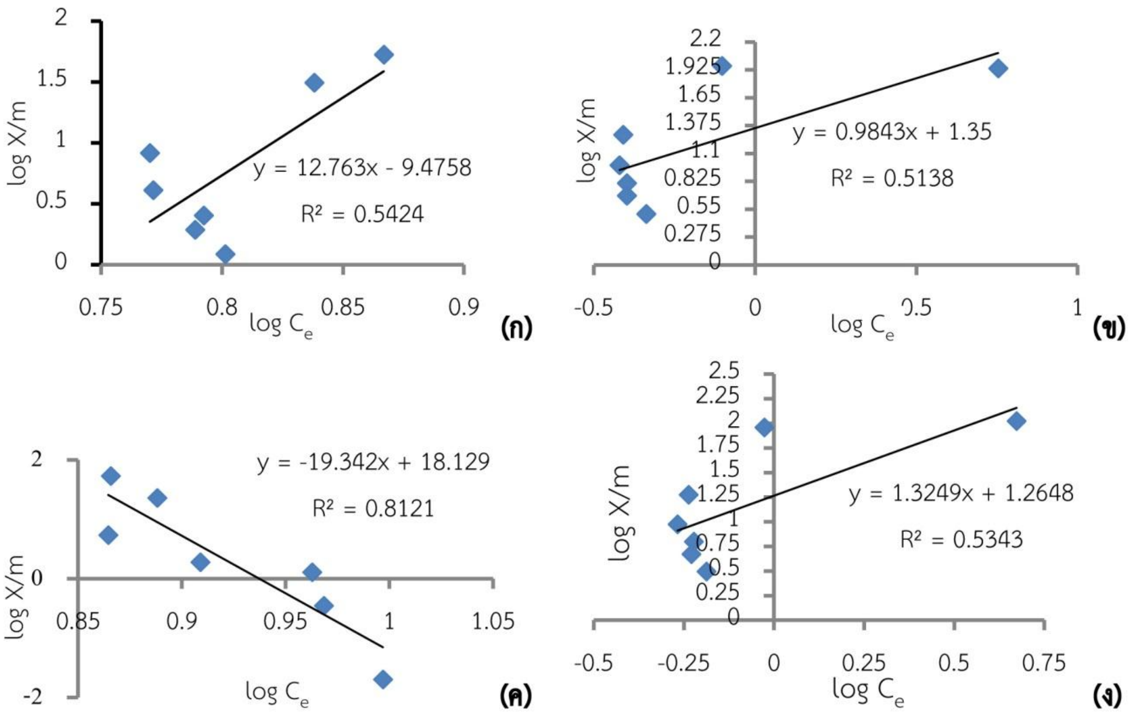
ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรที่ได้จากการคำนวณสมการของ ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์

ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช					ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์				
ตัวแปร	แคดเมียม		ตะกั่ว		ตัวแปร	แคดเมียม		ตะกั่ว	
	มะขาม	เปลือกทับทิม	มะขาม	เปลือกทับทิม		มะขาม	เปลือกทับทิม	มะขาม	เปลือกทับทิม
K	0.91	49	23.66	17.79	Xm	-0.88	2.57	-256.41	-55.25
n	0.08	-0.05	1.02	0.76	b	-0.12	-1.41	-0.06	-0.18
R^2	0.5424	0.8121	0.5138	0.5343	R^2	0.154	0.0002	0.2775	0.2668

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมปรับสภาพมีแนวโน้มว่ามีความเหมาะสมกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมากกว่าแบบแลงเมียร์ และพบอีกว่าทุกตัวแปรของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าสูงกว่าแบบแลงเมียร์มาก ซึ่งแสดงตามลำดับดังนี้ การดูดซับแคดเมียมด้วยมะขามปรับสภาพมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ (K) ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการ

ดูดซับ (n) และ R^2 เท่ากับ 0.91, 0.08 และ 0.5424 ตามลำดับ และมีค่าปริมาณของตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างการดูดซับแบบชั้นเดียว (Xm) ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (b) และ R^2 เท่ากับ -0.88, -0.12 และ 0.154 ตามลำดับ ส่วนเปลือกทับทิมปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 49, -0.05 และ 0.8121 ตามลำดับ และมีค่า Xm, b และ R^2 เท่ากับ 2.57, -1.41 และ 0.0002 ตามลำดับ สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยมะขามปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 23.66, 1.02 และ 0.5138 ตามลำดับ และมีค่า Xm, b และ R^2 เท่ากับ -256.41, -0.06 และ 0.2775 ตามลำดับ ส่วนเปลือกทับทิมปรับสภาพมีค่า K, n และ R^2 เท่ากับ 17.79, 0.76 และ 0.5343 ตามลำดับ และมีค่า Xm, b และ R^2 เท่ากับ -55.25, -0.18 และ 0.2668 ตามลำดับ

จากการทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ3.0 กรัม เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชได้ผลแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (ก) มะขามที่ปรับสภาพในการดูดซับแคดเมียม (ข) มะขามที่ปรับสภาพในการดูดซับตะกั่ว (ค) เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพในการดูดซับแคดเมียม และ (ง) เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพในการดูดซับตะกั่ว

จากตารางที่ 3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช พบว่าค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับแคดเมียม (K) ของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีเท่ากับ 0.91 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 49.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของ

การดูดซับ (1/n) เท่ากับ 12.76 และ -19.34 ตามลำดับ ค่า K ของการดูดซับตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีเท่ากับ 23.66 และ 17.79 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่า 1/n เท่ากับ 0.98 และ 1.32 ตามลำดับ นั่นคือการใช้มะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับแคดเมียม เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะให้ค่า K สูงกว่ามะขาม แสดงว่าเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่ามะขาม แต่ขณะเดียวกันมะขามที่ปรับสภาพดูดซับแคดเมียมจะให้ค่า 1/n สูงกว่าเปลือกทับทิม ดังนั้นเมื่อ 1/n มีค่าสูงแสดงว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของมะขาม กล่าวคือ ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง มะขามที่ปรับสภาพมีแนวโน้มที่จะดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าเปลือกทับทิม ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชจึงพบว่าเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่ามะขาม แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะสูงขึ้นมะขามที่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพ

ตารางที่ 3 ค่าความชัน และจุดตัดแกน y ของการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ค่าความชัน จุดตัดแกน y	การดูดซับแคดเมียม		การดูดซับตะกั่ว	
	มะขาม	เปลือกทับทิม	มะขาม	เปลือกทับทิม
log K	-0.04	1.69	1.37	1.25
K	0.91	49.00	23.66	17.79
1/n	12.76	-19.34	0.98	1.32

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้มะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่ว มะขามที่ปรับสภาพจะให้ค่า K สูงกว่าเปลือกทับทิม แสดงว่ามะขามที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกทับทิม ขณะที่เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วจะให้ค่า 1/n สูงกว่ามะขาม ดังนั้นเมื่อ 1/n มีค่าสูงแสดงว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของเปลือกทับทิม กล่าวคือ ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง เปลือกทับทิมมีแนวโน้มที่จะดูดซับตะกั่วได้ดีกว่ามะขาม ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชจึงพบว่ามะขามที่ปรับสภาพสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกทับทิม แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะสูงขึ้นเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่ามะขาม

สำหรับการใช้มะขามที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วจะให้ค่า K สูงกว่าการดูดซับแคดเมียมแสดงว่ามะขามที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม ขณะเดียวกันมะขามที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วจะให้ค่า 1/n ต่ำกว่าการดูดซับแคดเมียม โดยค่า 1/n คือค่าความชันของกราฟ ดังนั้นเมื่อ 1/n มีค่าสูงแสดงว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของมะขาม กล่าวคือ ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง มะขามมีแนวโน้มที่จะดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชจึงพบว่ามะขามที่ปรับสภาพสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม แต่เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะสูงขึ้นมะขามที่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว ส่วนการใช้เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับแคดเมียมจะให้ค่า K สูงกว่าการดูดซับตะกั่วแสดงว่าเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว ขณะเดียวกันเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพดูดซับตะกั่วจะให้ค่า 1/n สูงกว่าการดูดซับแคดเมียม เมื่อ 1/n มีค่าสูงแสดงว่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของ

เปลือกทับทิม กล่าวคือ ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นของไอออนโลหะสูง เปลือกทับทิมมีแนวโน้มที่จะดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชจึงพบว่าเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าตะกั่ว และเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะสูงขึ้น เปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียมเช่นกัน

3.5 การศึกษาสภาวะการดูดซับแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีที่มีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 4.323 และ 3.651 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 5 กรัม โดยให้น้ำเสียทั้งสองชนิดผ่านตัวดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร ออกมาทันที โดยไม่มีการปรับอัตราเร็วในการไหลผ่าน เมื่อนำผลการทดลองไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลของเปอร์เซ็นต์การดูดซับแบบต่อเนื่องด้วยมะขามและเปลือกทับทิมต่อประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียม

ตัวดูดซับ	เปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียม		เปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว	
	น้ำเสียสังเคราะห์ 100 (mg/L)	น้ำทิ้ง 4.323 (mg/L)	น้ำเสียสังเคราะห์ 100 (mg/L)	น้ำทิ้ง 3.651 (mg/L)
มะขามที่ไม่ปรับสภาพ	2.64 ± 0.37	86.35 ± 0.55	39.02 ± 0.49	59.46 ± 0.75
มะขามที่ปรับสภาพ	94.03 ± 0.70	39.39 ± 0.50	37.65 ± 0.69	13.17 ± 0.40
เปลือกทับทิมไม่ปรับสภาพ	64.73 ± 0.76	28.98 ± 0.57	41.54 ± 0.61	0
เปลือกทับทิมปรับสภาพ	94.64 ± 0.64	84.5 ± 0.70	36.39 ± 0.50	58.68 ± 0.72

สภาวะการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีความเข้มข้นของแคดเมียมและตะกั่ว 4.323 และ 3.651 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยดูดซับด้วยมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพทางเคมีปริมาณ 5.0 กรัม โดยให้น้ำเสียทั้งสองชนิดผ่านตัวดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร ออกมาทันที โดยไม่มีการปรับอัตราเร็วในการไหลผ่าน

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าผลการดูดซับไอออนโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่องพบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงมากใกล้เคียงกันคือ 94.03 ± 0.70 และ 94.64 ± 0.64 ตามลำดับ และสูงกว่าในน้ำทิ้งซึ่งมีค่า 39.39 ± 0.50 และ 84.5 ± 0.70 ตามลำดับ รวมทั้งสูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพโดยในน้ำเสีย

สังเคราะห์มีค่าเป็น 2.64 ± 0.37 และ 64.73 ± 0.76 ตามลำดับ และในน้ำทิ้งมีค่าเป็น 86.35 ± 0.55 และ 28.98 ± 0.57 ตามลำดับ ตลอดจนสูงกว่าการดูดซับตะกั่วมากแสดงค่าดังตารางที่ 4 นอกจากนี้มะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพทางเคมีต่างก็มีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน ส่วนมะขามที่ไม่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงมากใกล้เคียงกันตามลำดับ และสูงกว่ามะขามที่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ และมะขามที่ไม่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงใกล้เคียงกันตามลำดับ และสูงกว่ามะขามที่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ และเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงกว่ามะขามที่ปรับสภาพ จะเห็นได้ว่าผลการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียแบบต่อเนื่องมีแนวโน้มที่แตกต่างไปบ้างจากผลการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสียแบบกะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทีมีอิทธิพลต่อการดูดซับแตกต่างกัน เช่น การเขย่า ปริมาณตัวดูดซับ เวลา ปริมาณไอออนของโลหะและสารปนเปื้อนอื่น ๆ ซึ่งอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดแตกต่างออกไป

4. สรุป

การวิจัยในครั้งนี้สนใจนำวัสดุธรรมชาติคือมะขามและเปลือกทับทิมซึ่งเป็นส่วนของพืชที่มีองค์ประกอบที่สำคัญส่วนใหญ่ คือ แทนนิน ลิกนิน และเซลลูโลส ซึ่งน่าจะสามารถดูดซับไอออนของแคดเมียมและตะกั่วได้ ผลการศึกษาจากการทดลองแบบทีละเทพบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงมาก และสูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีมาก ส่วนมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพทางเคมีต่างก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ค่อนข้างสูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพทางเคมีตามลำดับ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาและความเข้มข้นของไอออนโลหะในน้ำเสียประสิทธิภาพการดูดซับไอออนจะสูงขึ้น ตลอดจนการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมและตะกั่วของมะขามและเปลือกทับทิมมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช รวมทั้งมะขามและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่องได้สูงกว่าการดูดซับตะกั่วมาก และสูงกว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพ ส่วนมะขามที่ไม่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการเคมีได้สูงใกล้เคียงกันตามลำดับ และสูงกว่ามะขามที่ปรับสภาพและเปลือกทับทิมที่ไม่ปรับสภาพตามลำดับ จากผลการวิจัยที่ได้ในครั้งนี้พบว่ามะขามและเปลือกทับทิมที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีมีประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วได้ ดังนั้นจึงอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามมะขามและเปลือกทับทิมที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีก็มีประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วได้ค่อนข้างสูงเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจนำไปประยุกต์ใช้ดูดซับแคดเมียมและตะกั่วในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ ซึ่งน่าจะดีกว่า เพราะไม่สิ้นเปลืองและไม่เกิดมลพิษ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] เกศศิริ เหล่าวชิระสุวรรณ, 2554, การเตรียมและศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี, แหล่งที่มา : http://

www.utcc.ac.th/public_content/files/001/31_3.pdf , 5 มิถุนายน 2556.

[2] เกษม สีมาพล และนรินทร ตันจ้อย, 2546, การจำกัดไอออนแคดเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียด้วยใยมะพร้าว, โครงการพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 63 น.

[3] ขวัญปวีณ์ สิทธิเขตรกรณ์, วีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, ชูวงศ์ ชัยสุข และพรสวรรค์ อัศวแสงรัตน์, 2554, การดูดซับแอลฟาโทโคเฟอรอลด้วยตัวดูดซับซิลิกาจากเถ้าแกลบ, แหล่งที่มา : http://www.chem.eng.psu.ac.th/tiche2011/TCHE/data/paper/thai/.../tsp007.pdf.

[4] ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล, 2539, การจำกัดตะกั่วและนิคเกิลจากน้ำเสียโดยใช้ขี้เลื่อย, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล, กรุงเทพฯ, 108 น.

[5] ชานนท์ มากสิน, สมฤทัย ทองเจิม และจันทร์เพ็ญ นพเก้า, 2546, เปลือกมังคุดกับการดูดซับสารตะกั่ว, แหล่งที่มา : http://www.vcharkarn.com/project/upload/0/577_1.pdf, 1 เมษายน 2554.

[6] นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2550, หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 281 น.

[7] บุญพฤกษ์ จาฏามระ, นภดล ไชยคำ และลัดดาวัลย์ ผดุงทรัพย์, 2540, เคมี 2, อักษรเจริญทัศน์, กรุงเทพฯ, 460 น.

[8] ประจวบ ฉายบุ และบัญชา ชวาลไทย, 2550, การใช้เปลือกลำไยเป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในสารละลาย, แหล่งที่มา : http://kucon.lib.ku. ac.th/cgi-bin/kucon.exe?rec_id=010689&database=kucon&search_type= link&table=mona&back_path=/agre/mona&lang=thai&format_name=TFMON, 1 เมษายน 2554.

[9] พรรษกร ใจประดับเพชร, 2549, การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขาม, แหล่งที่มา : http://kmcenter.rid.go.th/kcresearch/km/pdf/1350/VC02353.pdf, 1 เมษายน 2555.

[10] ยุวรัตน์ ปรมีศนาภรณ์, 2554, การพัฒนาวัสดุดูดซับจากเปลือกไข่เพื่อกำจัดแคดเมี่ยม, แหล่งที่มา : http://www.aseanenvironment.info/scripts/count_article.asp%3FArticle_code.

[11] รัตนา มหาชัย, 2542, การศึกษาวัสดุธรรมชาติเพื่อดูดซับโลหะที่มีพิษในน้ำเสีย, แหล่งที่มา : http://www.champa.kku.ac.th/sci_journal/detail.asp?vol=27&no=2, 1 เมษายน 2555.

[12] รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา, 2554, จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร, ว.วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 21: 337-348.

[13] สมาคมผู้ตรวจสอบและบริหารความปลอดภัยอาคาร, 2556, ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน, แหล่งที่มา : http://www.bsa.or.th, 5 ธันวาคม 2556.

[14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547, ถ่านกัมมันต์ มอก. 900–2547 ICS 71.100.80, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

[15] Al-Asheh, S., Banat, F. and Al-Rousan, F., 2003, Beneficial reuse of chicken feathers

in removal of heavy metal from wastewater, J. Clean Prod. 11: 321-326.

[16] Benguella, B. and Benaissa, H., 2002, Cadmium removal from aqueous solutions by chitin: Kinetic and equilibrium studies, J. Hazard Mater. 36: 2463-2474.

[17] Brown, P., Jefcoat, A.I., Parrish, D., Gill, S. and Graham, E., 2002, Evaluation of the adsorptive capacity of peanut hull pellets for heavy metals in solution, Adv. Environ. Res. 4: 19-29.

[18] Chu, K.H. and Hashim, M.A., 2001, Desorption of Copper from Polyvinyl alcohol immobilized seaweed biomass, Acta Biotechnol. 21: 295-306.

[19] Faur-Brasquet, C., Kadirvelu, K. and Le Cloirec, P., 2002, Removal of metal ions from aqueous solution by adsorption onto activated carbon cloths: adsorption competition with organic matter, Carbon 40: 2387-2392.

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

[21] Kannan, N. and Veemaraj, T., 2010, Green and economical adsorbent for zinc (II) ions removal by adsorption from water environment using batch mode and fixed bed column experiments, Agr. Food Chem. 9: 1156-1167.

[22] Li, Y., Xia, B., Zhao, Q., Liu, F., Zhang, P., Du, Q., Wang, D., Li, D., Wang, Z. and Xia, Y., 2011, Removal of copper ions from aqueous solution by calcium alginate immobilized kaolin, J. Environ. Sci. 23: 404-411.

23] Low, K.S., Lee, C.K. and Lee, K.P., 1993, Sorption of copper by dye-treated oil-palm, Biores. Tech. 44: 109-112.

[24] Odozi, T.O., Okeke, S. and Lartey, R.B., 1985, Studies on binding metal ions with polymerized corn cob and a composite resin with sawdust and onion skin, Agr. Wastes 12: 13-21.

[25] Ozer, A. and Pirincci, H.B., 2006, The adsorption of Cd (II) ions on sulfuric acid treated wheat ban, J. Hazard Mater. 137: 849-855.

[26] Pradthana, 2008, Adsorption process, Available Source : http://pradthana.wordpress.com, March 20, 2011.

[27] Puntharod, R., 2001, Removal of metal ions in aqueous solution using agricultural byproducts, M.S. thesis, Chiangmai University, Chiangmai.

[28] Randoll, J.M., Bermann, R.L., Garrett, V. and Waiss, A.C.Jr., 1974, Use of bark to remove heavy metal ions from waste solution, Forest Prod. J. 24(9): 80-84.

[29] Richard, I.M., 1996, Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces, John Wiley & Son, Inc., New York.

[30] Robinson, T., Chandran, B. and Nigam, P., 2002, Effect of pretreatments of three waste residues, wheat straw, corncobs and barley husks on dye adsorption, Biores. Tech. 85: 119-124.