

การดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากเปลือกและเมล็ดมะขาม

เอี่ยมพร รัตนสิงห์^{1*} โชคชัย แจ่มอำพร² อภิชาติ จินแพทย³

Received : September 19, 2022

Revised : December 1, 2023

Accepted : December 15, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขามด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมีและกระบวนการคาร์บอนไนซ์ โดยนำเปลือกและเมล็ดมะขามที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเท่ากับ 11.69 และ 7.20 มาเผาที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 37.29 และ 31.37 ตามลำดับ จากนั้นกระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และเผาที่ 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วย เปลือกมะขามเผาที่ 500 องศาเซลเซียส (AC-1) เปลือกมะขามเผาที่ 600 องศาเซลเซียส (AC-2) เมล็ดมะขามเผาที่ 500 องศาเซลเซียส (AC-3) และเมล็ดมะขามเผาที่ 600 องศาเซลเซียส (AC-4) มีค่าร้อยละเท่ากับ 28.77, 27.16, 28.68 และ 28.00 ตามลำดับ แล้วนำมาหาค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 mg/g (643 และ 717 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มาศึกษาการดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด AC-2, AC-3 และ AC-4 มีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนได้ใกล้เคียงกันทุกความเข้มข้น และถ่านกัมมันต์ชนิด AC-4 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้มากที่สุด รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ชนิด AC-3 AC-2 และ AC-1 ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ถ่านกัมมันต์ (AC-4) ที่ได้จากเมล็ดมะขามที่ ถูกกระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระดับอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: การดูดซับ ตะกั่ว (II) ไอออน ถ่านกัมมันต์ เปลือกมะขาม เมล็ดมะขาม สังกะสี (II) ไอออน

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจารย์ประจำหลักสูตร ภาควิชาเคมี-ฟิสิกส์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
อีเมล: auamporn_r@rtaf.mi.th

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจารย์ประจำหลักสูตร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหาร กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ
นวมินทกษัตริยาธิราช อีเมล: chokchai_cham@rtaf.mi.th

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาจารย์ประจำหลักสูตร ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหาร กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ
นวมินทกษัตริยาธิราช อีเมล: apichart_jin@rtaf.mi.th

* ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: auamporn_r@rtaf.mi.th

ADSORPTION OF LEAD (II) AND ZINC (II) IONS IN SYNTHESIZED WASTEWATER WITH ACTIVATED CARBON DERIVED FROM TAMARIND PEEL AND SEED

Auamporn Rattanasing^{1*} Chokchai Chamamporn² Apichart Jinnapat³

Abstract

This research investigated the synthesis of activated carbon from tamarind peel and seed through a chemical activation and carbonization process. Initially, tamarind peel and seed, with moisture content percentages of 11.69 and 7.20, were calcined at 400°C for 2 hours. It was found that the average charcoal percentages were 37.29 and 31.37, respectively. Subsequently, they were activated with H₃PO₄ and carbonized at 500°C and 600°C for 2 hours, resulting in four types of activated charcoal: tamarind peel at 500°C (AC-1), tamarind peel at 600°C (AC-2), tamarind seed at 500°C (AC-3), and tamarind seed at 600°C (AC-4). The activated carbon content percentages were 28.77, 27.16, 28.68, and 28.00, respectively. The iodine number of activated carbon in AC-3 and AC-4 was found to be greater than 600 mg/g (643 and 717 mg/g, respectively). All types of activated carbon were then evaluated for the adsorption of lead (II) and zinc (II) ions in synthesized wastewater. It was observed that AC-2, AC-3, and AC-4 activated carbon showed similar efficiency in adsorbing lead (II) ions, while AC-1 exhibited the lowest efficiency. For the adsorption of zinc (II) ions, AC-4 activated carbon was the most effective, followed by AC-3 and AC-2, with AC-1 being the least effective. Consequently, this research concluded that the most effective activated carbon for adsorbing lead and zinc (II) ions in synthesized wastewater is the one derived from tamarind seed, activated with H₃PO₄, and carbonized at 600°C for 2 hours. AC-3 and AC-4 can be utilized as industrial powdered activated carbon.

Keywords: Adsorption, Lead (II) ions, Activated carbon, Tamarind peel, Tamarind seed, Zinc (II) ions

¹ Assistance Professor of Department of Chemistry-Physics, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force, e-mail: auamporn_r@rtaf.mi.th

² Assistance Professor of Department of Military Materials, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force, e-mail: chokchai_cham@rtaf.mi.th

³ Assistance Professor of Department of Military Materials, Academic Faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force, e-mail: apichart_jin@rtaf.mi.th

* Corresponding author, e-mail: auamporn_r@rtaf.mi.th

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมได้สร้างผลกระทบในทุกระดับและทวีความรุนแรงขึ้น โดยเฉพาะด้านคุณภาพน้ำ ในรอบ 10 ปีที่ผ่านมา (ปี 2552 – 2562) แหล่งน้ำส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์พอใช้ และในปัจจุบันไม่พบแหล่งน้ำที่มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ดีมาก สาเหตุสำคัญที่ทำให้คุณภาพน้ำผิวดินและน้ำทะเลชายฝั่งเสื่อมโทรมเนื่องมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งการระบายน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดมลพิษลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากสถานประกอบการในชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม และการประกอบกิจกรรมทางการเกษตรที่มีการระบายน้ำทิ้งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) จึงมีการจัดทำแผนการจัดการคุณภาพน้ำของประเทศระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) มีกรอบแนวคิดโดยใช้หลักการสร้างความสมดุลระหว่างเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน (คณะกรรมการกำหนดนโยบายและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ, 2558) ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 การเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2560)

กองทัพอากาศแม้ไม่ใช่ผู้รับผิดชอบโดยตรงด้านสิ่งแวดล้อมแต่มีการกำหนดยุทธศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่สำคัญ 3 ประการ คือ ยุทธศาสตร์ที่ 1 ป้องกันและลดการเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ต้นทาง ยุทธศาสตร์ที่ 2 พัฒนาระบบการจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ และยุทธศาสตร์ที่ 3 เสริมสร้างเครือข่ายและองค์ความรู้ด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ซึ่งในแต่ละยุทธศาสตร์ได้เน้นถึง ปัญหาของน้ำเสีย ขยะ และอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยุทธศาสตร์ย่อยที่ 1.2 ป้องกันและลดการเกิดปัญหาด้านน้ำที่ต้นทาง (กองทัพอากาศ, 2563) กองทัพอากาศมีภารกิจที่หลากหลายนอกเหนือจากภารกิจหลักในการป้องกันประเทศ มีภารกิจด้านการสนับสนุนอื่น ๆ ที่บางครั้งก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำได้ เช่น กองโรงงาน 3 สฟ.ทอ. เป็นหน่วยงานที่มีภารกิจในการผลิตสร้างซ่อมดัดแปลงตัวลูกระเบิด ลูกระเบิดและชิ้นส่วนที่เป็นโลหะของจรวด ย่อมสปีลออกกระสุน และมีน้ำเสียของกิจกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อน ปัจจุบันน้ำเสียที่เกิดขึ้นก่อนการบำบัดพบว่า มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งโลหะหนักเป็นอันตรายต่อร่างกายหากสะสมอยู่ในปริมาณสูง เช่น สังกะสี (II) อาจเกิดอาการจุกไข้ หนาวสั่น และอาเจียน แคดเมียมอาจทำให้ไตทำงานผิดปกติ ตะกั่ว (II) เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะไปลดการสร้างฮีโม (Heme) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเม็ดเลือด (Nguyen et al., 2013)

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่นิยมใช้วิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มากกว่าวิธีการแลกเปลี่ยนประจุไอออน (Muzenda et al., 2011) หรือวิธีการทางเคมีไฟฟ้า เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก สำหรับวิธีการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (ACs) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เพราะมีพื้นที่ผิวและมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมาก สามารถประยุกต์ใช้ในงานทางวิศวกรรม เช่น บำบัดน้ำเสีย และมีความสามารถในการขจัดมลพิษที่หลากหลายรวมทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในของเหลวหรือแก๊ส (Suhas & Ribeiro, 2007) เช่นงานวิจัยของ ธีญญาลักษณ์ เกียรติธนาสกุล (2552) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือก

ไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีทางกายภาพเพื่อกำจัดตะกั่ว โดยการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาทำการคาร์บอนไนซ์ พบว่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4 มีค่าการดูดซับเท่ากับ 3.9 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 30 นาที อภิปรียา คงสุวรรณ (2552) ได้ศึกษาการคืนสภาพทองแดงจากสารละลายผสมของทองแดงและตะกั่ว (II) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มาดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักของทองแดงและตะกั่ว พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากกว่าทองแดง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซิตริกและอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วและทองแดงสูงขึ้น

ปัจจุบันมีการนำของเสียทางการเกษตรมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ชีวมวลที่เป็นของเสียทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม กากกาแฟ ลิกนิน และสารชีวมวลอื่น ๆ (Jutakradsada et al., 2016) ผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการนำเศษวัสดุเหลือใช้จากชุมชน ได้แก่ เปลือกและเมล็ดมะขามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการทางเคมี เนื่องจากมีการนำถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามาใช้ประโยชน์ในการกำจัดสี (จักริน นักรู้, 2549) และนำถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามเป็นตัวกรองอากาศ (ณิชนันท์ คำนวนสินธุ์ และคณะ, 2551) โดยการศึกษากระบวนการทำถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขาม เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นใช้เองภายในประเทศ ลดต้นทุนการผลิตถ่านกัมมันต์ และสามารถเลือกผลิตถ่านที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้ลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียและเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้ในชุมชนอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขามด้วยกระบวนการคาร์บอนไนซ์
2. เพื่อศึกษาการดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เปลือกและเมล็ดมะขามได้รวบรวมจากหมู่บ้านคลองหินปูน ตำบลวังไทร อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นนำเปลือกและเมล็ดมะขามมาทำความสะอาดขึ้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

1.2 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์

นำเปลือกและเมล็ดมะขามมาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักถ่านที่ได้แล้วมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ถ่าน จากนั้นนำถ่านที่ได้มาบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 20 mesh และกระตุ้นด้วย 85%w/w H_3PO_4 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำถ่านที่ได้มาเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างกรดด้วยน้ำกลั่นจนหมด แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขามทั้ง 4 ชนิด มาวิเคราะห์คุณภาพของถ่านกัมมันต์ด้วยการหาค่าไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine number) ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94

2. การศึกษาการดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนจากสารละลายเริ่มต้น 1,000 ppm $Pb(NO_3)_2$ และ $(CH_3COO)_2Zn$ ตามลำดับ ได้ความเข้มข้นดังนี้ ปริมาณตะกั่ว (II) ไอออนเท่ากับ 3.57, 8.80, 20.27, 43.53 และ 72.84 ppm และปริมาณสังกะสี (II) ไอออนเท่ากับ 3.57, 8.80, 20.27, 43.53 และ 72.84 ppm จากนั้นนำไปศึกษาการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดต่อไป

2.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานของตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออน

นำสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนที่ความเข้มข้นอย่างละ 100 ppm มาเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนจนได้สารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 0.5, 2.0, 10.0, 20.0, 40.0 และ 80.0 ppm ตามลำดับ จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES

2.3 การดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออน

ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกและมะขามเมล็ดทั้ง 4 ชนิด จำนวน 0.5 กรัม แล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว (II) ไอออน 3.57 ppm จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และนำน้ำเสียที่ได้จากการกรองนำมาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว (II) ไอออนที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมา-ออปติคอลมิสชันสเปกโตรมิเตอร์ (ICP-OES) ทำการทดลองซ้ำที่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีตะกั่ว (II) ไอออน 8.80, 20.27, 43.53 และ 72.84 ppm และน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสี (II) ไอออนไอออนที่ความเข้มข้น 3.57, 8.80, 20.27, 43.53 และ 72.84 ppm

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ค่าความชื้นในเปลือกและเมล็ดมะขาม

นำเปลือกและเมล็ดมะขามที่ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน มาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักของเปลือกและเมล็ดมะขามคงที่ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า ค่าความชื้นเฉลี่ยภายในเปลือกและเมล็ดมะขาม มีค่าเท่ากับ 11.69% และ 7.20% ตามลำดับ โดยความชื้นเฉลี่ยของเปลือกมะขามมีค่าสูงกว่าเมล็ดมะขามอยู่ 4.49%

2. การหาเปอร์เซ็นต์ถ่าน

เปลือกและเมล็ดมะขามที่ผ่านการอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จำนวน 20 กรัม มาทำการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักหลังเผาเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ถ่าน ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านของเปลือกและเมล็ดมะขาม

รายการ	เปลือกและเมล็ดมะขาม					
	เปลือก 1	เปลือก 2	เปลือก 3	เมล็ด 1	เมล็ด 2	เมล็ด 3
น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	20.01	20.00	20.01	20.13	19.91	19.99
น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	7.45	7.46	7.47	6.31	6.23	6.29
% ถ่าน	37.23	37.30	37.33	31.35	31.29	31.47
ค่าเฉลี่ย % ถ่าน	37.29±0.05			31.37±0.09		

จากตารางที่ 1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านของเปลือกและเมล็ดมะขาม พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านเฉลี่ยจากเปลือกและเมล็ดมะขาม มีค่าเท่ากับ 37.29% และ 31.37% ตามลำดับ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านเฉลี่ยของเปลือกมะขามมีค่าสูงกว่าเมล็ดมะขามอยู่ 5.92%

3. การหาเปอร์เซ็นต์ถ่านกัมมันต์

นำถ่านที่ได้จากเปลือกและเมล็ดมะขามมากระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส. จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งทิ้งให้เย็นจะได้ถ่านกัมมันต์ แล้วนำมาล้างด้วยน้ำจนมีสภาพเป็นกลาง จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ 4 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกมะขามที่เผา 500 องศาเซลเซียส (AC-1) เปลือกมะขามที่เผา 600 องศาเซลเซียส (AC-2) เมล็ดมะขามที่เผา 500 องศาเซลเซียส (AC-3) และเมล็ดมะขามที่เผา 600 องศาเซลเซียส (AC-4) ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านกัมมันต์ของเปลือกและเมล็ดมะขาม

ส่วนของมะขาม	อุณหภูมิเผา (°C)	ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (เปอร์เซ็นต์)
เปลือกมะขาม	500 °C (AC-1)	1	20.01	5.79	28.93
		2	20.00	5.73	28.63
		3	20.00	5.75	28.75
	ค่าเฉลี่ย				28.77±0.15

ตารางที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านกัมมันต์ของเปลือกและเมล็ดมะขาม (ต่อ)

ส่วนของมะขาม	อุณหภูมิเผา (°C)	ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (กรัม)	น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (เปอร์เซ็นต์)
เปลือกมะขาม	600 °C (AC-2)	1	20.01	5.44	27.18
		2	20.00	5.40	27.00
		3	20.01	5.46	27.30
	ค่าเฉลี่ย				27.16±0.15
เมล็ดมะขาม	500 °C (AC-3)	1	20.00	5.74	28.70
		2	20.00	5.71	28.55
		3	20.00	5.76	28.80
	ค่าเฉลี่ย				28.68±0.13
	600 °C (AC-4)	1	20.00	5.63	28.15
		2	20.00	5.57	27.85
		3	20.01	5.60	28.00
	ค่าเฉลี่ย				28.00±0.15

จากตารางที่ 2 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ AC-1, AC-2, AC-3 และ AC-4 ชนิด มีค่าเปอร์เซ็นต์ถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 28.77, 27.16, 28.68 และ 28.00% ตามลำดับ นั้นมีค่าลดลงอีกเนื่องจากต้องผ่านกระบวนการทางความร้อนซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้เปลือกและเมล็ดมะขามสูญเสียมวลอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอน

4. การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขาม

ถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส ทั้ง 4 ชนิด นำไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้

ถ่านกัมมันต์	ส่วนของมะขาม	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
AC-1	เปลือกมะขาม	500	404
AC-2	เปลือกมะขาม	600	466
AC-3	เมล็ดมะขาม	500	643

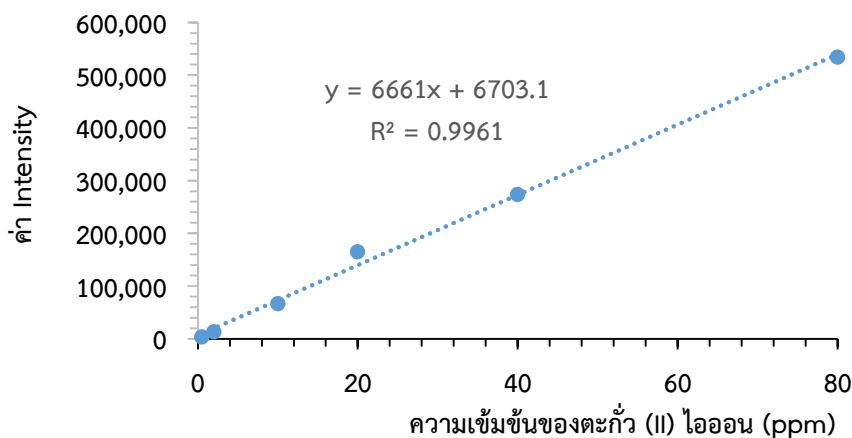
ตารางที่ 3 ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ (ต่อ)

ถ่านกัมมันต์	ส่วนของมะขาม	อุณหภูมิที่เผา (องศาเซลเซียส)	ค่าการดูดซับไอโอดีน (mg/g)
AC-4	เมล็ดมะขาม	600	717
ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม)			600

จากตารางที่ 3 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดมะขามทั้ง 4 ชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC-4 มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากที่สุด รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-2 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ AC-1 มีค่าการดูดซับไอโอดีนน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเมล็ดมะขามมีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกมะขาม และอุณหภูมิที่เผาพบว่า ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ที่กำหนดค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 มีค่าการดูดซับไอโอดีนมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงสามารถนำถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 ไปใช้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระดับอุตสาหกรรมได้

4. กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออน

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 0.50, 2.00, 10.00, 20.00, 40.00 และ 80.00 ppm ตามลำดับ และนำมาวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว (II) ไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES พบว่า ได้ค่า Intensity ดังนี้ 3,125.29, 13,272.85, 66,709.31, 165,150.29, 273,754.21 และ 534,006.37 ตามลำดับ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ไอออนกับค่า Intensity พบว่า ได้กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออนดังแสดงในภาพที่ 1

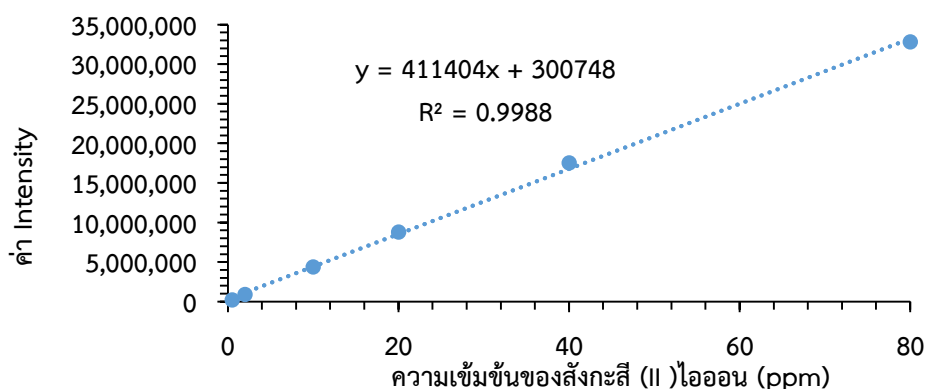


ภาพที่ 1 กราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออน

จากกราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออนได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่ว (II) ไอออนกับค่า Intensity ที่มีสมการ คือ $y = 6,661x + 6,703.1$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9961

5. กราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี (II) ไอออน

เตรียมสารละลายมาตรฐานสังกะสี (II) ไอออนที่ความเข้มข้น 0.50, 2.00, 10.00, 20.00, 40.00 และ 80.00 ppm ตามลำดับ และนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี (II) ไอออนด้วยเครื่อง ICP-OES พบว่า ได้ค่า Intensity ดังนี้ 215,633.8, 881,148.4, 4,378,977, 8,776,093, 17,499,377 และ 32,792,380 ตามลำดับ เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสี (II) ไอออนกับค่า Intensity พบว่า ได้กราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี (II) ไอออนดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี (II) ไอออน

จากกราฟมาตรฐานของสารละลายสังกะสี (II) ไอออนได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสังกะสี (II) ไอออนกับค่า Intensity ที่มีสมการ คือ $y = 411404x + 300748$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9988

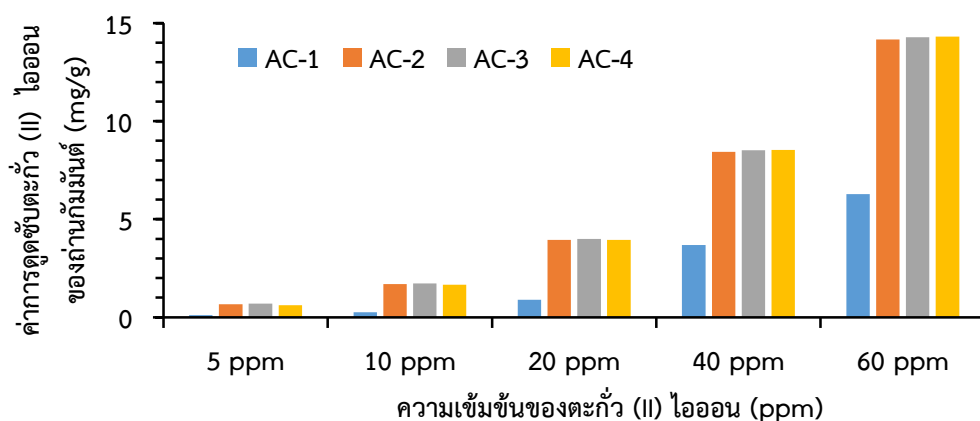
6. การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 3.57, 8.80, 20.27, 43.53 และ 72.84 ppm และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว (II) ไอออนที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง ICP-OES และนำมาหาค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4 และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนกับความเข้มข้นของตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 3

ตารางที่ 4 ค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)				
	3.57 ppm	8.80 ppm	20.27 ppm	43.53 ppm	72.84 ppm
AC-1	0.11	0.25	0.89	3.68	6.28
AC-2	0.66	1.69	3.94	8.43	14.16
AC-3	0.69	1.72	3.99	8.51	14.28
AC-4	0.62	1.66	3.94	8.54	14.31

จากตารางที่ 4 แสดงค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออน ต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออน จะได้ค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มข้น 3.57, 8.80 และ 20.27 ppm ถ่านกัมมันต์ AC-3 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนได้ดีที่สุด แต่ที่ความเข้มข้น 43.53 และ 72.84 ppm ถ่านกัมมันต์ AC-4 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนได้ดีที่สุด เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4 มาหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนกับความเข้มข้นของตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

จากภาพที่ 3 พบว่า ถ่านกัมมันต์ ชนิด AC-2, AC-3 และ AC-4 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของวัสดุของถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด AC-3

และ AC-4 ที่ได้จากเมล็ดมะขามมีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนที่สูงกว่าชนิด AC-1 และ AC-2 ที่ได้จากเปลือกมะขาม ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนได้ดีกว่าเปลือกมะขาม จากนั้นนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ (%)				
	3.57 ppm	8.80 ppm	20.27 ppm	43.53 ppm	72.84 ppm
AC-1	13.01	14.37	22.18	42.48	43.33
AC-2	93.49	97.60	97.63	97.51	97.75
AC-3	96.64	98.55	99.12	98.26	98.46
AC-4	87.89	95.19	97.77	98.82	99.08

จากตารางที่ 5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายตะกั่ว (II) ไอออนต่าง ๆ พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนที่สูงที่สุดเท่ากับ 99.08% (ถ่านกัมมันต์ชนิด AC-4 ที่ความเข้มข้น 72.84 ppm) และถ่านกัมมันต์ AC-2, AC-3 และ AC-4 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนทุกความเข้มข้นได้ดี แต่ถ่านกัมมันต์ AC-1 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนได้น้อยที่สุด

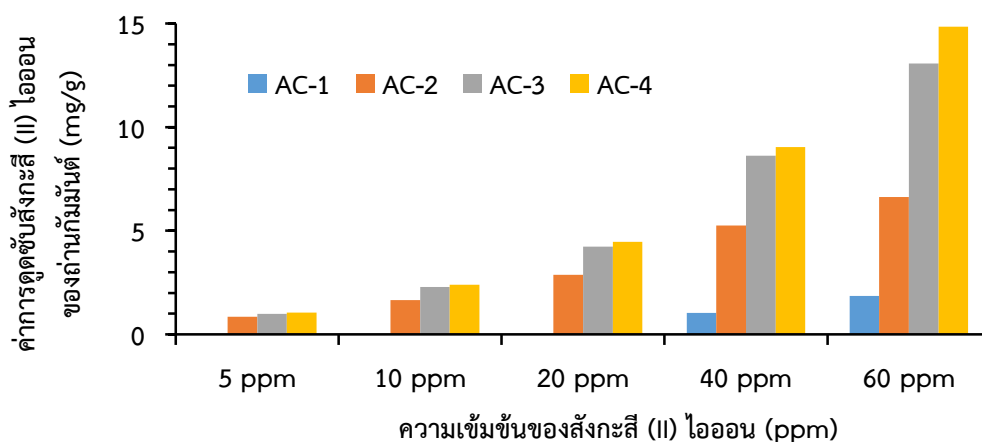
6. การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาทำการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 5.38, 12.36, 23.35, 49.50 และ 78.52 ppm และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี (II) ไอออนที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง ICP-OES และนำมาหาค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)				
	5.38 ppm	12.36 ppm	23.35 ppm	49.50 ppm	78.52 ppm
AC-1	nd	nd	nd	1.03	1.85
AC-2	0.85	1.65	2.87	5.26	6.63
AC-3	0.99	2.28	4.24	8.62	13.07
AC-4	1.05	2.39	4.47	9.04	14.85

จากตารางที่ 6 แสดงค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (II) ไอออนต่าง ๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์ AC-4 มีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้ดีที่สุด ทุกความเข้มข้น รองลงมาเป็น AC-3 และ AC-2 และถ่านกัมมันต์ AC-1 มีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้น้อยที่สุดทุกความเข้มข้น เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 6 มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนกับความเข้มข้นของสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

จากภาพที่ 4 พบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (II) ไอออนพบว่า ค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้น และถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 ที่ได้จากเมล็ดมะขามมีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนที่สูงกว่าชนิด AC-1 และ AC-2 ที่ได้จากเปลือกมะขาม และเมื่อนำมาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

ชนิดของถ่านกัมมันต์	ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ (%)				
	5.38 ppm	12.36 ppm	23.35 ppm	49.50 ppm	78.52 ppm
AC-1	nd	nd	nd	10.46	11.89
AC-2	79.61	67.13	61.93	53.33	40.66
AC-3	92.68	92.72	91.33	87.36	83.55
AC-4	98.04	97.35	95.98	91.48	32.24

จากตารางที่ 7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายสังกะสี (II) ไอออนต่าง ๆ พบว่า ที่ความเข้มข้น 5.38, 12.36, 23.35 และ 49.50 ppm ถ่านกัมมันต์ AC-4 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้ดีที่สุด แต่ที่ความเข้มข้น 78.52 ppm ถ่านกัมมันต์ AC-3 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้ดีที่สุด และถ่านกัมมันต์ชนิด AC-1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้น้อยที่สุด และพบว่า แนวโน้มของการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ชนิด AC-2, AC-3 และ AC-4 มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสี (II) ไอออน และค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ชนิด AC-3 และ AC-4 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเมล็ดมะขาม (ชนิด AC-3 และ AC-4) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้ดีกว่าเปลือกมะขาม (ชนิด AC-1 และ AC-2) และถ่านกัมมันต์ชนิด AC-4 มีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนสูงกว่าชนิด AC-3, AC-2 และ AC-1 ตามลำดับ ดังนั้นการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่มีดีที่สุด คือ ถ่านจากเมล็ดมะขามและอุณหภูมิในการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

สรุป

งานวิจัยนี้ได้้นำเปลือกและเมล็ดมะขามที่เหลือทิ้งมาสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียที่มีตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออน โดยนำเปลือกและเมล็ดมะขามที่มีความชื้น 11.69% และ 7.20% ตามลำดับนำมาเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ถ่าน เท่ากับ 37.29% และ 31.37% ตามลำดับ จากนั้นนำมากระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เท่ากับ 28.77%, 27.16%, 28.68% และ 28.00% ตามลำดับ โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number) ของถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม (643 และ 717 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ) เมื่อนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดมาศึกษาการ

ดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด AC-2, AC-3 และ AC-4 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนที่ใกล้เคียงกัน และถ่านกัมมันต์ชนิด AC-1 มีค่าการดูดซับตะกั่ว (II) ไอออนที่ต่ำที่สุด ส่วนการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์ชนิด AC-4 มีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนที่สูงที่สุด รองลงมาเป็น AC-3 และ AC-2 และถ่านกัมมันต์ AC-1 มีค่าการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนได้น้อยที่สุด และวัตถุดิบจากมะขามและอุณหภูมิที่เผาที่แตกต่างกันมีผลต่อการดูดซับสังกะสี (II) ไอออนอีกด้วย ดังนั้นสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ (AC-4) ที่ได้จากถ่านเมล็ดมะขามที่เผา 600 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับตะกั่ว (II) หรือสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด และถ่านกัมมันต์ AC-3 และ AC-4 ไปใช้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงในระดับอุตสาหกรรมได้

ข้อเสนอแนะ

1. นำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว (II) หรือสังกะสี (II) ไอออนสูงขึ้น
2. นำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักชนิดอื่นๆ เพื่อการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชในการสนับสนุนทุนสำหรับการวิจัย และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือการหาปริมาณของตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออน (ICP-OES)

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2562). รายงานสรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2561. กรุงเทพฯ: หจก.สมงคลการพิมพ์.
- กองทัพอากาศ. (2563). ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2563). กรุงเทพฯ: กองทัพอากาศ.
- คณะกรรมการกำหนดนโยบายและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ. (2558). แผนยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ.
- จักริน นักรั. (2549). การกำจัดสีจากน้ำชะขยะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ณิชนันท์ คำนวนสินธุ์, สมชาย มณีวรรณ, และอนุสรณ์ วรสิงห์. (2551). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกมะขามเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกรองอากาศในโรงเรียนอุตสาหกรรมพ่นสีรถยนต์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์งบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ 2551. พิษณุโลก.
- ชญาลักษณ์ เกียรติธนาสกุล. (2552). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธีทางกายภาพเพื่อกำจัดตะกั่ว (II). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2560). **แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560 – 2564)**. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 900-2547 ถ่านกัมมันต์**. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อภิปรียา คงสุวรรณ. (2552). การคืนสภาพทองแดงจากสารละลายผสมของทองแดงและตะกั่ว (II). วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Jutakrudsada P., Prajaksud C., Kuboonya-Aruk L., Theerakulpisut S., & Kamwilaisak. K. (2016). Adsorption characteristics of activated carbon prepared from spent ground coffee. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 18, 639-645.
- Nguyen T.A.H., Ngo H.H., Guo W.S., Zhang J., Liang S., Yue Q.Y., & Nguyen T.V. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. **Bioresource Technology**, 148, 574-585.
- Muzenda E., Kabuba J., Ntuli F., Mollagee M., & Mulaba A.F. (2011). **Cu (II) removal from synthetic waste water by ion exchange process**. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011, 19-21 october 2011 University of California, San Francisco: Newswood Limited.
- Suhas, P.J.M. C., & Ribeiro M.M.L. C. (2007). Lignin-from natural adsorbent to activates carbon: A review. **Bioresource Technology**, 98(12), 2301-2312.