

การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ จากไม้มะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

The Removal of Lead in Industrial Wastewater by Using Activated Carbon from Tamarind Wood via H_3PO_4 Activation

ธีรดิษฐ์ โพธิ์ตันติมงคล* และปิยธิดา อูระชื่น

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

แขวงหิรัญรุจี เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

Theeradit Phothitontimongkol* and Piyatida U-rachuen

Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University,

Hiran Ruchi, Thonburi, Bangkok, 10600

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายด้วยการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเตรียมได้จากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และนำไปใช้กำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมพบว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งมุม 2-θ ที่ 25.58 และ 44.56 องศา และค่าไอโอดีน 725 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามประสบความสำเร็จ ส่วนการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายศึกษาโดยการแปรผันปัจจัยต่าง ๆ ในการดูดซับ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย 5.0 เวลาในการปั่นกววน 60 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร จลนศาสตร์การดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลาย เป็นไปตามแบบจำลองอันดับสองเทียม (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 1.000) แสดงว่าเกิดการดูดซับทางเคมี จากนั้นศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน 10-250 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นไปตามแบบแลงเมียร์ (ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 1.000) เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวบนผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเท่ากับ 19.06 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าปัจจัยของการแยก (R_L) มีค่า 0.001-0.030 แสดงว่าการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเกิดได้อย่างดี นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าถ่านจากไม้มะขามในการกำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและ

บ้านเรือน มีค่าร้อยละของกำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือน 100.00 ± 0.00 และ 12.68 ± 0.11 ตามลำดับ

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์; ไม้มะขาม; การดูดซับ; ตะกั่ว(II) ไอออน

Abstract

The objective of this research is studied for the removal of Pb^{2+} in solution with the adsorption by using the activated carbon from Tamarind wood via H_3PO_4 activation. The application was the removal of lead in industrial wastewater. It was found that the activated carbon from Tamarind wood has the XRD patterns of the presence of peaks at 2θ of 25.58° and 44.56° . Iodine number is 725 mg g^{-1} . The results shown that the activated carbon from Tamarind wood was successfully prepared. The various of the adsorption parameters were observed for the removal of Pb^{2+} in solution. The results were found that the optimum condition for the adsorption of Pb^{2+} by using the activated carbon from Tamarind wood in solution were 5.0 of pH in solution, 60 min of contact time and 2.0 g L^{-1} of adsorbent dose. The adsorption kinetic of Pb^{2+} onto the activated carbon from Tamarind wood in solution followed the pseudo-second order model (correlation coefficient (R^2) = 1.000), which indicated that the adsorption occurred via chemisorptions. Then, the adsorption isotherms of the activated carbon from Tamarind wood for the removal of Pb^{2+} in solution were investigated ($10\text{-}250 \text{ mg L}^{-1}$ of the initial concentrations of Pb^{2+} solution). It was found that the adsorption isotherm followed the Langmuir model (R^2 = 1.000), which was assumed that the monolayer adsorption occurred onto the activated carbon surface from Tamarind wood. The maximum adsorption capacity of the activated carbon from Tamarind wood was 19.06 mg L^{-1} for Pb^{2+} in solution. The separation factors (R_L) are between 0.001 to 0.030, which indicate that the adsorption of Pb^{2+} onto the activated carbon from Tamarind wood is favorable. In addition, the activated carbon from Tamarind wood is higher efficiency than the charcoal from Tamarind wood for the Lead removal in the paint industrial wastewater. The removal percentages of the activated carbon and the charcoal from Tamarind wood of Pb^{2+} in the paint industrial wastewater were 100.00 ± 0.00 and 12.68 ± 0.11 , respectively.

Keywords: activated carbon; tamarind wood; adsorption; Pb^{2+}

1. บทนำ

อุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศไทยในปัจจุบัน ทำให้เกิดความก้าวหน้าและขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจ

และสังคมอย่างมาก ซึ่งโลหะหนักมักเป็นส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะตะกั่ว (Pb) นับเป็นโลหะหนักที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่

หลากหลาย ได้แก่ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุตสาหกรรมผลิตภาชนะพลาสติก และอุตสาหกรรม การผลิตยาปราบศัตรูพืชและยาฆ่าแมลง รวมทั้ง อุตสาหกรรมการผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือน สีนํ้า และหมึกพิมพ์ เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีโอกาส เกิดการปนเปื้อนและตกค้างของตะกั่วในแหล่งน้ำและ ปล่อย่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้จากอุตสาหกรรมดังกล่าว [1,2] ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำในประเทศไทยจาก สารตะกั่วได้ ซึ่งปัญหามลพิษจากสารตะกั่วนี้ถือเป็น ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหลายประเทศทั่วโลกเช่นกัน เนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารที่คงตัวไม่สลายตัวได้เอง ตามธรรมชาติ พบได้ทั้งในรูปแบบสารประกอบอินทรีย์ และอนินทรีย์ และมีความเป็นพิษสูง ถ้าสะสมใน ปริมาณที่มาก หรือสัมผัสในระยะเวลานานอาจเกิด ผลกระทบแบบเรื้อรังในสิ่งมีชีวิตทั้งคนและสัตว์ ส่งผล ต่อระบบเลือดทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง การทำงานของ ไต ตับ หัวใจ เส้นประสาท และกล้ามเนื้อผิดปกติ ทำให้เกิดเนื้องอก เกิดอาการปวดข้อ เป็นอันตรายต่อ เนื้อเยื่อสมอง ระบบทางเดินอาหาร และส่งผลต่อระดับ สดปีปัญญาโดยเฉพาะในเด็ก [3-6] หน่วยงานนานาชาติ ได้กำหนดค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ในการปนเปื้อนของ สารตะกั่วในน้ำ [3] เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการ ควบคุม รวมถึงประเทศไทยก็ได้กำหนดค่ามาตรฐาน คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรมของปริมาณตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อ ลิตร (mg L^{-1}) [7] ดังนั้นเพื่อให้ปริมาณตะกั่วในน้ำทิ้ง จากอุตสาหกรรมอยู่ในระดับไม่เกินค่ามาตรฐานจึงต้อง มีการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตก่อนปล่อยออก สู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

สารตะกั่วที่มีการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสามารถบำบัดได้หลายวิธี ได้แก่ การแลกเปลี่ยน ไอออน (ion exchange) การแยกด้วยแผ่นเยื่อ

(membrane filtration) การจับกักโดยใช้สารเคมี (chemical coagulation) การใช้เคมีเชิงไฟฟ้า (electrochemical) และการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) เป็นต้น วิธีต่างๆ เหล่านี้ มี ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดูด ซับ (adsorption) ด้วยตัวดูดซับ (absorbent) ที่มี ต้นทุนการบำบัดต่ำ ใช้เวลาบำบัดไม่นาน การวางระบบ ไม่ยุ่งยาก และใช้สารเคมีไม่มากในการปรับสภาพน้ำ เสีย [5,6,8] ทำให้วิธีการดูดซับเป็นหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการดูดซับที่ใช้ถ่านกัม มันต์ (activated carbon) เป็น ตัว ดูด ซับ ใน กระบวนการซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนตะกั่ว จากโรงงานอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มี พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจำนวนมาก ทำให้มี ประสิทธิภาพในการดูดซับสูง [3,5,6,9-13]

การใช้ถ่านกัมมันต์ในภาคอุตสาหกรรมมี แนวโน้มที่มากขึ้น ทำให้มีการศึกษาการเตรียมถ่านกัม มันต์เพื่อช่วยลดต้นทุนจากการนำเข้าถ่านกัมมันต์โดย ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (agricultural residue) รวมถึงวัสดุทางธรรมชาติ หรือชีวมวล (biomass) เป็น วัตถุดิบตั้งต้น เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ต้นทุนต่ำ และมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง [14,15] ได้แก่ ชานอ้อย (sugar bagasse) และขี้เลื่อย (sawdust) [9] ไม้มะขาม [3,10] เมล็ดซีบัคธอร์น (sea-buckthorn stone) [11] ลูกสน (pine cone) [12] เปลือกวอลนัต (walnut shell) [4] ฝักข้าวโพด (maize tassel) [5] เมล็ดอินทผลัม (date stone) [6] เปลือกปาล์ม (palm shell) และกะลามะพร้าว (coconut shell) [13] เป็น ต้น วัตถุดิบตั้งต้นเหล่านี้จะผ่านกระบวนการ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การคาร์บอนไนซ์ (carbonization) เป็นการทำให้ ปริมาณคาร์บอนสูงมากขึ้น จากนั้นเพิ่มพื้นที่ผิว (surface area) และปริมาตรรูพรุน (pore volume) โดยผ่านขั้นตอนการกระตุ้น (activation) จนได้

ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนการกระตุ้นมี 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activate) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activate) ซึ่งวิธีการกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีที่นำมาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากไม่ยุ่งยาก เวลาการกระตุ้นน้อย อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นต่ำ และถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูง [3,6,10,11,15,16] ส่วนสารเคมีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการกระตุ้นทางเคมี คือ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพราะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และอุณหภูมิในการกระตุ้นต่ำ [14,16,17] นอกจากนี้ กรดฟอสฟอริกยังเหมาะสำหรับการกระตุ้นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำพวกไม้ [14,18-22]

การศึกษางานวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 2008-2009 ของ Singh และคณะ [10] และ Jyotikusum และคณะ [3] ใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ในการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออน (Pb^{2+}) ในน้ำเสีย ซึ่งไม้มะขามในประเทศไทยสามารถหาได้ง่าย และเป็นไม้เนื้อแข็งที่มีปริมาณคาร์บอนสูงประมาณร้อยละ 40 และปริมาณเถ้าต่ำ [23] อีกทั้งไม่พบการใช้กรดฟอสฟอริกในการกระตุ้นทางเคมี และนำมาใช้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกใช้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยวิธีแบบกะ (batch method) หาค่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity, q) ตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำสูงสุดของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามและทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการ

กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

นำไม้มะขามที่ผ่านการเผาแบบภูมิปัญญาชาวบ้านซึ่งได้เป็นถ่านจากไม้มะขาม (CT) แขนกรัดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85 ชนิดเกรดการค้า ในอัตราส่วนถ่านจากไม้มะขามต่อกรดฟอสฟอริก 1 : 3 โดยมวล เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำจนค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6-7 นำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส คัดขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (ACTP) ที่เตรียมได้ด้วยเครื่องการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction spectroscopy, XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance และทดสอบค่าไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94

2.2 ศึกษาการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยวิธีแบบกะ

ซึ่งถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจำนวน 0.10 กรัม (1.0 กรัมต่อลิตร) ใส่ในบีกเกอร์ปิเปตสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร (mL) ซึ่งเตรียมจากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว(II) ไอออน เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 5.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นกรองแยกสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน และนำไปตรวจวัดหาปริมาณตะกั่ว(II) ไอออนที่เหลือด้วยเครื่องอะตอม-มิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer, AAS) ยี่ห้อ Perkinelmer รุ่น Analyst 100 โดยทดลอง 3 ซ้ำ คำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) โดยรายงานผลการทดลองเป็น mean $\pm$ SD ของร้อยละการกำจัด (% removal) ตะกั่ว(II) ไอออน จากสมการ (1) [24] และ

ค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจากสมการ (2) [6,12] โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

$$\% \text{ removal} = \left(\frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และ C_e คือ ความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$$q = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times v \quad (2)$$

เมื่อ q คือ ค่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม, mg g^{-1}) m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม, g) และ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร, L)

2.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

ซึ่งถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามปั่นกวนในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร โดยการแปรผันค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนเป็น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ตาม ลำดับ

2.2.2 ระยะเวลาปั่นกวน (contact time) สารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามปั่นกวนในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร โดยการแปรผันระยะเวลาปั่นกวนเป็น 5, 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตาม ลำดับ

2.2.3 ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (absorbent dose) และ จลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic)

ซึ่งถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการแปรผันปริมาณเป็น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร หรือ 0.01-1.00 กรัม ตามลำดับ ปั่น

กวนในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร จากนั้นแปรผันเวลาในการปั่นกวนโดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็น 1.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) และ pseudo-second order ดังสมการ (3)-(4) ตามลำดับ [25,26]

$$q_t = q_e \left(1 - e^{-k_1 t} \right) \quad (3)$$

$$q_t = q_e \frac{q_e k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (4)$$

เมื่อ q_e และ q_t คือ ค่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล และเวลาใด ๆ ตามลำดับ; t คือ ระยะเวลาปั่นกวน (นาที, min); k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตรา (rate constant) แบบจำลอง pseudo-first order (ต่อนาที, min^{-1}) และ pseudo-second order (กรัมต่อมิลลิกรัม นาที, $\text{g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) ตามลำดับ จากแบบจำลองดังสมการ (3)-(4) สามารถเขียนในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการ (5)-(6) ตามลำดับ [24,26]

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (5)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

สำหรับอัตราการดูดซับในช่วงแรก (initial adsorption rate, h) ดังสมการ (7) เมื่อเวลาเข้าสู่ใกล้ศูนย์ สามารถใช้ k_2 และ q_e จากแบบจำลอง pseudo-second order คำนวณได้จากสมการ (6)

$$h = k_2 q_e^2 \quad (7)$$

2.2.4 ความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration) ของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจำนวน 0.20 กรัม (2.0 กรัมต่อลิตร) ปั่นกวนในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนที่อุณหภูมิ 25.0 องศาเซลเซียส โดยการแปรผัน

ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จำนวน 100 มิลลิตร จากนั้นศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich) ดังสมการ (8)-(9) ตามลำดับ [24,25]

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (8)$$

เมื่อ q_m คือ ค่าความจุการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับ (maximum adsorption capacity); b คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (Langmuir constant, ลิตรต่อมิลลิกรัม, $L \text{ mg}^{-1}$) สัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ (energy of adsorption)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (9)$$

เมื่อ K_f และ n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิช (freundlich constant) ซึ่ง K_f สัมพันธ์กับค่าความจุการดูดซับ และ n สัมพันธ์กับความเข้มข้นของการดูดซับ (adsorption intensity) จากสมการ (8)-(9) เขียนในรูปแบบสมการเส้นตรงของแลงเมียร์และฟรุนดลิชได้ดังสมการ (10)-(11) ตามลำดับ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (10)$$

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (11)$$

2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

ซึ่งถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม จำนวน 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กรัมต่อลิตร หรือ 0.05-0.20 กรัม ตามลำดับ นำน้ำเสียตัวอย่างจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือนที่ผ่านการกรอง

และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 5.0 จำนวน 100 มิลลิตร ที่มีปริมาณตะกั่วในน้ำเสียตัวอย่าง 13.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที กรองแยกน้ำเสียตัวอย่าง และนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทดลอง 3 ซ้ำ โดยรายงาน ผลการทดลองเป็น mean $\pm$ SD ของค่าร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือน

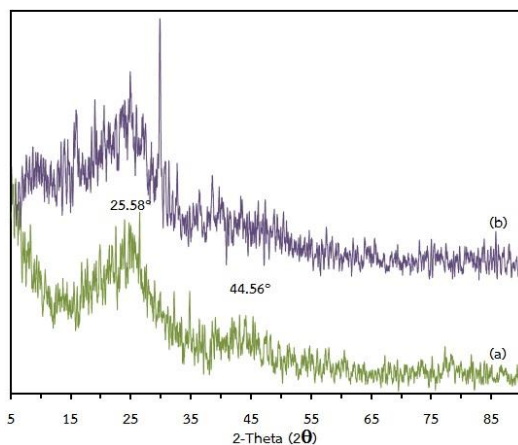
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก

ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านจากไม้มะขามด้วยกรดฟอสฟอริก เมื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (รูปที่ 1a) พบว่าปรากฏพิกที่กว้าง (broad peak) ที่ตำแหน่งมุม 2-ทีตา (2θ) ประมาณ 25.58 และ 44.56 องศา แสดงให้เห็นว่า เกิดคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) ที่ระนาบ 002 และ 100 ตามลำดับ โดยการซ้อนกันของชั้นอะโรมาติก (aromatic layer) [27] เกิดแกรไฟต์ที่จัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (turbostratic carbon structure) [28,29,30] ทั้งนี้ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 44.56 องศาสามารถยืนยันได้ว่าการสลายตัวของคาร์บอนในถ่านจากไม้มะขาม และเกิดการสร้างรูพรุนขนาดไมโคร (micropores) รวมถึงคาร์บอนอสัณฐานจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบขึ้น เนื่องจากการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก [29,31] ส่วน XRD pattern ของถ่านจากไม้มะขาม (รูปที่ 1b) พบว่าปรากฏพิกที่กว้างเพียงตำแหน่งมุม 2θ ประมาณ 25.58 องศา แสดงว่าโครงสร้างเป็นคาร์บอนอสัณฐานแต่ไม่เกิดการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและการสร้างรูพรุนขนาดไมโคร

เกิดในปริมาณต่ำ เนื่องจากไม่ถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้ไม่ปรากฏพีคที่กว้างที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 44.56 องศา บน XRD pattern ของถ่านจากไม้มะขาม



รูปที่ 1 XRD pattern ของถ่านกัมมันต์ (a) และถ่าน (b) จากไม้มะขาม

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าไอโอดีน

ตัวดูดซับ	ค่าไอโอดีน ^a (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านจากไม้มะขาม	120
ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม	725

^aค่าไอโอดีนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2547) มีค่าไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

รูพรุนที่เกิดขึ้นในถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการใช้กรดฟอสฟอริกกระตุ้นนั้น สามารถยืนยันได้โดยการทดสอบค่าไอโอดีน พบว่าค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้นเป็น 725 จาก 120 มิลลิกรัมต่อกรัม ของถ่านจากไม้มะขาม (ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นว่าปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการ

วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามยังผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2547) นับได้ว่ากระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกประสบความสำเร็จ

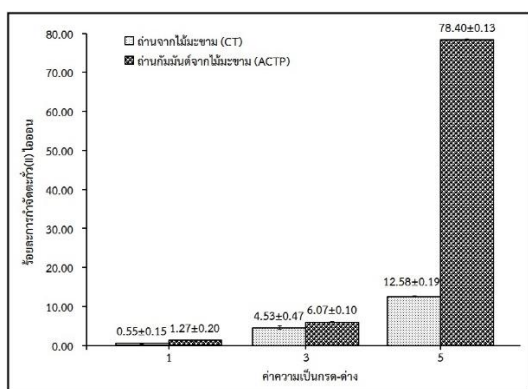
3.2 ผลการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยวิธีแบบกะ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม เพื่อการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในน้ำ โดยการแปรผันตามปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน ระยะเวลาในการบ่มกวน ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน ได้ผลการทดลองดังนี้

3.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

ผลการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 และ 11.0 ของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน โดยการดูดซับด้วยถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ดังรูปที่ 2 พบว่าค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามลดลง เมื่อสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนมีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 1 และ 3 เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นบวก ($\text{pH} < \text{pH}_{\text{ZPC}}$) ทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic repulsion force) ระหว่างไฮโดรเจนไอออน (H^+) และตะกั่ว(II) ไอออน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว (II) ไอออนของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 12.58 ± 0.19 และ 78.40 ± 0.13 ตามลำดับ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 5.0 เนื่องจากการลดลงของประจุบวกบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ หรือกล่าวได้ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นลบ ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{ZPC}}$) ทำ

ให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic attraction force) ที่แข็งแกร่งระหว่างตะกั่ว(II) ไอออนกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ [5,6,11,32,33] สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนประมาณ 7, 9 และ 11 ตามลำดับ ไม่สามารถรายงานค่าร้อยละการกำจัดตะกั่วไอออนในสารละลายของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามได้ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปทางเคมี (speciation) ของตะกั่วเป็นตะกั่ว (II) ไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ซึ่งเป็นตะกอนของแข็ง [9,24] ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนลดลง และไม่ถูกต้องตามที่ต้องการในแต่ละค่าความเป็นกรด-ด่างดังกล่าว



รูปที่ 2 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนโดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็นตัวดูดซับ

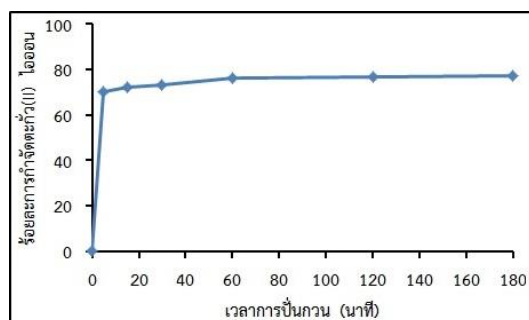
ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนเท่ากับ 5.0 ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายระหว่างถ่านกับถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0 (รูปที่ 2) พบว่าค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสาร

ละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมากกว่าถ่านจากไม้มะขามอย่างชัดเจน เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามถูกกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ทำให้เกิดพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น และส่งผลให้เกิดการดูดซับที่ดีขึ้นอย่างมาก ซึ่งพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เพิ่มขึ้น

3.2.2 ระยะเวลาในการปั่นกวสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

จากรูปที่ 3 ผลการทดลองเวลาในการปั่นกวสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม คือ 5, 15, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ พบว่าค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายในช่วงเวลา 5 นาที เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีปริมาณตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ (adsorption site) ที่มากพอ และความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายมีปริมาณมาก [33] ทำให้ตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายปรับเปลี่ยนสมดุลโดยการแพร่อย่างรวดเร็วจากบริเวณสารละลายที่มีตะกั่ว(II) ไอออนและอยู่ห่างออกไปจากตัวดูดซับ (bulk solution) มายังผิวหน้าของชั้นรอยต่อ (boundary layer) ที่อยู่ติดกับพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม จากนั้นตะกั่ว(II) ไอออนจะแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนเพื่อเกิดปฏิกิริยาการดูดซับกับ adsorption site บนผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ซึ่งช่วงเกิดปฏิกิริยาการดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในรูพรุนนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจาก 5 นาทีแรกเนื่องจาก adsorption site บนผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม และความเข้มข้นของตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายมีปริมาณลดลง จนเข้าสู่ภาวะสมดุลในการดูดซับที่เวลาปั่นกวเท่ากับ 60 นาที ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการปั่นกวเป็น 120 และ 180 นาที ตาม

ลำดับ ค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายยังคงที่ ดังรูปที่ 3 แสดงว่า adsorption site บนผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามไม่มีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับให้กับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลาย รวมถึงความเข้มข้นของตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายมีค่าเท่ากันทั้งภายในและภายนอกอุพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม [11,35]

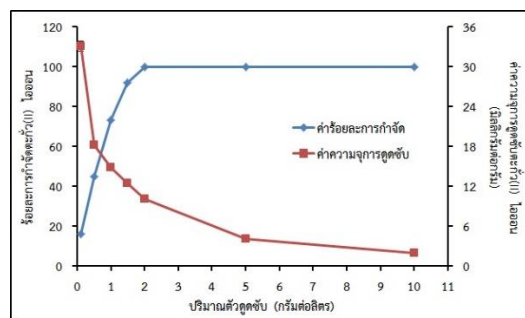


รูปที่ 3 ผลของเวลาในการปั่นกวนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

3.2.3 ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามและจลนศาสตร์การดูดซับ

ปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจำนวน 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ใช้ในการศึกษาการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.0 ปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ดังรูปที่ 4 ค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 18.36 ± 0.44 เป็น 100.00 ± 0.00 ตามลำดับ แสดงว่า adsorption site บนพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเพิ่มขึ้น ทำให้ตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายถูกดูดซับได้ดีขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัม

มันต์จากไม้มะขาม มีปริมาณลดลงจาก 33.10 ± 0.70 เป็น 2.03 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เพราะเกิดภาวะการไม่อิ่มตัวในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของ adsorption site บนพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของปริมาณตัวดูดซับจากรูปที่ 4 พบว่าปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2.0 กรัมต่อลิตร (0.20 กรัม) เป็นปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสามารถดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายได้ค่าร้อยละการกำจัดตะกั่ว(II) ไอออนคงที่เท่ากับ 100.00 ± 0.00 เทียบเท่ากับปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นเป็น 5.0 (0.50 กรัม) และ 10.0 (1.00 กรัม) กรัมต่อลิตร ตามลำดับ [3,5,12,25,32,36]



รูปที่ 4 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลาย

การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามสามารถบอกได้ถึง adsorption site บนพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่มีการแปรผันตามปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ทำให้สามารถใช้พิจารณาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้กลไกการดูดซับ (adsorption mechanism) ของตัวดูดซับนับเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องหาคำตอบโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตร แปรผันเวลาในการปั่นกวนเป็น 5-180 นาที ผล

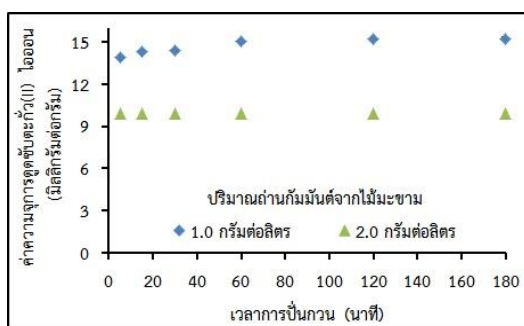
การทดลองแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม 1.0 กรัมต่อลิตร เข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับ (equilibrium adsorption) ช้ากว่า 2.0 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 60 และ 5 นาที ตามลำดับ แสดงว่าอัตราการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม 2.0 กรัมต่อลิตรเร็ว

กว่า 1.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับค่า k_2 ที่เพิ่มขึ้นจาก 5.57×10^{-2} เป็น 1.27×10^2 กรัมต่อมิลลิกรัม นาที เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 1.0 เป็น 2.0 กรัมต่อลิตร [25] (ตารางที่ 2) เนื่องจากตำแหน่ง adsorption site บนพื้นที่ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามของ 2.0 กรัมต่อลิตร มีมากกว่า 1.0 กรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2 ค่าคงที่จากแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ pseudo-first order และ pseudo-second order ของการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

ปริมาณตัวดูดซับ (g L ⁻¹)	$q_{e,exp}^n$ (mg g ⁻¹)	pseudo-first order			pseudo-second order			
		$q_{e,cal}^u$ (mg g ⁻¹)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	$q_{e,cal}^u$ (mg g ⁻¹)	k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	h mg g ⁻¹ min ⁻¹	R^2
1.0	15.24	1.53	2.76×10^{-2}	0.982	15.33	5.57×10^{-2}	13.09	1.000
2.0	9.90	6.26×10^{-3}	1.84×10^{-3}	0.204	9.89	1.27×10^2	1.24×10^4	1.000

ⁿค่าความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการทดลอง; ^uค่าความจุการดูดซับที่ภาวะสมดุลจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ

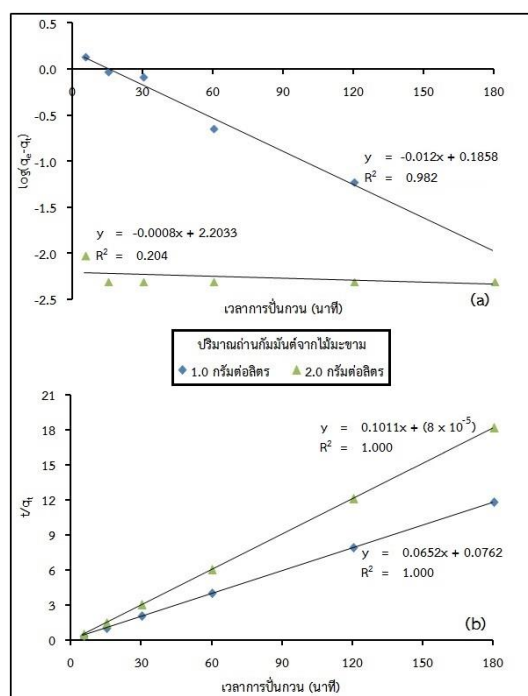


รูปที่ 5 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ที่เวลาการป้อนต่าง ๆ ในสารละลายตะกั่ว(II) ไอออน

ผลการทดลอง (รูปที่ 5) สามารถใช้ศึกษากลไกการดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetic model) 2 รูปแบบ ได้แก่ pseudo-first order และ pseudo-second order นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้น

ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ เวลาการป้อนของ pseudo-first order [สมการ (5)] และ t/q_t กับเวลาการป้อนของ pseudo-second order [สมการ (6)] ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 พบว่าลักษณะของกราฟจากแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ pseudo-second order (รูปที่ 6b) ปรากฏความเป็นเส้นตรงมากกว่าแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ pseudo-first order (รูปที่ 6a) ของทั้งปริมาณตัวดูดซับ 1.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตร โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2) ของ pseudo-second order มีค่าเท่ากับ 1.000 และ pseudo-first order มีค่าเท่ากับ 0.982 และ 0.204 ตามลำดับ รวมทั้งค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนที่ภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) เท่ากับ 15.24 และ 9.90 มิลลิกรัมต่อกรัม กับค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนที่ภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณตามแบบ

จำลอง pseudo-second order ($q_{e,cal}$) เท่ากับ 15.33 และ 9.89 มิลลิกรัมต่อกรัมของปริมาณตัวดูดซับ 1.0 และ 2.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับ $q_{e,cal}$ ตามแบบจำลอง pseudo-first order ที่แตกต่างกันอย่างมาก ดังตารางที่ 2 แสดงว่ากลไกการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม เข้ากันได้ดีกับแบบจำลอง pseudo-second order ดังนั้นสันนิษฐานได้ว่ากลไกการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเป็นการดูดซับทางเคมี (chemisorption) ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุบวกของตะกั่ว(II) ไอออน



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ pseudo-first order (a) และ pseudo-second order (b)

และประจุลบบนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม [10,12, 24,25,26] และอัตราการดูดซับในช่วงแรก (h) มีโอกาส

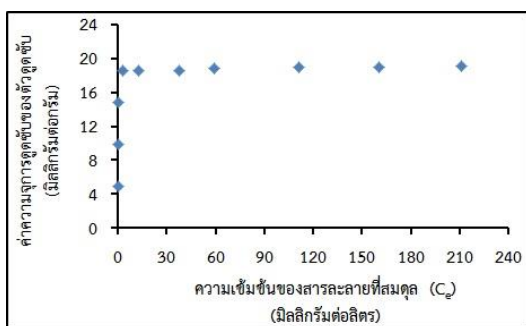
เกิดได้อย่างรวดเร็ว สามารถคำนวณได้จากสมการ (7) มีค่ากับ 13.09 และ 1.24×10^4 มิลลิกรัมต่อกรัม นาทีตามลำดับ ดังตารางที่ 2 [26,37]

3.2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm)

การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนด้วยการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ดังรูปที่ 7 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนประมาณ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เริ่มเข้าสู่ภาวะคงที่ของค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม จากนั้นเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนมากขึ้น เห็นได้ว่าค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามคงที่ แสดงว่า adsorption site บนพื้นที่ผิวรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเกิดภาวะการอิ่มตัวของการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลาย ซึ่งมีค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุด (maximum adsorption capacity, q_m) ในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม คือ 19.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ($q_{m,exp}$)

การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว(II) ไอออนด้วยการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (รูปที่ 7) สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (สมการ (10)) ระหว่าง C_e / q_e กับ C_e และฟรอนดลิช (สมการ (11)) ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ [25,26] กราฟแสดงดังรูปที่ 8a และ b ตามลำดับ และค่าคงที่ต่าง ๆ ดังตารางที่ 3 พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่า $R^2 = 1.000$ และแบบฟรอนดลิชมีค่า $R^2 = 0.802$ แสดงว่า การดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเข้า

กันได้อย่างดีตามไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งเกิดการดูดซับระหว่างตะกั่ว(II) ไอออนกับถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลายแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) บนพื้นผิวตำแหน่งจำเพาะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (specific homogeneous site) ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม [12,24,26,38] โดยค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลายจากการทดลองและการคำนวณ ($q_{m,cal}$) ที่สัมพันธ์สอดคล้องกันคือ 19.06 และ 19.01 มิลลิกรัมต่อกกรัม ตามลำดับ [39]

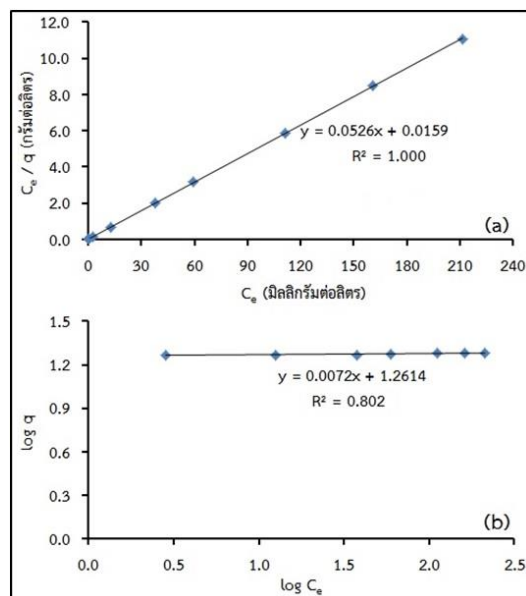


รูปที่ 7 ค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม 2.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 10-250 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 100 มิลลิตร ความเป็นกรด-ด่าง 5.0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (12)$$

ค่าปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สถานะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) คำนวณได้จากสมการ (12) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $0 < R_L (0.001-0.030) < 1$ แสดงให้เห็นว่าตะกั่ว(II) ไอออนเกิดการดูดซับได้เป็นอย่างดีบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลาย [4,11,12,24] และเมื่อพิจารณาค่าคงที่แลงเมียร์ (b) เท่ากับ 3.30

ลิตรต่อมิลลิกรัม หรือ 6.84×10^5 ลิตรต่อโมล เป็นค่าที่สูงมาก แสดงให้เห็นว่าตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายถูกดูดซับโดยตรงบน adsorption site ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยการดูดซับแบบเคมี [26,40] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองตามแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ pseudo-second order



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของไอโซเทอรัมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (a) และ ฟรุนดลิช (b)

ตารางที่ 4 แสดงค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการใช้วัสดุทางธรรมชาติ พบว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจากงานวิจัยนี้ที่ใช้กรดฟอสฟอริกในการกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายที่ระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุทางธรรมชาติชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทางธรรมชาติ และวิธีการกระตุ้น [14-16] ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำถ่าน

กัมมันต์จากไขมันหุ้มเมล็ดที่เตรียมโดยการกระตุ้นด้วยกรด
ฟอสฟอริก ทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานกับน้ำเสีย

จริงจากอุตสาหกรรมสีทาอาคารและบ้านเรือนที่มีการ
ปนเปื้อนสารตะกั่ว

ตารางที่ 3 ค่าคงที่จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากไขมันหุ้มเมล็ดในการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลาย

ตัวดูดซับ	$q_{m, exp}^a$ ($mg\ g^{-1}$)	แลงเมียร์			R^2	ฟรุนดลิช		
		$q_{m, cal}^b$ ($mg\ g^{-1}$)	b^c ($L\ mg^{-1}$)	R_L		K_f ($mg\ g^{-1}$)	n	R^2
ถ่านกัมมันต์จากไขมันหุ้มเมล็ด	19.06	19.01	3.30	0.001-0.030	1.000	18.26	138.89	0.802

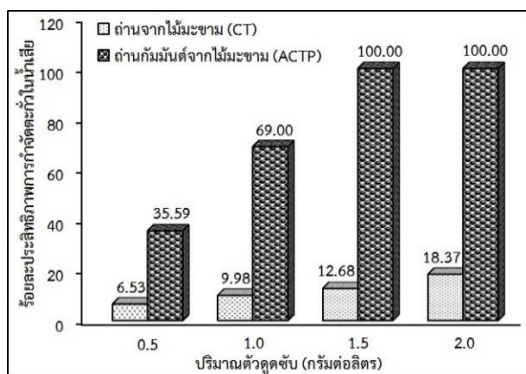
^aค่าความจุการดูดซับสูงสุดจากการทดลอง; ^bค่าความจุการดูดซับสูงสุดจากการคำนวณโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์; ^cค่า $b = 6.84 \times 10^5$ ลิตรต่อโมล

ตารางที่ 4 ค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางธรรมชาติ

ถ่านกัมมันต์จากวัสดุทางธรรมชาติ	ค่าความจุการดูดซับ ตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	รายการอ้างอิง
กากกาแฟ (coffee residue)	63.29	[24]
เมล็ดช็อคโกแลต	51.81	[11]
ฝักข้าวโพด	37.31	[5]
ลูกสน	27.53	[12]
เมล็ดแอปเปิลคอต	22.85	[41]
ฝักของมะรุมีเมล็ด (mature pods of <i>M. oleifera</i> containing seed)	19.20	[42]
ไขมันหุ้มเมล็ด	19.06	งานวิจัยนี้
ขี้เลื่อย	17.50	[9]
ผักตบชวา (<i>eichhornia</i>)	16.61	[43]
เมล็ดปาล์ม (palm pit)	15.20	[9]
เปลือกวอลนัต	14.43	[4]
ขานอ้อย	13.70 และ 7.30	[9,44]
เปลือกเฮเซลนัท	13.05	[45]
ปุ๋ยคอก-ปุ๋ยหมัก (cattle-manure-compost)	6.15	[46]
มะพร้าว (coconut)	4.38	[47]
เปลือกหุ้มเมล็ดของต้นปาล์ม (seed hull of the palm tree)	3.77	[47]

3.3 ผลประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

อุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารบ้านเรือนนับเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีกำลังการผลิต เพื่อตอบสนองการใช้งานในสังคมอย่างมาก สารตะกั่วเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมนี้ ซึ่งโอกาสที่สารตะกั่วจะมีการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตสามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นงานวิจัยได้เลือกน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือนเป็นตัวอย่างน้ำเสียอุตสาหกรรม เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้ ปริมาณสารตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือนความเข้มข้นเริ่มต้น 13.43 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมา 100 มิลลิลิตร ปั่นทอนกับถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามจำนวน 0.5-2.0 กรัมต่อลิตร เป็นเวลา 60 นาที ผลการทดลองดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือนโดยใช้ถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม

ผลการทดลองดังรูปที่ 9 พบว่าร้อยละการ

กำจัดตะกั่วในน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 6.53 ± 0.26 เป็น 18.37 ± 0.19 ของถ่านจากไม้มะขาม และ 35.59 ± 0.07 เป็น 100.00 ± 0.00 ของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด จาก 0.5 เป็น 2.0 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เนื่องจากตำแหน่ง adsorption site บนพื้นผิวของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีจำนวนเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ทำให้ดูดซับตะกั่วในน้ำเสียได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียของถ่านกับถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม (รูปที่ 9) เห็นได้ว่าการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามมีประสิทธิภาพดีกว่าถ่านจากไม้มะขามอย่างชัดเจนในทุกปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากการใช้กรดฟอสฟอริกในการกระตุ้นถ่านจากไม้มะขาม ซึ่งผลร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในข้างต้นที่อธิบายไว้ จากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่ใช้มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในการทดลองนี้ คือ 1.5 และ 2.0 กรัมต่อลิตร ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียเท่ากับ 100.00 ± 0.00 หรือมีค่าความจุการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียเท่ากับ 8.95 และ 6.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เหมาะสมและสามารถใช้กำจัดตะกั่วในน้ำเสียได้จากการทดลองนี้ คือ 1.5 กรัมต่อลิตร แต่ถ้ามีการนำไปใช้กับภาวะของน้ำเสียที่แตกต่างกันออกไป รวมถึงการใช้กำจัดตะกั่วจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต้องมีการทดสอบเพื่อปรับเปลี่ยนปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามให้เหมาะสมตามสภาพและปริมาณตะกั่วในน้ำเสียต่อไป แต่ทั้งนี้จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้ในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตสีทาอาคาร

และบ้านเรือน ยืนยันได้ว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่กระตุ้นโดยใช้กรดฟอสฟอริกประสบความสำเร็จในการเตรียมและนำมาใช้ได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมตัวอย่าง

4. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามได้โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ยืนยันลักษณะโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ปรากฏตำแหน่งมุม 2-θ ที่ค่าประมาณ 25.58 และ 44.56 องศา และค่าไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D 4607-94 มีค่าเท่ากับ 725 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามด้วยวิธีแบบกะ พบว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนในสารละลายได้มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 เวลาในการปั่นกว 60 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 2.0 กรัมต่อลิตร หรือ 0.20 กรัม จลนศาสตร์การดูดซับเข้ากันได้ดีตามแบบจำลอง pseudo-second order ($R^2 = 1.000$) สันนิษฐานได้ว่ากลไกการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุบวกของตะกั่ว(II) ไอออนและประจุลบบนผิวถ่านกัมมันต์จากไม้มะขาม ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องไปตามสมการแลงเมียร์ ($R^2 = 1.000$) และค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายของถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามเท่ากับ 19.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับค่าความจุการดูดซับตะกั่ว(II) ไอออนสูงสุดในสารละลายจากการคำนวณ คือ 19.01 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ค่า R_L มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $0 < R_L (0.001-0.030) < 1$ ยืนยันได้ว่า ตะกั่ว(II) ไอออนเกิดการดูดซับได้เป็นอย่างดีติดบนถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในสารละลาย และเมื่อ

นำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามดูดซับสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมสีทาอาคารและบ้านเรือน พบว่าสามารถใช้กำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งค่าร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียเท่ากับ 100.00 ± 0.00 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามที่เตรียมได้ประสบความสำเร็จในการใช้กำจัดสารตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ทั้งนี้ควรนำถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในงานวิจัยนี้ทดสอบการกำจัดสารตะกั่วในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมอื่น ๆ รวมถึงศึกษาการดูดซับโลหะหนักและสารมลพิษชนิดอื่น ๆ เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น และสามารถใช้เป็นข้อมูลความรู้เพิ่มเติมให้กับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา และขอขอบพระคุณ บริษัทผลิตสีทาอาคารและบ้านเรือน ที่อนุเคราะห์น้ำเสียตัวอย่างจริง เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์จากไม้มะขามในงานวิจัยนี้

6. รายการอ้างอิง

- [1] ปิยะรัตน์ โตสุโขวงศ์, สารตะกั่วในอุตสาหกรรม, แหล่งที่มา : http://cai.md.chula.ac.th/lesson/lesson4613/lesson/page_f.html, 2 พฤศจิกายน 2558.
- [2] กุลธิดา ถาวรกิจการ และกิจชัย ศิริวัฒน์, พิษจากโลหะตะกั่ว, แหล่งที่มา : http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=41, 2 พฤศจิกายน 2558.
- [3] Acharya, J., Sahu, J.N., Mohanty, C.R. and

- Meikap, B.C., 2009, Removal of lead(II) from wastewater by activated carbon developed from *Tamarind wood* by zinc chloride activation, Chem. Eng. J. 149: 249-262.
- [4] Manoochchri, M., Khorsand, A. and Hashemi, E., 2012, Role of activated carbon modified by H_3PO_4 and K_2CO_3 from natural adsorbent for removal of Pb(II) from aqueous solutions, Carbon Lett. 13: 115-120.
- [5] Moyo, M., Chikazaza, L., Nyamunda, B.C. and Guyo, U., 2013, Adsorption batch studies on the removal of Pb(II) using maize tassel based activated carbon, J. Chem. Article ID 508934, 8 p.
- [6] Chaouch, N., Ouahrani, M.R. and Laouini, S.E., 2014, Adsorption of lead(II) from aqueous solutions onto activated carbon prepared from algerian dates stones of *Phoenix dactylifera* L. (Ghars variety) by H_3PO_4 activation, Orient. J. Chem. 30: 1317-1322.
- [7] กรมควบคุมมลพิษ, มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม, แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html, 2 พฤศจิกายน 2558.
- [8] ปัญญา มณีจักร, 2555, การเตรียมถ่านกัมมันต์จากลูกทุกวาง, ว. สมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย 18(1): 119-128.
- [9] Giraldo, L. and Moreno-Pirajan, J.C., 2008, Pb^{2+} adsorption from aqueous solutions on activated carbons obtained from lignocellulosic residues, Braz. J. Chem. Eng. 25: 143-151.
- [10] Singh, C.K., Sahu, J.N., Mahalik, K.K., Mohanty, C.R., Raj Mohan, B. and Meikap, B.C., 2008, Studies on the removal of Pb(II) from wastewater by activated carbon developed from *Tamarind wood* activated with sulphuric acid, J. Hazard. Mater. 153: 221-228.
- [11] Mohammadi, S.Z., Karimi, M.A., Afzali, D. and Mansouri, F., 2010, Removal of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon from sea-buckthorn stones by chemical activation, Desalination 262: 86-93.
- [12] Momčilović, M., Purenović, M., Bojić, A., Zarubica, A. and Randelović, M., 2011, Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon, Desalination 276: 53-59.
- [13] Rahman, M.M., Adil, M., Yusof, A.M., Kamaruzzaman, Y.B. and Ansary, R.H., 2014, Removal of heavy metal ions with acid activated carbons derived from oil palm and coconut shells, Materials 7: 3634-3650.
- [14] ธีรพงษ์ วิทิตสานต์, 2554, ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 224 น.
- [15] Ioannidou, O. and Zabaniotou, A., 2007, Agricultural residues as precursors for

- activated carbon production: A review, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 11: 1966-2005.
- [16] Hernández-Montoya, V. and Bonilla-Petriciolet, A., 2012, Lignocellulosic Precursors Used in the Synthesis of Activated Carbon: Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment, 1st Ed., INTECH, Inc., Croatia, 101 p.
- [17] Yakout, S.M. and Sharaf, G., 2012, Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones, *Arab. J. Chem.*
- [18] Srinivasakannan, C. and Bakar, M.Z.A., 2004, Production of activated carbon from rubber wood Sawdust, *Biom. Bioen.* 27: 89-96.
- [19] Ould-Idriss, A., Stitou, M., Cuerda-Correa, E.M., Fernandez-Gonzalez, C., Macias-Garcia, A., Alexandre-Franco, M.F. and Gomez-Serrano, V., 2011, Preparation of activated carbons from olive-tree wood, revisited I: Chemical activation with H_3PO_4 , *Fuel Process. Techno.* 92: 261-265.
- [20] Yagmur, E., Tunc, M.S., Banford, A. and Aktas, Z., 2013, Preparation of activated carbon from autohydrolysed mixed southern hardwood, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 104: 470-478.
- [21] Hadoun, H., Sadaoui, Z., Souami, N., Sahel, D. and Toumert, I., 2013, Characterization of mesoporous carbon prepared from date stems by H_3PO_4 chemical activation, *Appl. Surf. Sci.* 280: 1-7.
- [22] Liu, S.L., Wang, Y.N. and Lu, K.T., 2014, Preparation and pore characterization of activated carbon from Ma bamboo (*Dendrocalamus latiflorus*) by H_3PO_4 chemical activation, *J. Porous Mater.* 21: 459-466.
- [23] Sahu, J.N., Acharya, J. and Meikap, B.C., 2010, Optimization of production conditions for activated carbons from *Tamarind wood* by zinc chloride using response surface methodology, *Bioresour. Technol.* 101: 1974-1982.
- [24] Boudrahem, F., Soualah, A. and Aissani-Benissad, F., 2011, Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solutions using activated carbon developed from coffee residue activated with phosphoric acid and zinc chloride, *J. Chem. Eng. Data* 56: 1946-1955.
- [25] Phothitontimongkol, T., Sanuwong, K., Siebers, N., Sukpirom, N. and Fuangfa Unob, F., 2013, Functionalized hectorite clay mineral for Ag(I) ions extraction from wastewater and preparation of silver nanoparticles supported clay, *Appl. Clay Sci.* 80-81: 346-350.
- [26] Jainaea, K., Sukpirom, N., Fuangwasdib, S. and Unob, F., 2015, Adsorption of Hg(II) from aqueous solutions by thiol-functionalized polymer-coated magnetic particles, *J. Ind. Eng. Chem.* 23: 273-278.
- [27] Ma, X. and Ouyang, F., 2013, Adsorption properties of biomass-based activated

- carbon prepared with spent coffee grounds and pomelo skin by phosphoric acid activation, *Appl. Surf. Sci.* 268: 566-570.
- [28] Li, Z.Q., Lu, C.J., Xia, Z.P., Zhou, Y. and Luo, Z., 2007, X-ray diffraction patterns of graphite and turbostratic carbon, *Carbon* 45: 1686-1695.
- [29] Liou, T.H., 2010, Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation, *Chem. Eng. J.* 158: 129-142.
- [30] Li, D., Tang, R., Tian, Y., Qiao, Y. and Li, J., 2014, Preparation of highly porous binderless active carbon monoliths from waste aspen sawdust, *BioResources* 9(1): 1246-1254.
- [31] Mopoung, S., Inkum, S. and Anuwetch, L., 2015, Effect of temperature on micropore of activated carbon from sticky rice straw by H_3PO_4 activation, *Carbon Sci. Tech.* 7(3): 24-29.
- [32] Shukla, A., Zhang, Y.H., Dubey, P., Margrave, J.L. and Shukla, S.S., 2002, The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water, *J. Hazard. Mater.* 95: 137-152.
- [33] Anirudhan, T.S. and Sreekumari, S.S., 2011, Adsorptive removal of heavy metal ions from industrial effluents using activated carbon derived from waste coconut but-
tons, *J. Environ. Sci.* 23: 1989-1998.
- [34] Sreejalekshmi, K.G., Krishnan, K.A. and Anirudhan, T.S., 2009, Adsorption of Pb(II) and Pb(II)-citric acid on sawdust activated carbon: Kinetic and equilibrium isotherm studies, *J. Hazard. Mater.* 161: 1506-1513.
- [35] Phothitontimongkol, T., 2007, Modification of clay mineral with 2-(3-(2-amino ethylthio) propylthio) ethanamine for removal of metals from water, M.Sc. Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 97 p.
- [36] Baskaralingam, P., Pulikesi, M., Ramamurthi, V. and Sivanesan, S., 2007, Modified hectorites and adsorption studies of a reactive dye, *Appl. Clay Sci.* 37: 207-214.
- [37] Ho, Y.S. and McKay, G., 2000, The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat, *Water Res.* 34: 735-742.
- [38] Doyurum, S. and Çelik, A., 2006, Pb(II) and Cd(II) removal from aqueous solutions by olive cake, *J. Hazard. Mater.* 138: 22-28.
- [39] Senthil Kumar, P., Vincent, C., Kirthika, K. and Sathish Kumar, K., 2010, Kinetics and equilibrium studies of Pb^{2+} ion removal from aqueous solutions by use of nano-silversol-coated activated carbon, *Braz. J. Chem. Eng.* 27: 339-346.
- [40] Dias Filho, N.L., Gushikem, Y., Polito, W.L., Moreira, J.C. and Ehirim, E.O., 1995, Sorption and preconcentration of metal ions in ethanol solution with a silica gel

- surface chemically modified with benzimidazole, *Talanta* 42: 1625-1630.
- [41] Kobya, M., Demirbas, E., Senturk, E. and Ince, M., 2005, Adsorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from apricot stone, *Bioresour. Technol.* 96: 1518-1521.
- [42] Nadeema, M., Mahmooda, A., Shahidb, S.A., Shahc, S.S., Khalidd, A.M. McKaye, G., 2006, Sorption of lead from aqueous solution by chemically modified carbon adsorbents, *J. Hazard. Mater.* 138: 604-613.
- [43] Shekinah, P., Kadirvelu, K., Kanmani, P., Senthilkumar, P. and Subburam, V., 2002, Adsorption of lead(II) from aqueous solution by activated carbon prepared from *Eichhornia*, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 77: 458-464.
- [44] Martín-Lara, M.Á., Rico, I.L.R., Vicente, I.D.L. C.A., García, G.B. and de Hoces, M.C., 2010, Modification of the sorptive characteristics of sugarcane bagasse for removing lead from aqueous solutions, *Desalination* 256: 58-63.
- [45] Imamoglu, M., Tekir, O., 2008, Removal of copper (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption on activated carbon from a new precursor hazelnut husks, *Desalination* 228: 108-113.
- [46] Zaini, M.A., Okayama, R. and Machida, M., 2009, Adsorption of aqueous metal ions on cattle-manure-compost based activated carbons, *J. Hazard. Mater.* 170: 1119-1124.
- [47] Gueu, S., Yao, B., Adouby, K. and Ado, G., 2007, Kinetics and thermodynamics study of lead adsorption on to activated carbons from coconut and seed hull of the palm tree, *Int. J. Environ. Sci. Tech.* 4(1): 11-17.