การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยใช้เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพ: การดูดซับและจลนพลศาสตร์

Removal of Heavy Metal Ions from Industrial Wastewater by Modified Sunflower Seed Husks: Adsorption and Kinetics

ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร[1,*] จันจิรา จับศิลป์[2] และ สุธิดา ทีปรักษพันธุ์[3]

[1,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อ.องครักษ์ จ.นครนายก
**Corresponding author; E-mail address: siriwans@g.swu.ac.th*

บทคัดย่อ

เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วย K_2CO_3 0.8 โมลาร์ เผาที่อุณหภูมิ 400°C (400-K_2CO_3MSSH) ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อทำการดูดซับ Ni (II) Zn (II) Pb (II) และ Cd (II) จากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียอุตสาหกรรมแบบกะที่สารละลาย pH 5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะหนักเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการกำจัด Ni(II) Zn(II) Pb(II) และCd(II) ออกจากสารละลายไอออนเดี่ยวมีค่าร้อยละ 96.50, 97.03, 96.98 และ 97.54 ตามลำดับ ส่วนการกำจัด Ni(II) Zn(II) Pb(II) และCd(II) แบบแข่งขันจากสารละลายไอออนผสมทั้งสี่มีค่าเป็น 87.16, 94.30, 98.02 และ 97.01 ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมรถยนต์ซึ่งรวบรวมจากหน่วยบำบัดกากสีพบว่าตัวดูดซับสามารถกำจัด Ni(II) และ Zn(II) ได้ร้อยละ 75.25 และ 87.50 ตามลำดับ ส่วนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมโรงกลึงสามารถกำจัด Zn(II) และ Pb(II) ได้ร้อยละ 78.18 และ 88.34 ตามลำดับ พบว่าไอออนทุกชนิดให้ผลแบบจำลองการดูดซับสอดคล้องกับแบบแลงเมียร์มากกว่าแบบฟรุนดลิช จลนศาสตร์ของการดูดซับของน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์ผสมของไอออนทั้ง 4 ชนิดสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม โดยการดูดซับไอออนเดี่ยวพบมีค่าคงที่อัตราสำหรับการดูดซับมีค่าเป็น 0.032, 0.134, 0.108,และ 0.156 กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับเป็น 7.39, 10.56, 10.76 และ 10.52 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับ Ni (II) Zn (II) Pb (II) และCd (II) ตามลำดับ

คำสำคัญ: การกำจัดโลหะหนัก, เปลือกเมล็ดทานตะวัน, วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, น้ำเสียอุตสาหกรรมยานยนต์, จลนพลศาสตร์การดูดซับ

Abstract

Modified sunflower seed husk was used as adsorbent to remove Ni (II), Zn (II), Pb (II), and Cd (II) from synthetic and automotive industrial wastewater. Sunflower husk was treated by 0.8 M K_2CO_3, 400°C (400-K_2CO_3MSSH). The adsorption experiments were conducted with an initial metal ion concentration of 100 mg/L and pH of 5. In a batch experiment of single metal ion synthetic wastewater, it was found that the adsorption percentages of Ni (II), Zn (II), Pb (II), and Cd (II) were 96.50, 97.03, 96.98 and 97.54, respectively. For mixed-ions synthetic wastewater, competitive removal percentage of Ni (II), Zn (II), Pb (II), and Cd (II) were 87.16, 94.30, 98.02 and 97.01, respectively. Wastewater from the automotive industry containing Ni (II), and Zn (II) had an efficiency removal of 75.25% and 87.50%, whereas the lathe work had 78.18% and 88.34% of Zn (II) and Pb (II) removal respectively. The experimental results were found to fit the Langmuir isotherm model. The kinetics of adsorption showed the pseudo-second order model in both single and mixed synthetic wastewater. For single ion adsorption, it was found that the pseudo second order rate constant were 0.032, 0.134, 0.108, and 0.156 g/mg-min and the adsorption capacity at equilibrium were 7.39, 10.56, 10.76 and 10.52 mg/g for Ni (II) Zn (II) Pb (II) and Cd (II), respectively.

Keywords: Metal Ion Removal, Modified Sunflower Seed Husk, Agricultural Waste, Industrial Wastewater, Adsorption Kinetics

1. คำนำ

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีประโยชน์ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และยังเป็นเป็นส่วนประกอบสำคัญของอุตสาหกรรม โดยการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมนี้เองทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่มีความรุนแรงและยากต่อการแก้ไข โดยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ ซึ่งประเทศไทยได้มี

ประกาศกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมต่างๆ [1] การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสภาพของน้ำเสียและวัตถุประสงค์ในการบำบัด เช่น การบำบัดทางเคมี การบำบัดทางเคมีกายภาพ การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การดูดซับ (adsorption) [2] ซึ่งวิธีการกำจัดโดยใช้สารดูดซับเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง จึงมีนักวิจัยนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม แกลบ และเปลือกเมล็ดทานตะวันมาปรับสภาพให้มีคุณสมบัติคล้ายกับถ่านกัมมันต์มาใช้เป็นสารดูดซับไอออนโลหะออกจากสารละลาย โดย Feizi และ Jalali [3] และ Shah และคณะ [4] ได้ใช้ตัวดูดซับที่ได้จากวัสดุชีวภาพหลายชนิดมาใช้กำจัดไอออนโลหะออกจากสารละลาย Zou และคณะ ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกเมล็ดทานตะวันที่ปรับสภาพ [5] Foo และ Hameed ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพเปลือกเมล็ดทานตะวันโดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับ K_2CO_3 กระตุ้นให้เปลือกเมล็ดทานตะวันทำให้มีความสามารถในการกำจัดไอออนจากสารละลายได้ดีขึ้น [6] นอกจากนี้ Srisorrachatr ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วย K_2CO_3 และ $ZnCl_2$ พบว่าเปลือกเมล็ดทานตะวันที่ปรับสภาพด้วย K_2CO_3 สามารถกำจัดไอออนโลหะต่าง ๆ ในสารละลายได้มากขึ้น [7]

เปลือกเมล็ดทานตะวันในประเทศไทยเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับอาหารขบเคี้ยวและมีจำนวนมากในแถวจังหวัดสระบุรี ลพบุรี และเปลือกเมล็ดทานตะวันเป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและโครงสร้างเซลลูโลสมีหมู่ OH^- บนผิวหน้าจึงทำให้เปลือกเมล็ดทานตะวันมีโอกาสเป็นประจุลบ ซึ่งสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาปรับสภาพใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดไอออนโลหะที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งได้ และจะเป็นการลดการนำเข้าตัวดูดซับจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.8 โมลาร์ และเผาที่อุณหภูมิ 400 เซลเซียส มาเป็นวัสดุดูดซับกำจัดไอออนโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ผสมและน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

2. สารเคมีและวิธีการทดลอง

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารละลายมาตรฐาน Zn(II), Cd(II), Ni(II) และ Pb(II) ชนิด spectrosol grade (Asia Pacific Specialty Chemical Limited) K_2CO_3, $Zn(NO_3)_2$, $Cd(NO_3)_2$, $Ni(NO_3)_2$ และ $Pb(NO_3)_2$ (Asia Pacific Specialty Chemical Limited) HNO_3 (Asia division of Nuplex Industries Pty Ld.) เป็นชนิด AR grade เปลือกเมล็ดทานตะวันจากห้างหุ้นส่วนจำกัดฟลาวเวอร์ฟูดจำกัด น้ำเสียเก็บจากหน่วยบำบัดกากสีจากบริษัทที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมรถยนต์ในจังหวัดสมุทรสาคร และน้ำเสียจากโรงกลึงในอำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก

2.2 อุปกรณ์

เครื่องคัดแยกขนาด (Rheinische str 36) เตาอบไฟฟ้า (Lenton Thermal Designs) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (รุ่น827 pH Lab, Metrohm) เตาเผา (Fisher Scientific Isotemp, Model 650-126) เครื่องเขย่า (Gallenkamp orbital shaker รุ่น SGM.300.010U) เครื่องชั่งน้ำหนัก (OHAUS รุ่น TS400D) เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงของอะตอม(AAS) (GBD 908AA, GBD Scientific Equipment Pty Ltd.)

2.3 การเตรียมตัวดูดซับ

นำเปลือกเมล็ดทานตะวันที่สะอาดแล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมาแช่ใน 0.8 M K_2CO_3 ด้วยอัตราส่วนเปลือกเมล็ดทานตะวันต่อสารเคมีที่ 1 : 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำ ผึ่งลมให้แห้งหมาด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คัดแยกขนาดด้วยเครื่องคัดแยกขนาดให้มีขนาด 500-710 ไมโครเมตร ได้ตัวดูดซับ400-K_2CO_3MSSH

2.4 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะเดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะผสม

ในการศึกษาความสามารถกำจัดไอออนโลหะนิกเกิล(II) สังกะสี(II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม(II) โดย400-K_2CO_3MSSH นั้น ได้ออกแบบการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะเดี่ยว และการกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำเสียอุตสาหกรรม เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะเดี่ยวความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายไอออนโลหะให้มีค่าเท่ากับ pH 5 [8] ส่วนในการศึกษาการกำจัดไอออนโลหะผสมนั้น จะเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะผสมมีไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ที่ความเข้มข้นแต่ละชนิดเป็น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร รวมความเข้มข้นไอออนโลหะทั้ง 4 ชนิดเป็น100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายไอออนโลหะให้มีค่าเท่ากับ pH 5 โดยใช้สารละลายกรดไนตริก นำสารละลายน้ำเสียที่ศึกษาไปวัดค่าความเข้มข้นไอออนโลหะเริ่มต้นที่แท้จริงโดยเครื่อง AAS ก่อนทำการดูดซับ

2.5 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรม

นำน้ำเสียอุตสาหกรรมที่เก็บจากแหล่งประกอบการจริงมาทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าเท่ากับ 5 โดยใช้สารละลายกรดไนตริกควบคุมให้ได้ค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากันในทุกการทดลอง แล้วนำไปวัดค่าความเข้มข้นไอออนโลหะที่แท้จริงก่อนการทดลองด้วยเครื่อง AAS

2.6 การกำจัดไอออนโลหะโดยวิธีการดูดซับ

นำ 400-K_2CO_3MSSH ปริมาณ 1.0 กรัม มาผสมกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนนิกเกิล(II) สังกะสี(II) ตะกั่ว(II) และ แคดเมียม(II) มาผสมกันโดยมีความเข้มโลหะแต่ละชนิด 25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาตรรวม 100

มิลลิลิตร ที่ pH 5 แล้วเข้าเครื่องเขย่า Gallenkamp orbital shaker ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที เก็บตัวอย่างตามช่วงเวลาที่กำหนดจนถึง 60 นาที นำมากรองแล้วนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ไปวัดปริมาณไอออนโลหะต่างๆ ที่เหลือด้วยเครื่อง AAS โดยใช้แสงที่ความยาวคลื่น 341.50 นาโนเมตร 228.80 นาโนเมตร 213.90 นาโนเมตร และ 283.30 นาโนเมตร สำหรับนิกเกิล (II) แคดเมียม (II) สังกะสี (II) และตะกั่ว (II) ตามลำดับ ในส่วนของน้ำเสียอุตสาหกรรมที่เก็บจากแหล่งประกอบการจริงใช้น้ำเสียตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร และใช้ตัวดูดซับ 1.0 กรัม และทำการทดลองในวิธีเดียวกัน

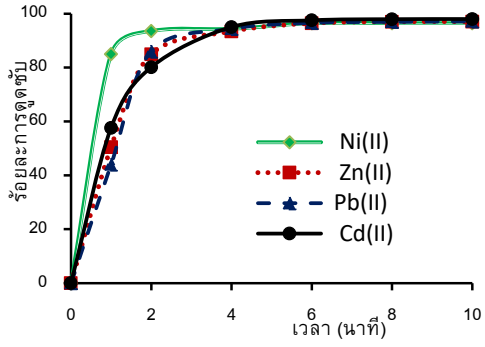
2.7 ศึกษาแบบจำลองการดูดซับไอออนโลหะเดี่ยวตามแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

โดยเตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ของนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ชนิดละ 100 มิลลิลิตร โดยให้มีความเข้มข้นของไอออนโลหะแต่ละชนิดเท่ากับ 200 300 400 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่า pH ของสารละลายน้ำเสียเท่ากับ 5 ใส่ตัวดูดซับ 400-K_2CO_3MSSH จำนวน 1.0 กรัม เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จนถึงเวลาสมดุล ทำการวัดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะที่เหลือในสารละลายโดยเครื่อง AAS แล้วนำผลมาวิเคราะห์ตามสมการแบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์และฟรุนดลิช

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ร้อยละการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

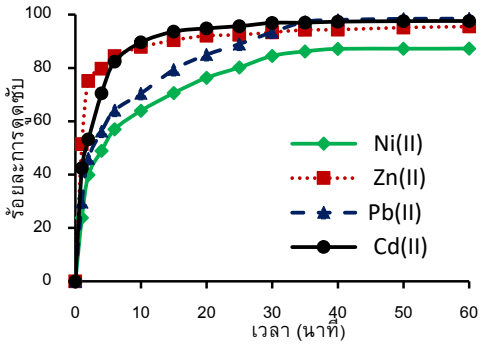
ในการศึกษาความสามารถกำจัดไอออนโลหะนิกเกิล(II) สังกะสี(II) ตะกั่ว(II) และแคดเมียม(II) โดย 400-K_2CO_3MSSH ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวที่มีไอออนโลหะแต่ละชนิดเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การดูดซับไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ จากน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะเดี่ยวที่เวลาต่าง ๆ

ซึ่งจะเห็นว่าการกำจัดไอออนโดยการดูดซับเกิดขึ้นเร็วมาก โดยไอออนโลหะหนักทั้งสี่ชนิดจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วที่ 2-3 นาทีแรก แล้วเริ่มดูดซับน้อยลงจนเริ่มคงที่ในช่วงหลัง เนื่องจากในตอนแรก active site ของวัสดุดูดซับยังว่าง และสารละลายมีความเข้มข้นสูงจึงแพร่เข้ามาเกาะวัสดุดูดซับอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปพื้นที่ว่างของ active site มีน้อยลง และความเข้มข้นน้อยลง ไอออนจึงแพร่เข้ามาเกาะด้วยอัตราที่ช้าลงและถึงเวลาสมดุลภายในเวลา 6-8 นาที โดยนิกเกิล (II) จะเกิดการดูดซับเสร็จภายใน 3-4 นาที แรก รองมาเป็นไอออนตะกั่ว(II) สังกะสี (II) และแคดเมียม (II) ตามลำดับ การกำจัดนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากสารละลายไอออนเดี่ยวมีค่าร้อยละ 96.50, 97.03, 96.98 และ 97.549 ตามลำดับ คิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 9.60 9.65 9.70 และ 9.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยคิดจากความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ส่วนการกำจัดไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมโดย 400-K_2CO_3MSSH นั้น ได้ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การดูดซับไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ จากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมที่เวลาต่าง ๆ

จะเห็นว่าไอออนสังกะสี (II) ถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วที่สุดโดยในช่วงเวลา 10 นาทีแรก รองลงมาคือแคดเมียม (II) ตะกั่ว (II) และนิกเกิล (II) ตามลำดับโดยใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 40-50 นาที และพบว่าร้อยละการดูดซับไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) คือ 87.16 94.30 98.02 และ 97.01 ตามลำดับ และมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 2.18 2.20 2.38 และ 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

จากรูปที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดไอออนโลหะชนิดเดียวกันในน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนเดี่ยวกับน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนผสม พบว่าการกำจัดไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลน้อยกว่ากรณีที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะผสมเกือบ 10 เท่า และค่าความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะออกจากสารละลายไอออนผสมมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่เป็นสารละลายไอออนโลหะเดี่ยว ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการดูดซับไอออนโลหะนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากสารละลายไอออนโลหะผสมแบบแข่งขันโดยชุติวัฒน์ ลิขิตาภรณ์ และ วรัท กาญจนพิษณ์ [9] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว (II) สังกะสี (II) นิกเกิล (II) และแคดเมียม (II) ออกจากสารละลายไอออนโลหะเดี่ยวและกำจัดไอออนออกจากสารละลายไอออนโลหะผสมของตะกั่ว (II) สังกะสี (II) นิกเกิล (II) และแคดเมียม (II) ที่ค่า pH 5 โดยใช้เปลือกเมล็ดทานตะวันที่ปรับสภาพโดยกระตุ้นด้วยความร้อนอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นวัสดุดูดซับ พบว่าการกำจัดไอออนโลหะจากสารละลาย

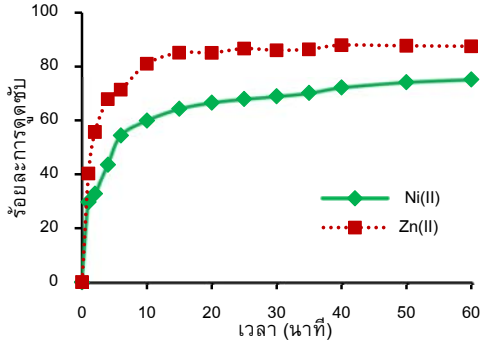
ไอออนเดี่ยวใช้เวลาถึงสภาวะสมดุล(10-20 นาที) น้อยกว่าการกำจัดไอออนโลหะจากสารละลายไอออนผสม (250-300 นาที) นอกจากนี้ยังพบว่าตัวดูดซับสามารถกำจัดไอออนโลหะออกจากสารละลายผสมได้น้อยกว่าในสารละลายไอออนเดี่ยวเช่นกัน นอกจากนั้นผลที่ได้ก็สอดคล้องกับงานวิจัยของ Feizi และ Jalali [3] ที่ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะแคดเมียม (II) นิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) แมงกานีส (II) และเหล็ก (II) โดยใช้ใบและลำต้นของทานตะวันเป็นตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับสามารถกำจัดไอออนโลหะดังกล่าวจากสารละลายไอออนโลหะผสมได้น้อยกว่าสารละลายไอออนเดี่ยวเช่นกัน [3] ค่าเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับ (Q, (มก./ก)) ของไอออนโลหะเดี่ยวและไอออนผสมที่พีเอช 5 โดยใช้ 400-K_2CO_3MSSH กำจัดไอออนโลหะออกจากสารละลายได้คำนวณและสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ (Q) และร้อยละการดูดซับไอออนโลหะเดี่ยวและไอออนผสมในสารละลายที่พีเอช 5

ไอออน	สารละลายไอออนเดี่ยว		สารละลายไอออนผสม	
	เวลาสมดุล (นาที)	Q, (มก./ก) (ร้อยละ)	เวลาสมดุล (นาที)	Q, (มก./ก) (ร้อยละ)
Ni (II)	3-4	9.60 (96.50)	40	2.18 (87.16)
Zn (II)	5-6	9.65 (97.03)	35	2.20 (94.30)
Pb (II)	6-7	9.70 (96.98)	40	2.38 (98.02)
Cd (II)	7-8	9.76 (97.55)	30	2.38 (97.01)

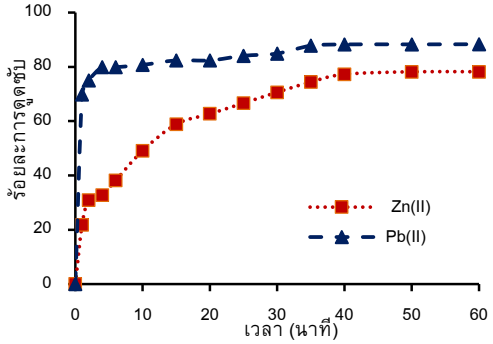
3.2 ความสามารถการกำจัดไอออนโลหะจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

ใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมจริงจาก 2 แหล่ง คือ น้ำเสียจากหน่วยบำบัดกากสีจากบริษัทที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมรถยนต์ในจังหวัดสมุทรสาคร และน้ำเสียจากโรงกลึงในอำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก ผลการศึกษาการกำจัดไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) จากน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ได้จากอุตสาหกรรมรถยนต์และโรงกลึง โดยใช้ 400-K_2CO_3MSSH ที่สารละลาย pH 5 ได้ผลดังในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 การดูดซับไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ จากน้ำเสียอุตสาหกรรมรถยนต์กับเวลา

จากรูปที่ 3 พบว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมรถยนต์สามารถตรวจพบเฉพาะไอออนโลหะนิกเกิล (II) และสังกะสี (II) เท่านั้น ไม่พบแคดเมียม (II) และตะกั่ว (II) ในน้ำเสีย ซึ่งเห็นได้ว่าในช่วงแรกสามารถดูดซับสังกะสี (II) ได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 20 นาที และนิกเกิล (II) ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับประมาณ 50 นาทีโดยมีร้อยละการดูดซับนิกเกิล (II) และสังกะสี (II) คือ 72.25 และ 87.05 และคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.34 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าลักษณะการดูดซับไอออนโลหะในน้ำเสียจริงมีลักษณะเหมือนกับการดูดซับไอออนโลหะจากน้ำเสียไอออนโลหะผสมในรูปที่ 2 สำหรับน้ำเสียจากกิจกรรมโรงกลึงสามารถตรวจพบไอออนที่ศึกษาคือ สังกะสี (II) และตะกั่ว (II) จะเห็นได้ว่าในช่วง 10 นาทีแรกจะสามารถดูดซับตะกั่ว (II) ได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาเข้าสู่สมดุลประมาณ 40 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดสังกะสี(II) และตะกั่ว(II) คือ 78.18 และ 88.34 และคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.13 และ 0.19 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงผลในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การดูดซับไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ จากน้ำเสียกิจกรรมโรงกลึงกับเวลา

ผลจากรูปที่ 2 และรูปที่ 4 ได้สรุปผลการวิเคราะห์การกำจัดไอออนโลหะออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรมยานยนต์และโรงกลึงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับ ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม

แหล่งน้ำเสีย / ชนิดโลหะหนัก	เวลาเข้าสมดุล (นาที)	ร้อยละการดูดซับ	ความสามารถการดูดซับ (Q), (มก./ก)
รถยนต์ Ni (II)	50	72.25	0.34
Zn (II)	20	87.05	0.40
โรงกลึง Zn (II)	50	78.18	0.13
Pb (II)	35	88.34	0.19

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าร้อยละการดูดซับและค่าความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมมีค่ามากกว่าน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำเสียอุตสาหกรรมมีไอออนโลหะหลายชนิดและมี

สิ่งเจือปนชนิดอื่นปะปนมาด้วย จึงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับต่ำทำให้ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ผสม โดยจะเห็นว่าผลการกำจัดตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ในรูปที่ 2 และที่ 4 มีผลไม่สอดคล้องกันซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นเราไม่สามารถกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะชนิดต่าง ๆได้และยังมีไอออนโลหะชนิดอื่นปนเปื้อนอยู่ด้วย นอกจากนี้อาจเป็นกรณีที่น้ำเสียจากโรงกลึงมีปริมาณตะกั่ว (II) มากกว่าสังกะสี (II) มาก ๆ จึงทำให้ตะกั่ว (II) ที่ความเข้มข้นสูง ๆ สามารถแย่งชิงการดูดซับได้มากกว่า ดังเช่นการศึกษาของ Kadirvelu และคณะ [10]

3.3 การดูดซับตามแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ศึกษาแบบจำลองการดูดซับไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวบนตัวดูดซับ400-K_2CO_3MSSH โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามสมการแลงเมียร์ซึ่งจัดให้ อยู่ในรูปสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (1)$$

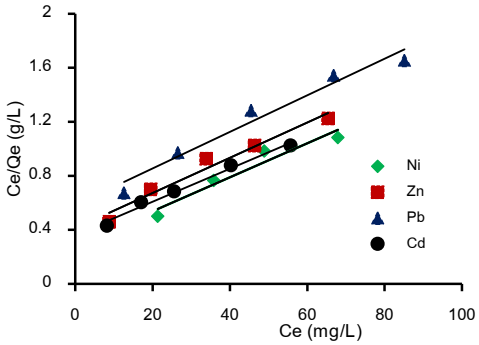
โดย C_e คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล(มิลลิกรัมต่อลิตร) Q_eคือค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) Q_m คือ ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

สำหรับแบบจำลองการดูดซับฟรุนดลิชสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง คือ

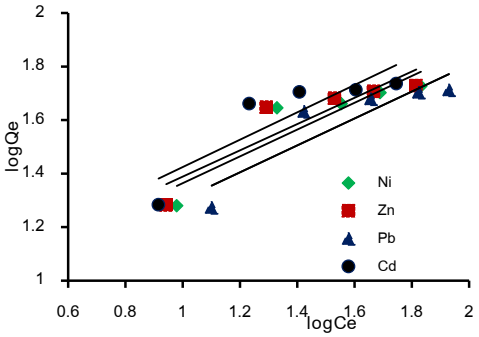
$$\log(Q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} log(C_e) \quad (2)$$

โดย K_F คือค่าคงที่การดูดซับฟรุนดลิช((มิลลิกรัมต่อกรัม).(ลิตรต่อมิลลิกรัม)$^{1/n}$) n คือ ค่าแฟกเตอร์ความแตกต่างของพื้นผิวตัวดูดซับ

จากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับไอออนโลหะตามแบบจำลองแลงเมียร์ และแบบจำลองฟรุนดลิชพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับสมการที่ (1) มากกว่าสมการที่ (2) ดังรูปที่ 4 เนื่องกราฟที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ระหว่างค่า $\frac{C_e}{Q_e}$ กับ C_e มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าการพล็อตค่า $\log(Q_e)$ กับ $log(C_e)$ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การดูดซับไอออนโลหะออกจากสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยว ที่ pH 5 ตามแบบจำลองแลงเมียร์



รูปที่ 6 การดูดซับไอออนโลหะออกจากสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยว ที่ pH 5 ตามแบบจำลองฟรุนดลิช

จากรูปที่ 5 และรูปที่ 6 สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากสารละลายเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) ของไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) เป็น 79.37, 76.34, 74.07 และ 81.97 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่สมดุลการดูดซับตามแบบจำลองแลงเมียร์ (K_L) เป็น 0.044, 0.032, 0.023 และ 0.033 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี(II) ตะกั่ว(II) และแคดเมียม(II) โดยตัวดูดซับ 400-K_2CO_3MSSH เป็นแบบชั้นเดียวที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนโลหะที่มีประจุ +2 กับผิวของเปลือกเมล็ดทานตะวันที่ถูกกระตุ้นด้วย K_2CO_3 และความร้อนที่ 400 เซลเซียส ซึ่งทำให้ผิวมีความเป็นประจุลบมากขึ้นกว่าเปลือกเมล็ดทานตะวันที่ไม่ได้กระตุ้น จึงทำให้มีความสามารถดูดซับเพิ่มขึ้น และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวตามแบบจำลองแลงเมียร์โดยเป็นแรงดึงดูดโดยประจุที่แตกต่างกัน [9] ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการกำจัดไอออนโลหะแคดเมียม(II) นิกเกิล(II) สังกะสี(II) ตะกั่ว(II) แมงกานีส(II) และเหล็ก(II) ซึ่งใช้ใบและลำต้นของทานตะวันเป็นตัวดูดซับโดย Feizi และ Jalali ซึ่งพบว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวตามแบบจำลองแลงเมียร์ [3] และสอดคล้องการกำจัดนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม(II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านขาวและสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ได้ดี [11] ค่าความสามารถดูดซับสูงสุดของไอออนในการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 74-82 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการดูดซับไอออนโครเมียม (VI) โดยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกเมล็ดทานตะวันที่กระตุ้นโดย $ZnCl_2$ และความร้อนที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส โดย Zou และคณะ [5] ซึ่งพบว่าค่าความสามารถในการดูดซับโครเมียม (VI) สูงสุดอยู่ในช่วง 150-160 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ และมีแบบจำลองการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์เช่นกัน

3.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

เนื่องจากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับมีความสำคัญในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะให้ข้อมูลอัตราเร็วการดูดซับตัวละลายที่รอยต่อผิวหน้าระหว่างตัวดูดซับกับตัวละลายและกลไกลการดูดซับ ในการศึกษานี้ได้ศึกษาอัตราเร็วการดูดซับนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II)

และแคดเมียม (II) ในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวและแบบผสม โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับที่เวลาต่างๆ จนถึงสมดุลตามสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียม โดยเขียนสมการอันดับหนึ่งเทียมให้เป็นสมการเส้นตรงดังนี้

$$log(Q_e - Q_t) = log(Q_e) - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3)$$

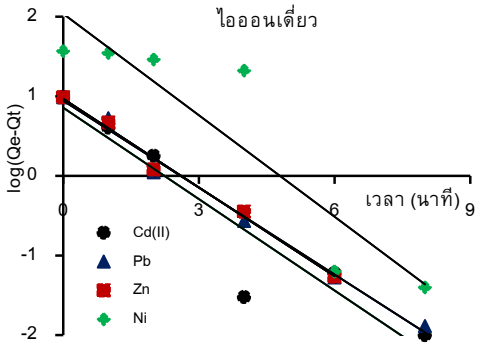
โดยที่ Q_e คือความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) Q_t คือความสามารถในการดูดซับโลหะหนักที่เวลาต่างๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) k_1 คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที) และ t คือเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(Q_e - Q_t)$กับ t จะได้สมการเส้นตรงที่จุดตัดแกนเป็น $\log(Q_e)$ และความชันเป็น $\frac{k_1}{2.303}$

สำหรับแบบจำลองอันดับสองเทียมสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (4)$$

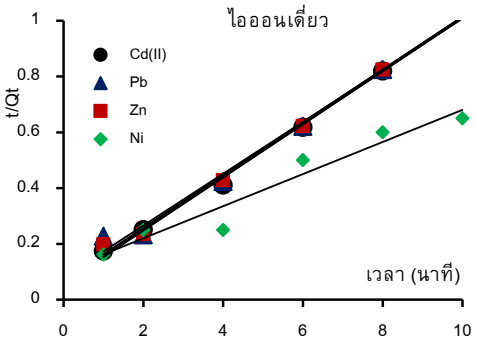
เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) ทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{Q_t}$ กับ t จะได้สมการเส้นตรงที่จุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{k_2 Q_e^2}$ และความชันเป็น $\frac{1}{Q_e}$

จากการนำค่าความเข้มข้นของไอออนที่ศึกษาที่เวลาต่างๆ มาวิเคราะห์ตามจลนพลศาสตร์การดูดซับสมการอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียมของไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวได้ผลแสดงได้ดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ นำค่าความชันและค่าตัดแกนตั้งของพล็อตแต่ละไอออนโลหะมาคำนวณตามสมการ (3) และ (4) และสรุปค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ไว้ในตารางที่ 4



รูปที่ 7 อัตราเร็วการดูดซับของไอออนชนิดต่าง ๆจากน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม

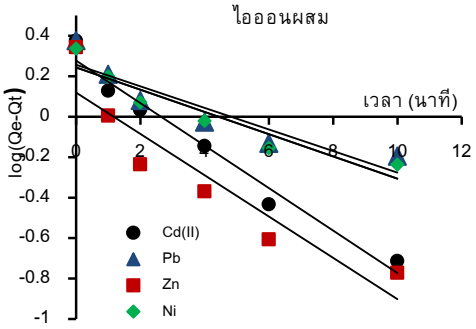
สำหรับผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมโดยใช้สมการอันดับหนึ่งเทียม และอันดับสองเทียมของไอออนได้ผลดังรูปที่ 9 และ 10 และสรุปค่าต่างๆ ที่คำนวณได้ไว้ในตารางที่ 5



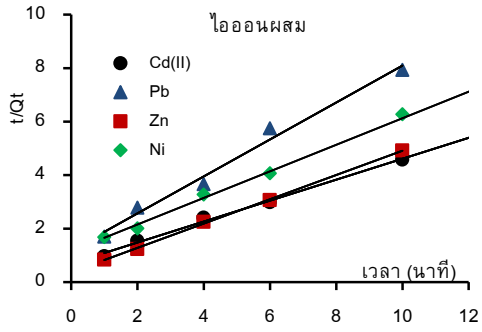
รูปที่ 8 อัตราเร็วการดูดซับของไอออนชนิดต่าง ๆจากน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวตามแบบจำลองอันดับสองเทียม

ตารางที่ 4 ค่าความสามารถการดูดซับและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับของไอออนโลหะต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวของจลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับ	น้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะเดี่ยว			
	Ni (II)	Zn (II)	Pb (II)	Cd (II)
อันดับหนึ่งเทียม				
ความชัน	-0.43	-0.37	-0.38	-0.36
จุดตัดแกนตั้ง	2.034	0.97	0.95	0.86
R^2	0.83	0.99	0.99	0.89
k_1	0.98	0.86	0.88	0.84
Q_e	108.76	9.33	8.83	7.18
อันดับสองเทียม				
ความชัน	0.058	0.095	0.093	0.095
จุดตัดแกนตั้ง	0.105	0.067	0.080	0.058
R^2	0.94	1.00	0.99	1.00
k_2	0.032	0.134	0.108	0.156
Q_e	17.39	10.56	10.76	10.52



รูปที่ 9 อัตราเร็วการดูดซับของไอออนชนิดต่างๆจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม



รูปที่ 10 อัตราเร็วการดูดซับของไอออนชนิดต่างๆจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมตามแบบจำลองอันดับสองเทียม

จากรูปที่ 7-10 จะพบว่าเมื่อพล็อตกราฟตามสมการเส้นตรงของแบบสมการอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมแล้ว ผลการทดลองสามารถอธิบายด้วยสมการอันดับสองเทียมได้ดีมากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียมทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์โลหะเดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์โลหะผสม โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่าของทุกไอออนโลหะที่ศึกษา ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าความสามารถการดูดซับและค่าคงที่อัตราเร็วการดูดซับของไอออนโลหะต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์ผสม

จลนพลศาสตร์การดูดซับ	น้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะผสม			
	Ni (II)	Zn (II)	Pb (II)	Cd (II)
อันดับหนึ่งเทียม				
ความชัน	-0.06	-0.10	-0.05	-0.05
จุดตัดแกนตั้ง	0.243	0.119	0.257	0.277
R^2	0.90	0.87	0.85	0.97
k_1	0.127	0.235	0.123	0.241
Q_e	1.75	1.32	1.81	1.89
อันดับสองเทียม				
ความชัน	0.496	0.454	0.690	0.391
จุดตัดแกนตั้ง	1.160	0.3712	0.257	0.698
R^2	1.00	1.00	0.99	1.00
k_2	0.212	0.555	1.855	0.219
Q_e	2.018	2.20	1.45	2.55

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการดูดซับไอออนโลหะโครเมียม (VI) ออกจากสารละลายโดยใช้เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วย $ZnCl_2$ ซึ่งเป็นสมการอันดับสองเทียมเช่นเดียวกัน โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับ (Q) เท่ากับ80-85 มิลลิกรัมต่อกรัมโดยมีค่าที่คำนวณได้จากสมการอันดับสองเทียมเป็น 80-86 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์ [5] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการกำจัดโครเมียม (VI) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ชีวมวลจากฐานดอกทานตะวัน [12] พบว่าสามารถกำจัดได้และมีจลนศาสตร์การดูดซับตามสมการอันดับสองเทียมและมีแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์เช่นกัน

4. สรุปผล

เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วย K_2CO_3 และให้ความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส (400-K2CO3MSSH) สามารถกำจัดไอออนนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวมีค่าร้อยละ 96.50, 97.03, 96.98 และ 97.549 ตามลำดับ โดยคิดเป็นค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 9.60 9.65 9.70 และ 9.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสามารถกำจัดไอออนออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ผสมได้ดีแต่มีค่าน้อยกว่าการกำจัดในน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยว โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) และแคดเมียม (II) คือ 87.16 94.30 98.02 และ 97.01 ตามลำดับ และมีค่าความจุการดูดซับอยู่ในช่วง 2.18 - 2.38 มิลลิกรัมต่อกรัม นอกจากนั้น 400-K_2CO_3MSSH ยังสามารถกำจัดไอออนโลหะดังกล่าวออกจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้จริง โดยสามารถกำจัดไอออนสังกะสี (II) และนิกเกิล (II) จากน้ำเสียอุตสาหกรรมรถยนต์ได้ร้อยละ 87.05 และ 72.25 และมีค่าความจุการดูดซับเท่ากับ 0.342 และ 0.402 มิลลิกรัมต่อกรัม และกำจัดไอออนสังกะสี (II) และตะกั่ว (II) ออกจากน้ำเสียโรงกลึงโลหะได้ร้อยละ 78.18 และ 88.34 คิดเป็นค่าความจุการดูดซับเท่ากับ 0.127 และ 0.194 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยสามารถกำจัดตะกั่ว (II) ได้ดีกว่าสังกะสี (II) และดีกว่านิกเกิล (II) ตามลำดับ

การดูดซับนิกเกิล (II) สังกะสี (II) ตะกั่ว (II) แคดเมียม (II) โดย 400-K_2CO_3MSSH พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนทั้ง 4 ชนิดโดย 400-K_2CO_3MSSH เป็นสมการอันดับสองเทียม ทั้งที่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์เดี่ยวและน้ำเสียสังเคราะห์ผสม โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง

การศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าเปลือกเมล็ดทานตะวันที่ปรับสภาพด้วย K_2CO_3 และความร้อนที่ 400 องศาเซลเซียส สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการปนเปื้อนไอออนโลหะจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรมได้จริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษา ห้างหุ้นส่วนจำกัด ฟลาวเวอร์ฟูด ที่อนุเคราะห์เปลือกเมล็ดทานตะวัน และขอขอบคุณนางสาวมุกดาวัลย์ เอี่ยมอนันชัย และนางสาวนา พุฒิภัทร ในการเก็บข้อมูลงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม สืบค้นจาก https://certify.dld.go.th/certify/images /laws/ Environment/08.pdf เมื่อ 15 มกราคม 2566.

[2] Reynolds, T.D. and Richards, P.A. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. PWS Publishing Company, pp.350-390.

[3] Feizi, M. and Jalali, M. (2015). Removal of heavy metals from aqueous solutions using sunflower, potato, canola and walnut shell residues. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.,* vol. 54, pp. 125-136.

[4] Shah, J., Rasul Jan, M., Atta ul Haq, and Zeeshan, M. (2015). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for sorption of Ni (II) from aqueous solution using formal-dehyde treated waste tea leaves. *J. Saudi Chemical Society,* vol. 19, pp. 301-310.

[5] Zou, Y. Z., Jiang, T.C. and Zhang, J. (2015). Efficient adsorption of Cr (VI) on sunflower seed hull derived porous carbon. *J. Environ. Chem. Eng.,* vol. 3, pp. 898-905.

[6] Foo, K.Y. and Hameed, B.H. (2011). Preparation and characterization of activated carbon from sunflower seed oil residue via microwave assisted K_2CO_3 activation. *Bioresource Technology*, vol. 102, pp. 9794-9799.

[7] Srisorrachatr, S. (2017). Modified sunflower seed husks for metal ions removal from wastewater. *CET,* vol. 57, pp. 247-252. DOI: 10.3303/CET1757042.

[8] พรพิมล บุญถึง และ ภาวินี จิตรถนอม. *การกำจัดไอออนโลหะหนักโดยเปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพด้วยสารเคมี*. โครงงานวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, (2555)

[9] ชุติวัฒน์ ลิขิตาภรณ์ และ วรัท กาญจนพิษณ์. *การดูดซับไอออนโลหะหนักผสมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบแข่งขันโดยใช้เปลือกเมล็ดทานตะวันปรับสภาพ*. โครงงานวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, (2555)

[10] Kadirvelu K., Thamaraiselvi K. and Namasivayam C. (2001), Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste, *Bioresource Technology*, 76(1), 63-65.

[11] ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์ (2558). การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้ถ่านขาว. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ* ปีที่10 (1): หน้า 22-31.

[12] Jain, M., Garg, V. K. and Kadirvelu, K. (2009). Equilibrium and kinetic studies for sequestration of Cr (VI) from simulated wastewater using sunflower waste biomass. *J. Hazard. Mater.*, vol. 171 pp. 328–334.