

## การกำจัดสารตะกั่วปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านลิกไนต์เคลือบเฟอร์รอสคลอไรด์

### Removing Lead Contamination from Synthetic Wastewater by Using Ferrous Chloride Coated with Lignite Bottom Ash

พรพิมล ผักไหม (Pornpimon Pukmai)<sup>1\*</sup> ดร.กาญจนา ครองธรรมชาติ (Dr.Kannitha Krongthamchat)\*\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยเฟอร์รอสคลอไรด์เป็นตัวดูดซับ ในน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของตะกั่ว 0.896 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 3.7 ศึกษาขนาด พื้นที่ผิว ความสามารถการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน ระยะเวลาและพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัด รูปแบบไอโซเทอร์ม และประสิทธิภาพการดูดซับในถังปฏิกรณ์แบบ Fluidized Bed พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่ดีที่สุดที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ทั้งถ่านลิกไนต์เคลือบและไม่เคลือบผิวเฟอร์รอสคลอไรด์ มีประสิทธิภาพ ร้อยละ 97.11 และ 86.37 ตามลำดับ ระยะเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว ดีที่สุด คือ 30 นาที ถ่านลิกไนต์เคลือบและไม่เคลือบเฟอร์รอสคลอไรด์ ดูดซับได้ร้อยละ 98.37 และ 96.41 ตามลำดับ รูปแบบการดูดซับของถ่านลิกไนต์เคลือบและไม่เคลือบเฟอร์รอสคลอไรด์ สอดคล้องกับสมการ Freundlich จากการศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบ Fluidized Bed โดยใช้ถ่านลิกไนต์เคลือบเฟอร์รอสคลอไรด์เป็นตัวดูดซับ ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้ง 3 อัตราการไหล ไม่แตกต่างกัน ( $p$ -value = 0.083) ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับเริ่มเสื่อมสภาพ 18, 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยนี้จะได้ข้อมูลพื้นฐานในการใช้ถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบเฟอร์รอสคลอไรด์เพื่อเป็นทางเลือกในการพัฒนาตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนตะกั่วต่อไป

#### ABSTRACT

The aimed of this research was to study the efficiency of lead removal from synthetic wastewater by using adsorption process of coated and non-coated ferrous chloride with lignite bottom ash as adsorbents. The synthetic wastewater containing lead concentration of 0.896 mg/l at pH 3.7 The characteristics of adsorbent were studied including size, surface area, cation exchange and iodine adsorption capacity. The batch experiment was focus on the proper time, pH and lead adsorption isotherm. The lead removal efficiency of wastewater was studied in the fluidized bed reactor by using coated ferrous chloride bottom ash as an adsorbent. The result from the batch experiment showed that the best lead removal efficiency from coated and non coated with ferrous

<sup>1</sup> Correspondent author: goock\_hgg@hotmail.com

\* นักศึกษา หลักสูตรสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, นักวิจัย ศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

chloride lignite bottom ash occurred at pH 5. The lead removal efficiency were 97.11% and 86.37%, respectively. The lead removal efficiency of coated and non coated with ferrous chloride lignite bottom ash at the proper duration times of 30 minutes were 98.37% and 96.41%, respectively. Both adsorption isotherm corresponded with Freundlich models. The column fluidized bed reactor was run at 100 rpm. with three different flow rates of 150, 200 and 250 ml/min. The breakthrough times at these flow rates were 18, 13 and 6 hours, respectively. The median of efficiency for 3 flow rates were not statistically significant ( $p$ -value = 0.083). The result of this research was served as a background data and an option for development of lignite bottom ash coated and uncoated with ferrous chloride to remove wastewater containing lead.

**คำสำคัญ:** การกำจัดตะกั่ว การดูดซับ เถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยเฟอร์ริสคลอไรด์

**Keywords:** Lead removal, Adsorption, Coated and non-coated ferrous chloride with lignite bottom ash

## บทนำ

การพัฒนาทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการผลิตของเสียและกอมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ หากไม่ได้รับการบำบัด หรือมีการจัดการที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีบางส่วนที่ตกตะกอนแล้วสะสมอยู่ในดิน ในน้ำ หรือในดินตะกอนที่อยู่ในน้ำส่งผลให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายสัตว์น้ำและในสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในระบบนิเวศ ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ทางปากโดยรับประทานอาหาร และน้ำดื่มที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทางการหายใจ [1] พิษเรื้อรังของตะกั่วคือ แสดงอาการออกมา ภายหลังจากได้รับสารตะกั่วทีละน้อย เข้าสู่ของเหลว ในร่างกาย และค่อย ๆ สะสม ในร่างกาย จนถึงระยะเวลาหนึ่ง อาจนานเป็นปี จึงแสดงอาการ เมื่อเข้าสู่ร่างกาย ไม่ว่าทางใด จะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิต ไปจับกับเม็ดเลือดแดงแทนที่เหล็ก ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็น ในการสร้างเม็ดเลือดแดง ทำให้เกิดอาการโลหิตจาง (Anemia) และมีผลให้ปริมาณเหล็กในน้ำเหลืองเพิ่มขึ้นผิดปกติ [2] หากสะสมในกระดูก ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) จะเข้าไปแทนที่แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็น ในการสร้างกระดูก และฟัน ทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูกผุ และหักง่าย ถ้าไปสะสมที่รากฟัน ทำให้เห็นสีม่วง หรือสีดำ

บริเวณเหงือก บางครั้งเรียกว่า เส้นตะกั่ว (Lead Line) ฟันหลุดได้ง่าย ตะกั่วสามารถเกาะกับกระดูกในร่างกายได้นานถึง 32 ปี และยังคงสะสม ในไขมัน ระบบประสาท สมอ ระบบน้ำเหลือง ตับ และไต [3]

กระบวนการดูดซับ เป็นเทคนิคการบำบัดน้ำเสียที่สามารถกำจัดโลหะหนัก เป็นกระบวนการที่ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่าย โดยการดูดซับหรือการดูดติดผิวเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลว และของแข็ง เกิดขึ้น 4 ขั้นตอน [4] คือ Bulk Solution Transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว โดยการแพร่ Film Diffusion Transport อนุภาคโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic Boundary Layer) รอบสารดูดติดผิว Pore Transport สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิว และ Adsorption มีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [5] ได้แก่ ความปั่นป่วน ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำและความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร ที่ถูกดูดซับ ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่าพีเอช อุณหภูมิ ระยะเวลาในการสัมผัส ไอโซเทอร์มการดูดซับเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารหรือไอออน บนผิวอนุภาคต่าง ๆ

ที่อยู่ในสภาพสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เส้นไอโซเทอร์มจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปแล้วแต่แรง ที่ดึงดูดกันระหว่างพื้นผิวอนุภาคกับไอออนนั้น ทัวไปการศึกษาไอโซเทอร์ม จะพบอยู่ 4 ลักษณะ [6] คือ ไอโซเทอร์มชนิดตัวเอส (S-Curve Isotherm) ไอโซเทอร์มชนิดตัวแอล (L-Curve Langmuir Isotherm) ไอโซเทอร์มชนิดตัวเอช (H-Curve High Affinity Isotherm) และไอโซเทอร์มชนิดตัวซี (C-Curve Constant Isotherm) โดยทัวไปการดูดซับไอออนบนพื้นผิวอนุภาค สามารถอธิบายได้ด้วยหลายสมการ แต่ที่นิยมใช้ คือ สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และสมการฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) โดยสมการแลงเมียร์ มีสมการเส้นตรง ดังนี้ [4]

$$q_c = (q_m K_A C_c) / (1 + K_A C_c) \quad (1)$$

เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$$q_m = \text{ปริมาณของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ณ สภาวะสมดุล}$$

$$K_A = \text{ค่าคงที่ของตัวดูดซับ (ลิตร/มิลลิกรัม)}$$

$$C_c = \text{ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)}$$

และสมการฟรุนดลิช มีสมการเส้นตรง ดังนี้ [4]

$$q_c = K_F C_c^{1/n} \quad (2)$$

เมื่อ  $q_c$  = ปริมาณของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$$C_c = \text{ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)}$$

$$K_F, n = \text{ค่าคงที่}$$

การกำจัดโลหะหนักที่ออกมาจากขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายวิธี แต่การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเป็นไปได้ทางเทคนิค ค่าใช้จ่ายด้านเครื่องมือ อุปกรณ์เครื่องมือและเทคโนโลยี ตลอดจนความชำนาญของบุคลากร

ที่ปฏิบัติงาน ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนจึงควรเลือกวิธีการ หรือเทคนิคในการบำบัด และกำจัดที่เหมาะสม การใช้กระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านหินเป็นตัวกลาง เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] เนื่องจากอนุภาคของถ่านประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากถ้าเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่าย [8] ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง มีการดูดติดผิวเป็นอย่างดี และเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถ หาได้ในท้องถิ่น จึงเหมาะสำหรับการนำมาเป็นวัสดุดูดซับ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิวของตัวดูดซับการเคลือบผิวของถ่านหินจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมากขึ้น ดังเช่นการใช้ทรายที่เคลือบด้วยสารประกอบเหล็กเพื่อดูดซับโลหะหนัก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่าทรายที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว [9] ดังนั้น ผู้ศึกษาจึงต้องการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียที่สังเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถ่านลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพการดูดซับ ของถ่านลิกไนต์ที่มีการเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถลดผลกระทบที่จะเกิดกับสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ตลอดจนลดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

## วัตถุประสงค์การศึกษา

1. เพื่อศึกษาความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านลิกไนต์ ที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์

2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการกำจัดน้ำเสียปนเปื้อนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลา และปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับของถ่านลิกไนต์ทั้งที่ผ่านการเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์ โดยศึกษาขนาด พื้นที่ผิวค่าดูดซับไอโอดีน และความสามารถในการแลกเปลี่ยน

แคทไอออน (CEC) ของเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบเพอร์สคโลไรด์

3. เพื่อศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับตะกั่ว โดยใช้เถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์

4. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ โดยใช้เถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบเพอร์สคโลไรด์เป็นตัวดูดซับ

## วิธีการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ เป็นตัวกลางในการกำจัดตะกั่ว ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่สังเคราะห์ โดยการทดลองแบ่งการเปรียบเทียบระหว่างเถ้าถ่านหินที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ ซึ่งการเคลือบผิวจะนำเถ้าถ่านลิกไนต์ปริมาณ 1 กิโลกรัม มาผสมกับสารละลายเพอร์สคโลไรด์ 2 โมลต่อลิตร จนชุ่ม จากนั้นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง [9] โดยเริ่มดำเนินการทดลองตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2556 – พฤษภาคม 2558 ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) สาขาขอนแก่น โดยทำการศึกษาแบบเบต และแบบคอลัมน์ ดังนั้นการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) การทดลองแบบเบต (Batch Study) โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 500 มิลลิลิตร และเติมตัวดูดซับ 20 กรัม เพื่อศึกษาความสามารถ การดูดซับของเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบเพอร์สคโลไรด์ และศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมของเถ้าถ่านลิกไนต์ ที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว โดยศึกษาค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว โดยกำหนดค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย (pH) 5 ระดับ คือ 4, 5, 6, 7, 8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

1 นอร์มอล และกรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$ ) 0.02 นอร์มอล ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยกำหนดที่ 6 ระดับ คือ ที่ 10, 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที และเพื่ออธิบายรูปแบบของการดูดซับตะกั่ว โดยศึกษาไอโซเทอร์มจากสมการของ Langmuir และ Freundlich นอกจากนี้ ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ขนาด พื้นที่ผิว ค่าความสามารถการดูดซับไอโอดีน และความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC) 2) การทดลองแบบคอลัมน์แบบปั่นป่วน (Fluidized Bed Process) ในถังปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 26.5 เซนติเมตร สูง 145 เซนติเมตร กำหนดน้ำเสียสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ 50 ลิตร เติมตัวดูดซับ 2 กิโลกรัม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด และจุดเสื่อมสภาพของเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ โดยกำหนดให้อัตราการไหลเป็น 3 ระดับ คือ 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที โดยกำหนดน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น ประมาณ 0.896 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งการทดลองแบบเบต และแบบคอลัมน์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดใกล้เคียงกับปริมาณตะกั่วทั้งหมด (Total Lead) ที่พบในสิ่งแวดล้อมบริเวณห้วยคลิตี้ ปี 2552 จังหวัดกาญจนบุรี [5]

## ผลการศึกษา

จากการศึกษาขนาดของเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ ด้วยเครื่องร่อนตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตร พบว่าเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ สามารถผ่านตะแกรงได้ ร้อยละ 56.73 และเถ้าถ่านลิกไนต์ที่ไม่เคลือบเพอร์สคโลไรด์สามารถผ่านตะแกรงได้ ร้อยละ 79.10 จากการศึกษาพื้นที่ผิวของเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าในเถ้าถ่านหินลิกไนต์มีลักษณะเป็นของแข็ง เป็นเกล็ดขนาดเล็ก และเถ้าถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์

มีผลึกของเฟอร์ริคคลอไรด์เกาะอยู่บริเวณผิวของถ่านอยู่เป็นจำนวนมาก มีลักษณะเป็นผลึกเกล็ดละเอียดกว่าถ่านลิกไนต์ที่ไม่ได้เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ (ภาพที่ 1) ซึ่งลักษณะดังกล่าว ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวดูดซับได้ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ของถ่านลิกไนต์ ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ มีค่า 1.40 ความเข้มข้นโมลต่อลิตรกรัม และ 1.00 ความเข้มข้นโมลต่อลิตรกรัม ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ มีค่าความสามารถดูดซับไอโอดีน 57.95 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านลิกไนต์ที่ไม่เคลือบเฟอร์ริคคลอไรด์ มีค่าความสามารถดูดซับไอโอดีน 45.20 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า ทำให้ดูดซับไอโอดีนได้ ในปริมาณที่มากกว่าถ่านลิกไนต์ ที่ไม่เคลือบเฟอร์ริคคลอไรด์ เมื่อใช้ความเร็วรอบการกวนเป็น 100 รอบต่อนาที และเวลา 180 นาทีเท่ากัน พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่า 5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุด โดยถ่านลิกไนต์ที่เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์สามารถดูดซับได้ร้อยละ 97.11 และถ่านลิกไนต์ที่ไม่เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์ สามารถดูดซับได้ ร้อยละ 86.37 และพบว่า เมื่อเพิ่มค่าพีเอช แนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านลิกไนต์เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์และไม่เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์จะค่อยๆ ลดลง (ตารางที่ 1) เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นหรือมากกว่า 6 ตะกั่วจะอยู่ในรูปของ  $Pb(OH^+)$  เพิ่มขึ้น และเกิดกระบวนการตกตะกอนมากกว่าการดูดซับเมื่อกำหนดค่าพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น 5 และความเร็วรอบการกวนเป็น 100 รอบต่อนาที พบว่า ระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุด คือ 30 นาที โดยถ่านลิกไนต์ที่เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์สามารถกำจัดได้ ร้อยละ 98.37 และถ่านลิกไนต์ที่ไม่เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์ สามารถกำจัดได้ ร้อยละ 96.41 และระยะเวลาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วลดลง (ตารางที่ 2) เนื่องจากช่องว่างภายในตัวดูดซับจะลดลงทำให้เกิดการคายมากขึ้น

รูปแบบการดูดซับของถ่านลิกไนต์ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ มีแนวโน้มเป็นไปตามรูปแบบสมการ Freundlich Isotherm โดยมีค่า  $R^2 = 0.998$  และถ่านลิกไนต์ที่ไม่เคลือบด้วยเฟอร์ริคคลอไรด์ มีรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Freundlich เช่นกัน โดยมีค่า  $R^2 = 0.999$  (ภาพที่ 3) อาจเนื่องจากเป็นกระบวนการดูดซับแบบหลายชั้น และเมื่อทำการทดลองแบบคอลัมน์ในถังปฏิกรณ์ (Fluidized Bed Process) ใช้ความเร็วรอบกวน 100 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วทั้ง 3 อัตราการไหล มีมัธยฐานของประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกัน ( $p$ -value = 0.083) แต่มีจุดเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ ที่อัตราการไหลต่างกัน คือ ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที เริ่มเสื่อมสภาพที่เวลา 18, 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ (ตารางที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับตะกั่วจากการทดลองแบบเทและแบบคอลัมน์โดยใช้ถ่านลิกไนต์เคลือบผิวเฟอร์ริคคลอไรด์ ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ระยะเวลา 30, 60 และ 120 นาที พบว่าความสามารถการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งการทดลองแบบเทและแบบคอลัมน์ เนื่องจากหลังจากเข้าสู่สมดุลและเวลาผ่านไปช่องว่างภายในตัวดูดซับจะลดลงทำให้เกิดการคายมากขึ้น จึงเกิดการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ

## วิจารณ์ผล

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบปั่นป่วน ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ปริมาณน้ำเมื่อถึงจุดเริ่มเสื่อมสภาพ คือ 162, 117 และ 54 ลิตร ตามลำดับ เริ่มเสื่อมสภาพประมาณ 18, 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการบำบัดร้อยละ 78.78, 78.04 และ 77.11 ตามลำดับ โดยเกณฑ์ในการกำหนดจุดเริ่มเสื่อมสภาพที่ร้อยละ 80 กำหนดตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมให้มีตะกั่วได้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (พรบ. โรงงาน

พ.ศ. 2535) ซึ่งยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินกำหนดให้มีตะกั่วได้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร (พรบ.ส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535) แต่เมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ค่าพีเอชและระยะเวลาที่เหมาะสม พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงคือ ร้อยละ 98.37 และ 96.41 ถ้าถ่านหินลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบผิวเพอร์สคโลไรด์ ตามลำดับ

### สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า เมื่อมีการเคลือบถ่านหินลิกไนต์ด้วยเพอร์สคโลไรด์ ทำให้ตัวดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น จึงผ่านตะแกรงขนาด 0.18 มิลลิเมตรได้น้อยกว่าถ่านหินลิกไนต์ที่ไม่เคลือบเพอร์สคโลไรด์ และจากการเคลือบผิวด้วยเพอร์สคโลไรด์ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับถ่านหินลิกไนต์ (ตัวดูดซับ) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว จากการทดลองความสามารถดูดซับตะกั่ว ที่ความเร็วรอบเป็น 100 รอบต่อนาที และเวลา 180 นาที พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วดีที่สุด และเมื่อเพิ่มค่าพีเอช แนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านหินลิกไนต์เคลือบผิวเพอร์สคโลไรด์และไม่เคลือบผิวเพอร์สคโลไรด์จะค่อย ๆ ลดลง และระยะเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ดีที่สุดคือ 30 นาที เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น แนวโน้มของประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วด้วย ถ่านหินลิกไนต์เคลือบผิวเพอร์สคโลไรด์และไม่เคลือบผิวเพอร์สคโลไรด์จะค่อย ๆ ลดลง รูปแบบการดูดซับของทั้งถ่านหินลิกไนต์ที่เคลือบและไม่เคลือบด้วยเพอร์สคโลไรด์ สอดคล้องกับสมการ Freundlich จากการทดลองหาระยะเวลาที่ตัวดูดซับเสื่อมสภาพ ในถึงปฏิกรณ์แบบ Fluidized Bed ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยกำหนดจุดเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ คือประสิทธิภาพร้อยละ 80 พบว่า ที่อัตราการไหลต่างกัน ระยะเวลาที่ตัวดูดซับเสื่อมสภาพแตกต่างกัน คือ ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ตัวดูดซับเริ่มเสื่อมสภาพประมาณ

18, 13 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ และความสามารถกำจัดตะกั่วที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิเมตรต่อนาที ไม่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาดังกล่าวพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ค่าพีเอชและระยะเวลาที่เหมาะสม สามารถกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 95 และผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (พรบ. โรงงาน พ.ศ. 2535) ซึ่งเหมาะจะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วปนเปื้อน แต่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงขึ้น อาจมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดเพิ่มเติม เนื่องจาก ผลการศึกษาข้างต้นได้จากการจำลองระบบและทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคลากรและคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาอบรมสั่งสอนวิชาความรู้ สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ดำเนินการทดลองแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ทุนสนับสนุนบางส่วนของการวิจัยครั้งนี้ ส่วนดีและคุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุคลากรและบูรพคณาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาแก่ผู้วิจัย จนผลงานวิจัยสามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจการศึกษาครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

1. Department of Medical Sciences. Lead toxicity. Bangkok: Ministry of Public Health; 1989. Thai.
2. Zhao X, deming D, Xiuyi H, Shoufei D. Investigation of the transport and fate of Pb, Cd, Cr(VI) and As in soil zone derived from moderately contaminated farmland in Northeast China. Journal of Hazardous Material 2009; 170: 570-577.

3. Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Lead (Update). Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2007.
4. Udomsinrot K. Wastewater treatment. Bangkok: Siam Stationery Supplies; 1999. Thai.
5. Pollution Control Department. Lead Contaminate at Klity Creek. Bangkok: Pollution Control Department; 2008. Thai.
6. Giles CH, Smith D, Huitson A. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherms--I. Theoretical: J. Coll. Interface Sci. 1974) 47, 755-765.
7. Yavada KP, Tyagi BS, Singh VN. Fly-Ash for the Treatment of Water Enriched in Lead(II). Journal of Envi Sci and Health. 1989; 783-808.
8. Suwannatri S, Krongthumchat K. Removal of arsenic in synthetic wastewater by botton ash from dycing industrial. Journal of Thai Environmental Engineering . 2013; 27(3): 29-38. Thai.
9. Joshi A, Chaudhuri M. Removal of Arsenic from Ground Water by Iron Oxide-Coated Sand. ASCE Journal of Environmental Engineering. 1996; 122(8): 769-771.

**ตารางที่ 1** ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เคลือบเฟอรัสคลอไรด์และไม่เคลือบเฟอรัสคลอไรด์เป็นตัวดูดซับ ในค่าพีเอชที่ต่างกัน

ค่าพีเอช	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)	
	ไม่เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์	เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์
4	56.59	90.56
5	86.37	97.11
6	49.85	74.48
7	58.74	76.00
8	61.48	71.74

**ตารางที่ 2** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถ่านหินลิกไนต์เคลือบเฟอรัสคลอไรด์และไม่เคลือบเฟอรัสคลอไรด์เป็นตัวดูดซับในระยะเวลาที่ต่างกัน

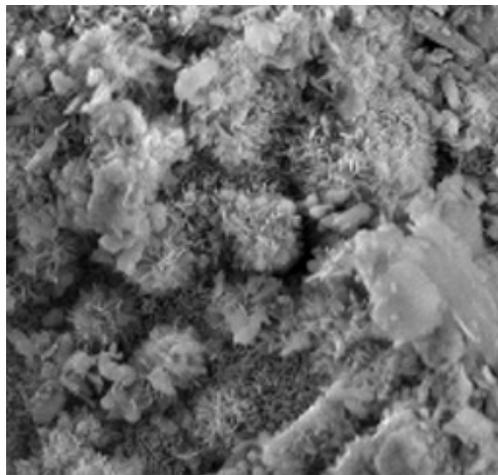
ระยะเวลาการกวน (นาที)	ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว (ร้อยละ)	
	ไม่เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์	เคลือบผิวด้วยเฟอรัสคลอไรด์
10	83.67	95.41
30	96.41	98.37
60	62.52	75.70
90	83.11	89.89
120	75.81	77.96
150	71.15	82.15

ตารางที่ 3 สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบจำลองของฟรุนดลิชและแบบจำลองของแลงเมียร์

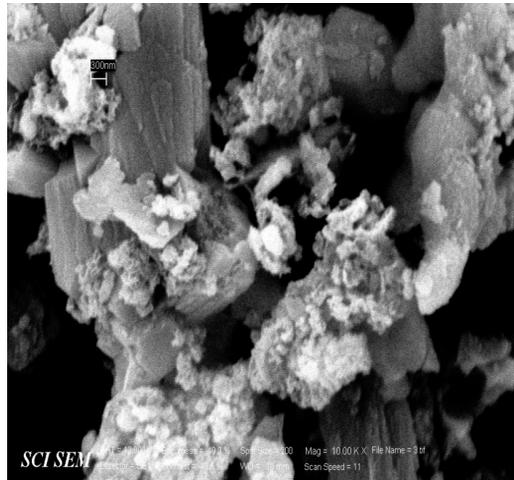
	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช		ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์	
	ไม่เคลือบผิว	เคลือบผิว	ไม่เคลือบผิว	เคลือบผิว
	$q_e = K_F C^{1/n}$		$q_e = (q_m K_A C_e)/(1 + K_A C_e)$	
สมการเส้นตรง	$y = 1.0472X$	$y = 1.0198X$	$y = 50590.82X$	$y = 45662.28X$
	-4.6990	-4.6528	-648.8182	-353.9771
slope	1.0472	1.0198	50,590.82	45,662.28
จุดตัดแกน y	-4.6990	-4.6528	-648.8182	-353.9771
R Square (R <sup>2</sup> )	0.9996	0.9998	0.9998	0.9998
K (ค่าคงที่)	$2.224 \times 10^{-5}$	$2.000 \times 10^{-5}$	-0.0132	-0.0078
n(ค่าคงที่)	0.9549	0.9805	-	-
$q_m$ (m/l)	-	-	$1.977 \times 10^{-5}$	$2.190 \times 10^{-5}$

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณน้ำเมื่อถึงจุดเริ่มเสื่อมสภาพของแก้ว่านลิกไนต์เคลือบผิวด้วยเพอร์สคโลไรต์ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที

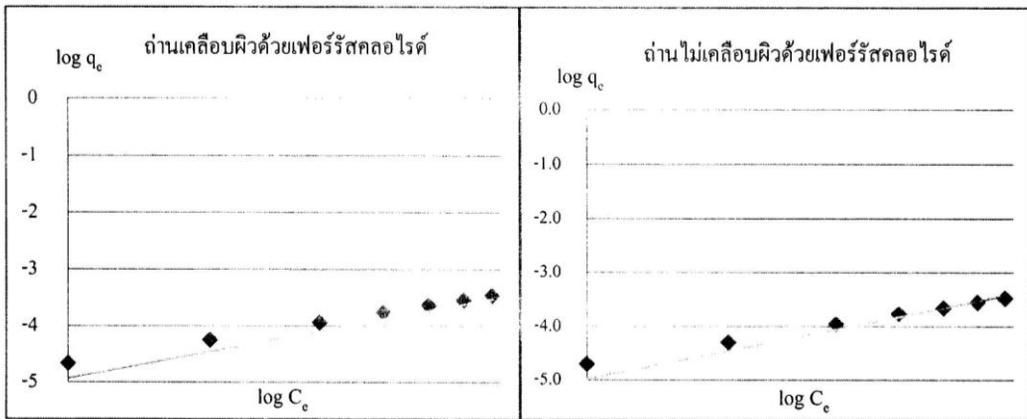
อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	จุดเริ่มเสื่อมสภาพ (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพในการกำจัด (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำถึงจุดเริ่ม เสื่อมสภาพ (ลิตร)
150	18	78.78	162
200	13	78.04	117
250	6	77.11	54



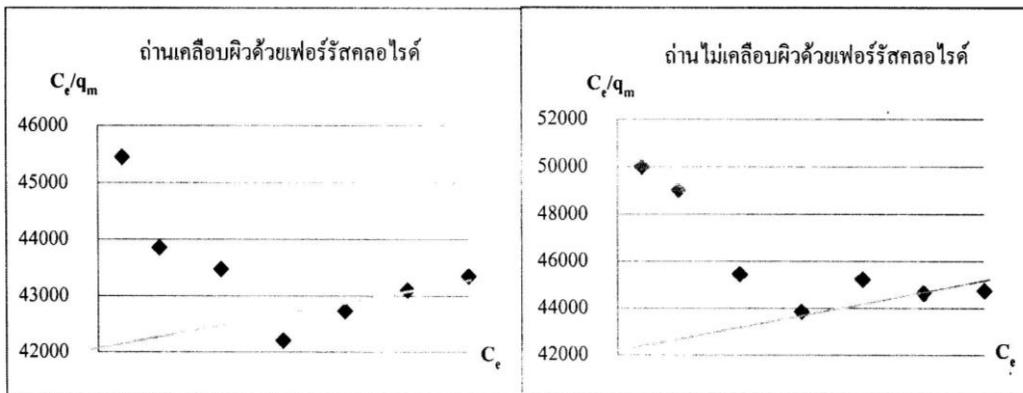
ภาพที่ 1 แก้ว่านลิกไนต์เคลือบเพอร์สคโลไรต์ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



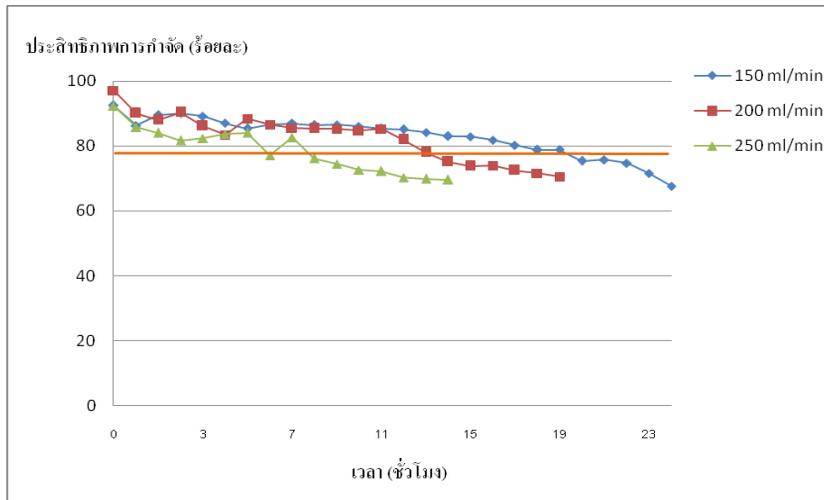
ภาพที่ 2 แก้ว่านลิกโนไนด์ที่ไม่เฟอร์รืสคลอไรด์ ที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



ภาพที่ 3 กราฟแสดงรูปแบบการดูดซับตามสมการของ Freundlich Isotherm



ภาพที่ 4 กราฟแสดงรูปแบบการดูดซับตามสมการของ Langmuir Isother



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วโดยใช้ถังปฏิกรณ์ แบบปั่นป่วน (Fluidized Bed Process) โดยใช้ความเร็วรอบกวน 100 รอบต่อนาที ที่อัตราการไหล 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรต่อนาที