



พฤติกรรมการดูดซับตะกั่วด้วยเถ้าชีวมวล

BEHAVIORS OF ADSORPTION OF LEAD ON BIOMASS ASH

นพปดล เสงี่ยมศักดิ์¹ พิชญา ศรีเสน² ฟนทิพย์ แนบสนิท²

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²นิสิตปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับตะกั่วของเถ้าชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอย เถ้าไม้ และเถ้าชานอ้อย โดยใช้วิธีทดสอบแบบการศึกษาประกอบด้วยการหาผลกระทบของระยะเวลาดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับ สารละลายตะกั่วที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นในช่วง 1 ถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่า การดูดซับของเถ้าทั้งสามชนิดเข้าสู่สถานะสมดุลภายในระยะเวลา 30 นาที โดยเกิดขึ้นได้เร็วที่สุดในเถ้าชานอ้อย ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยเถ้าชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดทั้งที่ความเข้มข้นต่ำและความเข้มข้นสูง แบบจำลองของฟรอนด์ลิชสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองของแลงเมียร์ ความสามารถในการดูดซับตะกั่วเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ เถ้าชานอ้อย เถ้าไม้ และเถ้าลอย โดยพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

คำสำคัญ: การดูดซับ, โลหะหนัก, ตะกั่ว, ไอโซเทอม

ABSTRACT

This research studied the behaviors of adsorption of lead on three kinds of biomass ash i.e., fly ash, wooden ash and bagasse ash. The effects of contact time, the adsorption capability and the adsorption isotherm were investigated by the batch method. The concentrations of the solution used in the batch test were in the range of 1-1000 mg/L. The results indicated that the adsorption reached to equilibrium within 30 minutes that the most rapid adsorption occurred in the bagasse ash. The adsorption capability decreased when the initial concentration increased. Freundlich model could describe the adsorption of all ash better than Langmuir model. The adsorption capacities in ascending order was bagasse ash, wood ash and fly ash. The specific area of the ashes affected the adsorption capacities.

KEYWORDS: Adsorption, Heavy Metals, Lead, Isotherm

Noppadol Sangiamsak¹ Pitchaya Srisane² Fonthip Naepsanit²

¹ Asst.Prof. Concrete and Computer Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

² Undergraduate students, Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

1. บทนำ

ตะกั่วเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา แบตเตอรี่ โรงน้ำปลา โรงน้ำตาล โรงงานอาหารกระป๋อง และเหมืองแร่ เป็นต้น ส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนตามแหล่งต่างๆ โดยเฉพาะในน้ำเสีย ตะกั่วมีความเป็นพิษสูง สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งปากและทางจุมูกและทางผิวหนัง เมื่อได้รับสารตะกั่วติดต่อกันเป็นเวลานานจะส่งผลให้เป็นโรคพิษตะกั่ว มีผลเสียต่อเซลล์ประสาท การทำงานของไต ทำให้เม็ดเลือดแดงแตกได้ง่าย มีผลต่อระบบย่อยอาหารทำให้ปวดท้อง น้ำหนักลด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน จนถึงทำให้เกิดอาการประสาทหลอน ชัก เป็นอัมพาตและอาจเสียชีวิตได้ [1]

ถั่วลอย ถั่วไม้ และถั่วชานอ้อย เป็นวัสดุชีวมวลที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ถั่วลอยเกิดจากเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มีถั่วลอยเกิดขึ้นจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในปริมาณที่สูงถึง 3 ล้านตันต่อปี [2] ถั่วไม้ เกิดจากการเผาเปลือกไม้หรือไม้สับเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีการจำหน่ายเปลือกไม้ยูคาลิปตัสให้กับโรงไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่า 5 แสนตันต่อปี [3] ผลจากการเผาทำให้มีถั่วไม้เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ถั่วชานอ้อย เกิดจากการเผาชานอ้อยเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในโรงงานน้ำตาล ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2551 มีถั่วชานอ้อยเกิดขึ้นในประเทศไทยประมาณ 4.3 แสนตันต่อปี [4] ถั่วทั้งสามชนิดถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้ถมที่ดิน ใช้เป็นวัสดุปูขุขอลานโดยผสมกับปูนซีเมนต์ หรือใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีปริมาณที่เหลือจากการนำไปใช้ประโยชน์อีกเป็นจำนวนมากทำให้เกิดปัญหาในการกองเก็บ เกิดการฟุ้งกระจายในอากาศและถูกน้ำชะไปปนเปื้อนตามแหล่งต่างๆ

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำวัสดุชีวมวลมาใช้ในการดูดซับโลหะหนัก เช่น การศึกษาการดูดซับโลหะหนักของถั่วลอย [5-7] ถั่วชานอ้อย [8] ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นงานวิจัยในต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม ถั่วชีวมวลแต่ละแห่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำถั่วลอยจากถ่านหิน ถั่วชานอ้อย และถั่วไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งภายในประเทศ มีอยู่เป็นจำนวนมากและมีมูลค่าต่ำ มาใช้ในการดูดซับตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยศึกษาถึงพฤติกรรมของการดูดซับตะกั่วของถั่วทั้งสามชนิด ทั้งนี้ เพื่อเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งเป็นแนวทางในการกำจัดสารอันตรายที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

2. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

2.1 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับประกอบด้วยถั่วชีวมวลถั่ว 3 ชนิด คือ 1) ถั่วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 2) ถั่วชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาลมิตรผลภูเวียง จังหวัดขอนแก่น และ 3) ถั่วไม้จากโรงงานสับไม้ อำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางด้านพื้นที่ผิวของถั่วทั้งสามชนิดซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET) ซึ่งพบว่าถั่วชานอ้อยมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ส่วนถั่วลอยมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำที่สุด รูปที่ 1 ถึง 3 แสดงภาพถ่ายของถั่วทั้งสามชนิด

2.2 ตัวถูกดูดซับ

ตัวถูกดูดซับในงานวิจัยนี้คือตะกั่ว ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลาย เตรียมได้โดยนำสารละลายตะกั่วไนเตรท ($Pb(NO_3)_2$) มาเจือจางในน้ำกลั่นจนมีความเข้มข้นตามที่ต้องการ คือ 1, 5, 250, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร คุณสมบัติของตะกั่วไนเตรทแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางด้านพื้นผิวของถ้ำลอย ถ้ำไม้ และถ้ำชานอ้อย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

ชนิดของถ้ำชีวมวล	พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุนรวม (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
ถ้ำลอย	3.75	7.42	3.54
ถ้ำไม้	4.08	7.35	3.54
ถ้ำชานอ้อย	12.39	7.07	3.54



รูปที่ 1 ถ้ำลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 2 ถ้ำไม้



รูปที่ 3 ถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตะกั่วไนเตรท

สูตรทางเคมี	$Pb(NO_3)_2$
มวลโมเลกุล (g/mol)	331.2
ความหนาแน่น (g/cm ³)	4.53
ความสามารถในการละลายน้ำ (g/L)	376.5

3. วิธีการศึกษา

การศึกษาการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ใช้วิธีทดสอบแบบกะ โดยผสมถ่าน 2.5 กรัม กับสารละลายตะกั่ว 50 มิลลิลิตร ในขวดพลาสติก วางทิ้งไว้จนถึงระยะเวลาที่กำหนด นำส่วนผสมในขวดพลาสติกมากรองด้วยตัวกรอง (Filter) ขนาด 0.45 ไมครอน จากนั้น เจือจางส่วนผสมที่กรองแล้วด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 1 แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (AAS) การศึกษาการดูดซับประกอบด้วย

3.1 ผลกระทบของระยะเวลาดูดซับ

การหาผลกระทบของระยะเวลาดูดซับ เป็นการหาปริมาณการดูดซับที่ระยะเวลาดูดซับต่างๆ ทดสอบได้โดยนำถ่าน 2.5 กรัม ผสมกับสารละลายตะกั่วเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปล่อยให้ส่วนผสมทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 30, 60, 120 และ 180 นาที ทำการคำนวณหาปริมาณการดูดซับที่แต่ละระยะเวลาดูดซับจากสมการต่อไปนี้

$$q = \frac{(C_o - C_{eq})V}{W} \quad (1)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) C_o และ C_{eq} คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร) ตามลำดับ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร) และ W คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

นอกจากจะทราบถึงผลกระทบของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับแล้ว ยังทราบถึงระยะเวลาดูดซับสมดุล (Equilibrium Time) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยอัตราการดูดซับ (Adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (Desorption)

3.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับสามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_{eq}}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

ในงานวิจัยนี้จะหาประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีค่าต่างๆ วิธีทดสอบทำได้โดยผสมเอา 2.5 กรัม กับสารละลายตะกั่วความเข้มข้น 1, 5, 250, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปล่อยให้การดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล นำค่าความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลมาคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับตามสมการที่ 2

3.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_{eq}) กับปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q) วิธีการทดสอบหาไอโซเทอมการดูดซับทำได้เช่นเดียวกับการหาประสิทธิภาพการดูดซับดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

เมื่อได้ไอโซเทอมการดูดซับแล้ว จะทำการสร้างแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และแบบจำลองการดูดซับของฟรุนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

แบบจำลองของแลงเมียร์ เป็นแบบจำลองการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (monolayer) มีจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับและตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน [8] โดยมีสมการในรูปเส้นตรงดังนี้

$$q = \frac{\alpha\beta C_{eq}}{1 + \alpha C_{eq}} \quad (3)$$

เมื่อ α คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม) และ β คือ ปริมาณสูงสุดของสารละลายที่ถูกดูดซับต่อปริมาณเอาท์ที่ใช้ดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) หรือเป็นความสามารถในการดูดซับได้ของตัวดูดซับ

สำหรับแบบจำลองของฟรุนด์ลิช เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้เช่นเดียวกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับในระบบที่ตัวดูดซับเป็นของแข็งและตัวถูกดูดซับละลายอยู่ในของเหลว (Solid-Liquids System) [9] มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวอย่างไม่สม่ำเสมอ เกิดขึ้นได้หลายชั้น (multilayer) มีรูปแบบของสมการดังนี้

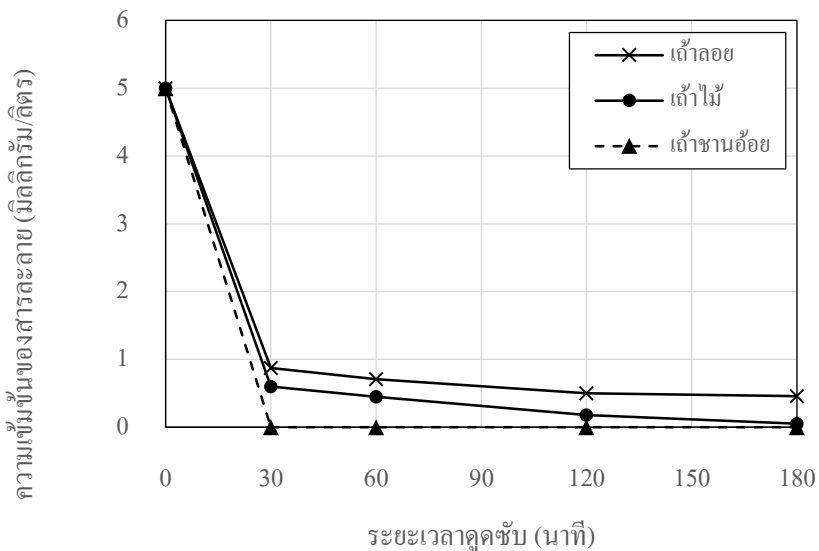
$$q = k(C_{eq})^{1/n} \quad (4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) n คือ ค่าคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานการดูดซับ

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลกระทบของระยะเวลาดูดซับและระยะเวลาดูดซับสมดุล

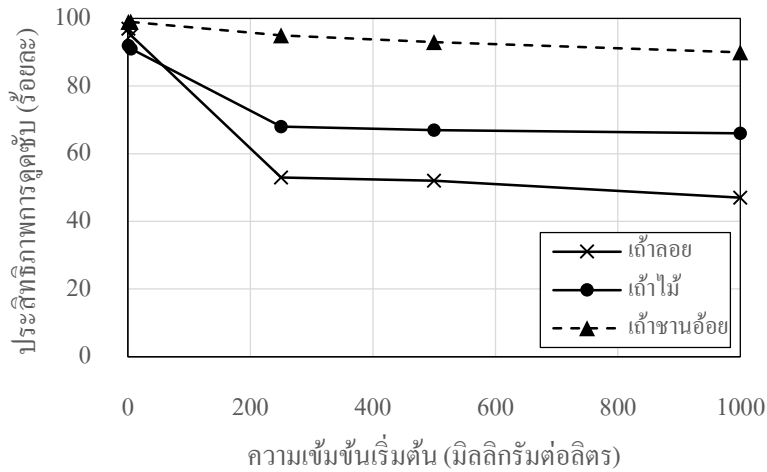
รูปที่ 4 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้ถ้ำลอย ถ้ำไม้ และถ้ำขานอ้อยเป็นตัวดูดซับ โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก จากนั้น จะลดลงอย่างช้าๆ สำหรับถ้ำขานอ้อยจะสามารถดูดซับตะกั่วได้ทั้งหมดตั้งแต่เวลา 30 นาทีเป็นต้นไป พฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและมีอัตราช้าลงเรื่อยๆ นี้เป็นพฤติกรรมโดยทั่วไปของการดูดซับ เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่ในการดูดซับมีเป็นจำนวนมาก ทำให้อนุภาคของตะกั่วซึ่งกระจายตัวอยู่ในสารละลายเคลื่อนที่ไปเกาะกับพื้นผิวของถ้ำชีวมวลได้อย่างสะดวกรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปพื้นผิวในการดูดซับมีจำนวนลดลงทำให้การดูดซับเกิดได้ยากขึ้นและมีอัตราที่ลดลง [10] จากแนวโน้มของกราฟสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาดูดซับสมดุลของถ้ำทั้งสามชนิดเกิดขึ้นภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 นาที



รูปที่ 4 การดูดซับตะกั่วของถ้ำลอย ถ้ำไม้ และถ้ำขานอ้อยที่ระยะเวลาต่างๆ

4.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ

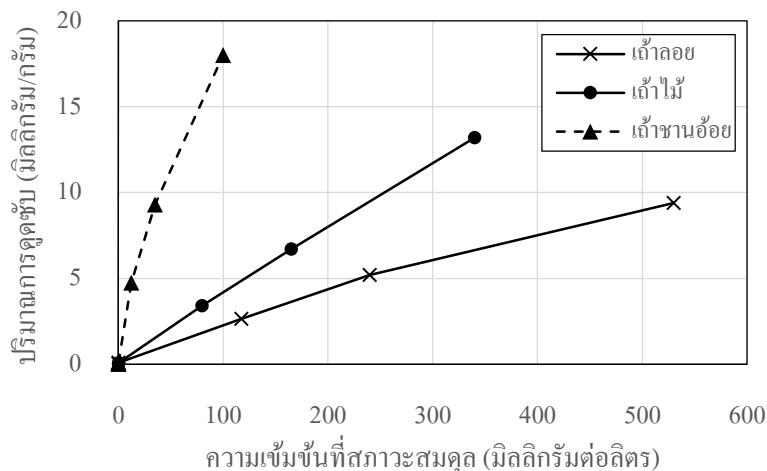
จากการหาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 1, 5, 250, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าถ้ำลอยและถ้ำไม้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงมากที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 250 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไปประสิทธิภาพมีค่าลดลงค่อนข้างมาก ในขณะที่ถ้ำขานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงทุกๆ ความเข้มข้น (มากกว่าร้อยละ 90) การลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้พื้นผิวดูดซับอิ่มตัว ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดลง [11]



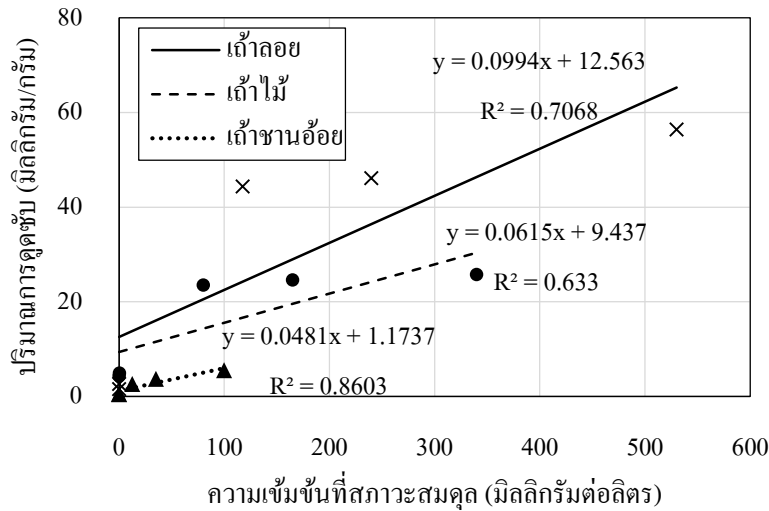
รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของเต้าลอย เต้าไม้ และเต้าชานอ้อย

4.3 ไอโซเทอมการดูดซับและแบบจำลองการดูดซับ

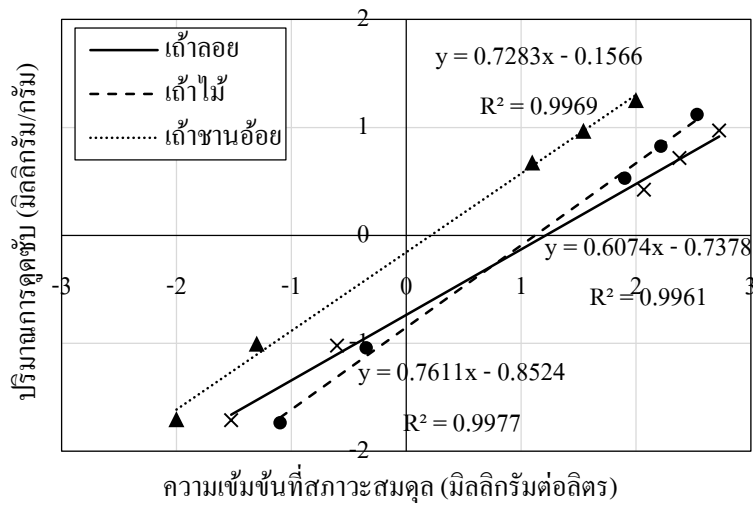
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ (q) กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล จะได้ไอโซเทอมการดูดซับดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่า ปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลงเรื่อยๆ (กราฟมีลักษณะเป็นโค้งคว่ำ) ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้มีปริมาณของตะกั่วกระจายอยู่ในสารละลายเพิ่มขึ้น จึงมีปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันพื้นที่ผิวในการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ ทำให้การดูดซับเกิดได้ยากขึ้น รูปที่ 7-8 เป็นแบบจำลองการดูดซับตะกั่วของแลงเมียร์และของฟรุนด์ลิช ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า R^2 แล้วพบว่า แบบจำลองของฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายการดูดซับได้ดีกว่าแบบจำลองของแลงเมียร์ ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้งสอง เมื่อพิจารณาค่า β ซึ่งเป็นปริมาณการดูดซับสูงสุด จะเห็นว่า เต้าชานอ้อยสามารถดูดซับตะกั่วได้มากที่สุดส่วนเต้าลอยสามารถดูดซับได้น้อยที่สุด ความสามารถในการดูดซับของเต้าทั้งสามชนิดนี้ มีความสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ เต้าชานอ้อยมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ในขณะที่เต้าลอยมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด ดังนั้น จึงเห็นได้ชัดเจนว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ



รูปที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับ



รูปที่ 7 แบบจำลองการดูดซับตะกั่วของแลงเมียร์



รูปที่ 8 แบบจำลองการดูดซับตะกั่วของฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแลงเมียร์และฟรอนด์ลิช

ถ้ำชีวมวล	พารามิเตอร์ของแลงเมียร์			พารามิเตอร์ของฟรอนด์ลิช		
	β (mg/g)	α (L/mg)	R^2	K (mg/g)	1/n	R^2
ถ้ำลอย	10.06	0.0079	0.7068	0.1829	0.6074	0.9961
ถ้ำไม	16.26	0.0065	0.6330	0.1405	0.7611	0.9977
ถ้ำชานอ้อย	20.79	0.0410	0.8603	0.6973	0.7283	0.9969

5. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับตะกั่วของเถ้าลอย เถ้าไม้ และเถ้าชานอ้อย พบว่าการดูดซับตะกั่วเข้าสู่สถานะสมดุลภายในระยะเวลา 30 นาที เถ้าชานอ้อยมีประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าเถ้าไม้และเถ้าลอย โดยปริมาณการดูดซับตะกั่วสูงสุดของเถ้าชานอ้อย เถ้าไม้ และเถ้าลอย คือ 20.79, 16.26 และ 10.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับตะกั่วแปรตามขนาดของพื้นที่ผิวจำเพาะ กล่าวคือ เถ้าชานอ้อยมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด ส่วนเถ้าลอยมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด ไอโซเทอมการดูดซับมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของฟรุนด์ลิชมากกว่าแบบจำลองของแลงเมียร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในการสนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai Encyclopedia for youth. Lead poisoning, 2018. Available from: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=22&chap=6&page=t22-6-infodetail02.html> [Accessed 4 April 2018].
- [2] Kositchaiyong, A. *et al.* Utilization of fly ash particles as cost reducing agent for rotational-moulded polyethylene product through blending condition improvement. *Journal of Research and Innovation for Thai Industries*, 2010, 1(1), pp. 43-53.
- [3] Jirukkakul, P. *et al.* Energy Potential from Eucalyptus Bark Biomasses in North East. in: The 13th TSAE National Conference (TSAE), Chiang Mai, 4-5 April 2012, pp. 443-449.
- [4] Somna, R. and Jaturapitakkul, C. Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *KMUTT Research and Development Journal*, 2011, 34(4), pp. 369-381.
- [5] Gupta V.K. Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *Water Research*, 2003, 37, pp. 4038–4044.
- [6] Gupta V.K. and Ali I. Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash—a sugar industry waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 271, pp. 321–328.
- [8] Puspa H. Adsorption behavior of heavy metals on to chemically modified sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 2010, 101, pp. 2067–2069.
- [7] Nascimento M. *et al.* Adsorption of heavy metal cation using coal fly ash modified by hydrothermal method. *Fuel*, 2009, 88, pp. 1714–1719.
- [8] Hsieh C.H. *et al.* Adsorption of copper ions onto microwave stabilized heavy metal sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, B136, pp. 338-344.
- [9] Suna Erses A. *et al.* Determination of solid waste sorption capacity for selected heavy metals in landfill. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, B121, pp. 223-232.
- [10] Repo E. *et al.* Heavy metals adsorption by novel EDTA-modified chitosan-silica hybrid materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011 358, pp. 261-267.
- [11] Veli S. and Alyuz B. Adsorption of copper and zinc from aqueous solutions by using natural clay. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149, pp. 226-233.