



## จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับอะทราซีนโดยไบโอชาร์ไม้ไผ่

อนัญญา จิระโร และ สุธาทิพย์ สิ้นยัง\*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติพงษ์ คุณจรรย์กุล

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 1962 4414 อีเมล: ssuthatip@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.009

รับเมื่อ 4 มกราคม 2565 แก้ไขเมื่อ 8 มีนาคม 2565 ตอปรับเมื่อ 22 มีนาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 20 ธันวาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดูดซับอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ที่สังเคราะห์จากไม้ไผ่ โดยศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไบโอชาร์ไม้ไผ่ และศึกษาระยะเวลาสมดุล ประสิทธิภาพการดูดซับ ไอโซเทอม รวมทั้งแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับอะทราซีนของไบโอชาร์ไม้ไผ่ ด้วยการทดลองแบบกะ จากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่าไบโอชาร์ไม้ไผ่มีค่า  $D_{50}$  เท่ากับ 200 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวเท่ากับ 756.43 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.32 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าเป็นวัสดุดูดซับแบบ Micropore เนื่องจากมีขนาดรูพรุนภายในเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 นาโนเมตร นอกจากนี้พบว่ามีกรดคาร์บอกซิลิก (O-H) ไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล (C-H) อะลิฟาติก (C-H) และอะโรมาติก (C=C) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารอะทราซีน ในส่วนการประเมินประสิทธิภาพในการดูดซับสารอะทราซีนพบว่า ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ 92.1 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลที่ 24 ชั่วโมง สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช โดยมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ( $K_f$ ) เท่ากับ 0.77 ไมโครกรัมต่อกรัม และการศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับชี้ให้เห็นว่าเป็นไปตามแบบจำลองอันดับที่สองเทียม ด้วยค่า  $R^2$  และ SSE เท่ากับ 0.9998 และ 0.0015 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสอง ( $K_2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.1306 ไมโครกรัมต่อกรัมต่ออนาที จึงสรุปได้ว่าการดูดซับอะทราซีนโดยไบโอชาร์ไม้ไผ่ทั้งทางกายภาพและเคมี ผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าไบโอชาร์ไม้ไผ่มีคุณภาพสูงในการเป็นวัสดุดูดซับสารอะทราซีน ซึ่งจัดเป็นวัสดุดูดซับที่มีต้นทุนต่ำสำหรับป้องกันสารเคมีทางการเกษตรออกสู่นอกพื้นที่และเข้ามาในพื้นที่

**คำสำคัญ:** ไบโอชาร์ไม้ไผ่ อะทราซีน จลนศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับ

การอ้างอิงบทความ: อนัญญา จิระโร, พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล, กิตติพงษ์ คุณจรรย์กุล และ สุธาทิพย์ สิ้นยัง, “จลนศาสตร์และไอโซเทอร์มการดูดซับอะทราซีนโดยไบโอชาร์ไม้ไผ่,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1-15, เลขที่บทความ 241-215723, ม.ค.-มี.ค. 2567.



## Kinetic and Isotherm Adsorption of Atrazine by Bamboo Biochar

Ananya Jeeraro and Suthatip Sinyoung\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand  
Puangrat kajitvichyanukul

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

Kittipong Kunchariyakun

School of Engineering and Technology Walailak University Nakhonsithammarat, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 06 1962 4414, E-mail: ssuthatip@eng.psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.009

Received 4 January 2022; Revised 8 March 2022; Accepted 22 March 2022; Published online: 20 December 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

This research aims to evaluate the adsorption efficiency of atrazine using biochar synthesized from bamboo. The study primarily focuses on these aspects: bamboo biochar physical and chemical properties, the equilibrium time, adsorption efficiency, isotherm as well as adsorption kinetic model with batch testing. Regarding physical and chemical properties, bamboo biochar exhibited the  $D_{50}$  of 200  $\mu\text{m}$ , surface area of 756.43  $\text{m}^2/\text{g}$ , average pore size of 1.69 nm and pore volume of 0.32  $\text{cm}^3/\text{g}$ . Considering these properties, the substance can be defined as a microporous carbon adsorbent. Also, the functional groups of bamboo biochar show the groups of hydroxyls (O-H), alkyl (C-H), aliphatic (C-H), and aromatic carbon (C=C), which have a positive effect on adsorption of atrazine. From the evaluation of atrazine adsorption properties, the bamboo biochar has the adsorption efficiency of 92.1% after 24 h equilibrium time, corresponding to the Freundlich adsorption isotherm. The Freundlich constant ( $K_f$ ) is 0.77  $\mu\text{g}/\text{g}$ . In term of adsorption kinetic model, the results indicated being the pseudo second order reaction kinetics with  $R^2$  value and SSE are 0.9998 and 0.0015, respectively. The pseudo-second order rate constant ( $K_2$ ) shows 0.1306  $\mu\text{g}/\text{g}\cdot\text{min}$ . This can be concluded that the adsorption of bamboo biochar used both physical and chemical mechanisms. Overall results indicated that bamboo biochar can be used as an effective, low-cost adsorbent for atrazine removal. Thus, the biochar can be used as a chemical barrier for controlling agrochemical contaminants into agricultural land.

**Keywords:** Bamboo Biochar, Atrazine, Adsorption Kinetic, Adsorption Isotherm

Please cite this article as: A. Jeeraro, P. kajitvichyanukul, K. Kunchariyakun, and S. Sinyoung, "Kinetic and isotherm adsorption of atrazine by bamboo biochar," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–15, ID. 241-215723, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

## 1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม เนื่องจากมีพืชเศรษฐกิจซึ่งก่อให้เกิดรายได้หลักสำคัญหลายประเภทที่ประเทศไทยส่งออกเป็นอันดับต้นของโลก ด้วยปัจจัยความต้องการด้านบริโภคทั้งในประเทศและส่งออกต่างประเทศที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นในช่วง 10-15 ปีที่ผ่านมา จึงเกิดแรงจูงใจให้เกษตรกรเปลี่ยนแปลงวิธีการเพาะปลูกเป็นแบบการใช้สารเคมีเติมรูปแบบเพิ่มขึ้น เพื่อควบคุมต้นทุนในการผลิต จากข้อมูลในเชิงสถิติของโลกพบว่า ประเทศไทยติด 5 อันดับแรกที่มีการใช้สารเคมีทางการเกษตรสูงสุด [1] และจากข้อมูลการนำเข้าวัตถุดิบทางการเกษตรของประเทศไทย ในช่วง พ.ศ. 2559-2563 พบว่า ใน พ.ศ. 2563 มีปริมาณการนำเข้าเพิ่มขึ้นจาก พ.ศ. 2562 และเมื่อพิจารณาถึงประเด็นของประเภทสารเคมีทางการเกษตรพบว่า 5 ลำดับแรก ที่มีปริมาณการนำเข้าสูงสุด ได้แก่ ไกลโฟสเฟท พาราควอต อะมิทริน 2, 4-ดี-โซเดียมซอลต์ และอะทราซีน ตามลำดับ [2] ซึ่งการใช้สารเคมีทางการเกษตรไม่ว่าจะเป็นสารกำจัดวัชพืชหรือกำจัดศัตรูพืชพบว่า มีเพียงร้อยละ 0.1 เท่านั้นที่จะสามารถกำจัดวัชพืชหรือกำจัดศัตรูพืชเป้าหมาย แต่อีกร้อยละ 99.9 ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม [3] โดยได้มีนักวิจัยทั้งในไทยและต่างประเทศ ได้ทำการศึกษาประเภทของสารเคมีทางการเกษตรที่ปนเปื้อนในแหล่งสิ่งแวดล้อม ตรวจพบพาราควอต ปนเปื้อนในดินของพื้นที่หลายจังหวัดของอินโดนีเซีย ซึ่งพบความเข้มข้นสูงสุด คือ 14.44 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [4] นอกจากนั้นจังหวัดทางตอนเหนือของเวียดนามในช่วงฤดูแล้ง และฤดูฝนตรวจพบพาราควอตตกค้างเกือบทุกตัวอย่าง โดยความเข้มข้นเฉลี่ย และสูงสุด เท่ากับ 30.69 และ 134.08 กรัมต่อลิตร [5] ในส่วนของประเทศไทยมีการตรวจพบสารพาราควอต บริเวณแม่น้ำลำน้ำ จังหวัดลำพูน ที่ความเข้มข้น 2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร [6] ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดไว้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งมีการตรวจพบการปนเปื้อนของสารไกลโฟสเฟทในหนองน้ำแม่ทา จังหวัดลำพูน ที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัม/ลิตร [6] โดยต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 4.8 มิลลิกรัม/ลิตร และได้มีการตรวจพบสารอะทราซีนตกค้างในแหล่งน้ำของ

จังหวัดน่าน ในช่วงความเข้มข้น 1.41-62.01 ไมโครกรัมต่อลิตร [7] ซึ่งปริมาณที่พบถือว่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นสูงสุดของอะทราซีนที่กำหนดโดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (US.EPA) และองค์การอนามัยโลก (WHO) ที่ยอมให้มีในน้ำดื่มไม่เกิน 3 ไมโครกรัมต่อลิตร และไม่เกิน 2 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สารเคมีทางการเกษตรมีการตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม ทั้งในดิน และแหล่งน้ำ ซึ่งความเข้มข้นที่ตรวจพบสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก ประกอบด้วยอะทราซีน มีความคงทนในดินสูง มีค่าครึ่งชีวิตเฉลี่ย 6-12 เดือน ทำให้เกิดการตกค้างในสิ่งแวดล้อม ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นพบว่า หากได้รับในปริมาณมาก หรือความเข้มข้นสูงจะเกิดการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย และกล้ามเนื้ออ่อนแรง ไอระเหยของอะทราซีนทำให้เกิดการระคายเคืองตา ผิวหนัง ระบบหายใจ และอาจก่อให้เกิดมะเร็งได้เมื่อได้รับเป็นระยะเวลานาน [8] ดังนั้นเมื่อเกิดการสะสมของอะทราซีนในสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณพื้นที่นั้นๆ รวมไปถึงสุขภาพของผู้ที่ใช้น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติในการอุปโภคและบริโภค [3]

จากปัญหาดังกล่าว ส่งผลต่อการศึกษาวิธีการบำบัดและกำจัดสารเคมีทางการเกษตรที่ปนเปื้อนหรือตกค้างในสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีต่างๆ เช่น การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical Treatment) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) และกระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลาย (Biodegradation) โดยกระบวนการดังกล่าวได้มีปัจจัยของปริมาณสารเคมี ค่าใช้จ่าย รวมถึงต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญการเป็นพิเศษ ดังนั้นการใช้กระบวนการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีด้วยเทคโนโลยีการดูดซับ นับว่าเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ใช้เงินลงทุนน้อย และยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อน โดยพบว่าในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำไบโอซอร์ มาใช้เป็นวัสดุดูดซับสารปนเปื้อนทั้งในดิน และในแหล่งน้ำ เช่น โลหะหนัก สี และกลิ่นของน้ำเสีย [9] และสารเคมีตกค้างอื่นๆ เนื่องจากไบโอซอร์มีพื้นที่ผิว รูพรุน ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักของวัสดุดูดซับ อีกทั้งยังคงมีประจุ และหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิว ที่มีคุณสมบัติใน



การดูดซับสารเคมีทางการเกษตร [10] และเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพที่ดีในการดูดซับ [11], [12]

จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาวัสดุดูดซับ โดยการนำฟางข้าว [13] เศษไม้สน [14] ถั่วเหลือง ซึ่งข้าวโพด มุลสัตว์ [15] เป็นต้น ศึกษาลักษณะการดูดซับสารอะทราซีน ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งไปที่การสังเคราะห์ไบโอชาร์จากไม้ไผ่ เนื่องจากไม้ไผ่เป็นของเสียจากการผลิตเฟอร์นิเจอร์ที่ต้องการหาแนวทางการเพิ่มมูลค่า และเป็นพืชที่ปลูกง่ายโตไว เริ่มให้ผลผลิตได้ในช่วงปีที่ 3-4 และสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตตลอดทั้งปี [16] ดังนั้น ไบโอชาร์จากไม้ไผ่จึงเป็นวัสดุดูดซับทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำ และมีความน่าสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับสารเคมีทางการเกษตร ประกอบกับขั้นตอนในการสังเคราะห์ไม่ยุ่งยาก ประชาชนสามารถสังเคราะห์และนำไปใช้ได้เอง โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ มักมีการกระตุ้นไบโอชาร์ด้วยกรด เพื่อเพิ่มพื้นที่ขนาดรูพรุน [17] ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของการดูดซับ แต่ไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ผ่านการปรับสภาพ หรือกระบวนการล้างกรดใดๆ เนื่องจากได้คำนึงถึงกรณีนำไปใช้งานจริง เพื่อลดการปนเปื้อนหรือตกค้างของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีเป้าหมายในการศึกษาการใช้ไบโอชาร์ในการบำบัดสารเคมีทางการเกษตร โดยนำไม้ไผ่มาสังเคราะห์ไบโอชาร์ และทำการประเมินคุณสมบัติของไบโอชาร์ไม้ไผ่ ตลอดจนศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสารอะทราซีน ซึ่งเป็นสารเคมีทางการเกษตรที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับพาราควอต และไกลโฟเสท ซึ่งมีแนวโน้มในการใช้มากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้พาราควอตและไกลโฟเสทในปัจจุบัน เพื่อลดปัญหาการปนเปื้อนในแหล่งน้ำของพื้นที่เพาะปลูกและแหล่งน้ำสาธารณะ ตลอดจนการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อมในอนาคต

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การเตรียมไบโอชาร์

ไบโอชาร์จากไม้ไผ่ ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้าง

ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และทำการย่อยขนาดไบโอชาร์เบื้องต้นให้อยู่ในช่วง 5-15 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องบด Crushing machine (GM/EP-100x60X, Guangming China) จากนั้นบดละเอียดด้วยเครื่อง Hammer mill machine (GM/PC400x 200A, Guangming, China) ให้มีขนาดเล็กกว่า 6 มิลลิเมตร และนำตัวอย่างที่ได้ร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานระหว่างเบอร์ 60-120 เพื่อควบคุมขนาดในช่วง 125-250 ไมโครเมตร [18]

ตัวอย่างหลังจากการบดได้ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer, PSD (CILAS 1190, CILAS, France) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope, SEM (Merlin compact, Carl Zeiss, USA) ที่ EHT 5.00 กิโลวัตต์ WD 9.8 และ 9.6 มิลลิเมตร กำลังขยาย 1,000 และ 1,500 เท่า ตามลำดับ วิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity analyzer, BET (ASAP2460, Micromeritics; USA) โดยใช้  $N_2$  ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 77.3 เคลวิน ในช่วงระยะเวลา 5 วินาที ที่ความดัน 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนผิวไบโอชาร์ ในช่วงความยาวคลื่น 400-4000 ซม.<sup>-1</sup> ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR (Tensor27, Bruker, Germany) วิเคราะห์ค่าประจุบนพื้นผิวไบโอชาร์ด้วยวิธี pH-drift Method [19] และปริมาณของธาตุด้วยเครื่อง Organic Elemental Analyzer, CHNS/O (Flash 2000, Thermo Scientific, USA) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีก่อนนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ

### 2.2 การเตรียมสารละลายอะทราซีน

การทดลองนี้ใช้สารอะทราซีนเกรดการค้า (อะทราซีน 90) ตราหมาแดง ของบริษัท ป.เคมีเทค จำกัด ประเทศไทย ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 90 มีคุณสมบัติในการยับยั้งการสังเคราะห์แสงของพืช มักใช้ควบคุมทั้งแบบก่อนปลูกพืชหลัก และหลังจากวัชพืชออก [20] โดยทำการเตรียมสารละลาย

อะทราซีนเข้มข้น (Stock Solution) ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร โดยชั่งสารอะทราซีน (อะทราซีน 90) เท่ากับ 111.11 มิลลิกรัม นำมาละลายในสารอะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile) 1,000 มิลลิลิตร และเก็บสารละลายอะทราซีนเข้มข้น (Stock Solution) ที่เตรียมไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยก่อนนำสารละลายอะทราซีนมาใช้ ต้องทำการโชนิเคตด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (P500D, Crest, USA) ภายใต้อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 30 นาที ก่อนทุกครั้ง เพื่อป้องกันการตกตะกอนกลับของสารอะทราซีน

## 2.3 การศึกษาการดูดซับแบบกะ

การศึกษาการดูดซับแบบกะ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ความสามารถในการดูดซับด้วยสมการไอโซเทอร์ม และแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ โดยรายละเอียดแต่ละการทดลองมีดังนี้

### 2.3.1 ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

การทดลองระยะเวลาเข้าสู่สมดุล ทำการทดลองที่ระยะเวลา 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24, 36, 48 และ 60 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของสารละลายอะทราซีน 1 และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณไบโอชาร์ 0.4 กรัม บรรจุลงในหลอดทดลองขนาด 40 มิลลิลิตร ต่อปริมาตรอะทราซีน 25 มิลลิลิตร ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง ขนาดช่องเปิด 0.45 ไมโครเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารอะทราซีนด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography, HPLC (Agilent 1260, Agilent, USA) โดยใช้คอลัมน์ Zorbax Eclipse XPB-C8 และใช้สารอะซิโตนไนไตรท์ (Acetonitrile ชนิด HPLC grade) และน้ำดีไอออน (DI Water) ในอัตราส่วน 60 : 40 ใช้ UV-Vis Detector ชนิด VWD Detector ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และกำหนดอัตราการไหลที่ 1 ไมโครลิตรต่อนาที จากนั้นนำผลการทดลองมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร) ( $C/C_0$ ) กับระยะเวลา

### 2.3.2 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการเตรียมสารละลายอะทราซีน ที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณไบโอชาร์ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 กรัม โดยนำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับ 2 ชนิด ได้แก่ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)

โดยสมการที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (1)

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

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_m$  คือ ปริมาณของสารละลายที่ถูกดูดซับสูงสุดแบบขั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K_L$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยมี  $\frac{1}{C_e}$  เป็นแกนนอน และมี  $\frac{1}{q_e}$  เป็นแกนตั้ง

และสมการที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช แสดงดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ  $K_F$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยมี  $\log C_e$  เป็นแกนนอน และมี  $\log q_e$  เป็นแกนตั้ง

จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) และ (2) เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับ

### 2.3.3 การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ

ในการทดลองส่วนนี้ได้เตรียมสารละลายอะทราซีนที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเลือกปริมาณไบโอชาร์มาจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับที่ 0.4, 0.8 และ 1.4 กรัม นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ภายใต้อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองที่ระยะเวลา 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง และนำผลการศึกษาที่ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First Order) และแบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo Second Order)

โดยแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม แสดงดังสมการที่ (3)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (3)$$

เมื่อ  $q_t$  คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกกรัม)

$K_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที)

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยมีระยะเวลา (Time) เป็นแกนนอน และมี  $\ln(q_e - q_t)$  เป็นแกนตั้ง

และแบบจำลองอันดับสองเทียม แสดงดังสมการที่ (4)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

เมื่อ  $K_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (ต่อนาที)

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์โดยมีเวลา (Time) เป็นแกนนอน และมี  $\frac{t}{q_t}$  เป็นแกนตั้ง

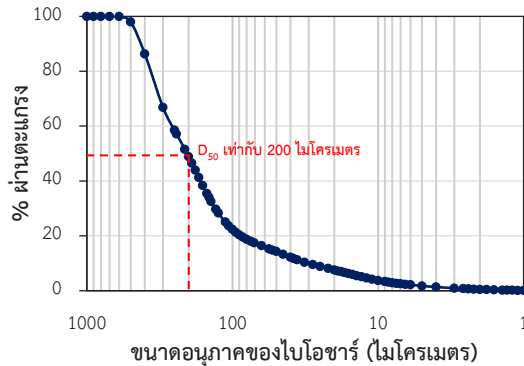
จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) และ (4) เพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์การดูดซับ

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของไบโอชาร์ไม้ไผ่

#### 3.1.1 การกระจายตัวของอนุภาค

การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคไบโอชาร์ไม้ไผ่ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Distribution Analyzer;



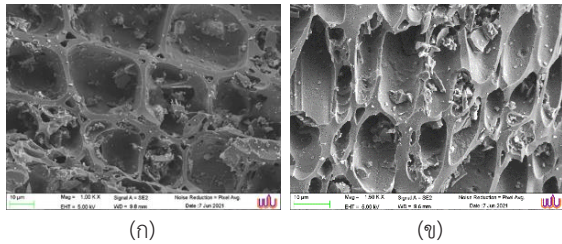
รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคไบโอชาร์ไม้ไผ่

PSD แสดงในรูป 1 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของไบโอชาร์ (แกนนอน) และร้อยละของขนาดไบโอชาร์ (แกนตั้ง) พบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไบโอชาร์ หรือ  $D_{50}$  มีค่าเท่ากับ 200 ไมโครเมตร ซึ่งค่าดังกล่าวสอดคล้องกันกับงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์และบดตัวอย่างไบโอชาร์ไม้ไผ่ให้อยู่ในช่วงขนาด 125–250 ไมโครเมตร

#### 3.1.2 ผลการศึกษาลักษณะรูพรุนภายนอกและพื้นผิวภายนอกของไบโอชาร์ไม้ไผ่

การศึกษาลักษณะรูพรุนภายนอกและพื้นผิวภายนอกของไบโอชาร์ไม้ไผ่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หรือ SEM แสดงในรูปที่ 2 โดยพบว่า บริเวณพื้นผิวภายนอกของไบโอชาร์มีรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดเล็กปะปนอยู่โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 10–20 ไมโครเมตร การกระจายตัวของรูพรุนค่อนข้างจะจัดกระจายไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยกรด เพื่อลดผลกระทบต่อต้านทุนในการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ในงานจริง โดยรูปที่ 2 (ก) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงถึงพื้นผิวด้านหน้าซึ่งปรากฏขนาดรูพรุนที่ชัดเจน ส่วนรูปที่ 2 (ข) แสดงพื้นผิวด้านข้าง จะปรากฏลักษณะของรูพรุนขนาดเล็กภายใน และมีเศษของไบโอชาร์ขนาดเล็กปะปนในช่องว่างของรูพรุนขนาดใหญ่ จากผลการศึกษาที่มีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tasim และคณะ [21] ที่ทำการสังเคราะห์ไบโอชาร์จากซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิ 300–500 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่าน



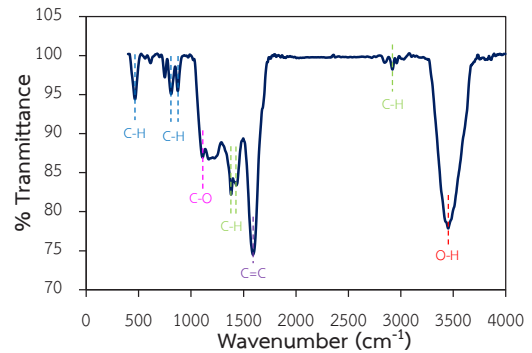


รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่กำลังขยาย (ก) 1,000 เท่า และ (ข) 1,500 เท่า

การล้างกรดและพบว่าไบโอชาร์ที่ไม่ผ่านกระบวนการล้างกรดมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 15–20 ไมโครเมตร และมีการปะปนของอนุภาคอื่นเช่นกัน

### 3.1.3 ผลการศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนภายในและปริมาตรรูพรุน

การศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุน ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer; BET พบว่าไบโอชาร์ไม้ไผ่ก่อนทำการบดเพื่อควบคุมขนาดอนุภาค มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 52.08 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 19.87 อังสตรอม หรือ 1.99 นาโนเมตร และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.03 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม จากนั้นหลังจากทำการบด และคัดขนาดโดยการร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานให้มีขนาดอยู่ในช่วง 125–250 ไมโครเมตร พบว่า ไบโอชาร์ที่ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 756.43 ตารางเมตรต่อกรัม มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 16.86 อังสตรอม หรือ 1.69 นาโนเมตร และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.32 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม โดยพื้นที่ผิวของไบโอชาร์หลังทำการบดและควบคุมขนาดมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhu และคณะ [22] ที่ทำการศึกษาไบโอชาร์จากซีลี้อยู่ ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยพบว่า มีพื้นที่ผิว 586 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดรูพรุนตามมาตรฐานของระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) หรือสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศพบว่า ไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ระบุได้ว่าเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) เนื่องจากมีขนาดรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร [23] โดย



รูปที่ 3 ตำแหน่งและหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบบนผิวไบโอชาร์ไม้ไผ่

คาดว่าส่งผลดีในเรื่องประสิทธิภาพในการดูดซับ [24]

### 3.1.4 ปริมาณของธาตุ และหมู่ฟังก์ชันบนผิว

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคณสมบัติทางเคมีของไบโอชาร์ไม้ไผ่ โดยศึกษาปริมาณธาตุด้วยเครื่อง Organic Elemental Analyzer และหมู่ฟังก์ชันบนผิวไบโอชาร์ไม้ไผ่ด้วยเทคนิค FT-IR จากการศึกษาปริมาณธาตุที่เกิดขึ้นของไบโอชาร์ไม้ไผ่ พบธาตุคาร์บอนร้อยละ  $75.093 \pm 0.261$  ไฮโดรเจนร้อยละ  $1.820 \pm 0.021$  และไนโตรเจนร้อยละ  $0.662 \pm 0.018$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chen และคณะ [25] ที่ทำการศึกษาคณสมบัติของไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

ในกรณีของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพบว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์มีส่วนสำคัญมากในการดูดซับ [26] โดยปริมาณของธาตุออกซิเจน และไฮโดรเจนบนพื้นผิวล้วนมีผลต่อคุณสมบัติการดูดซับของไบโอชาร์ เนื่องจากเกิดการรวมยึดกันไว้ของอะตอมกับธาตุคาร์บอนทำให้เกิดเป็นพันธะเคมีของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว [27] โดยพบว่า ปริมาณธาตุที่พบมากที่สุดบนพื้นผิว ได้แก่ คาร์บอน รองลงมาเป็นออกซิเจน ซึ่งการเกิดหมู่ฟังก์ชันบนผิวไบโอชาร์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ [28] โดยผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของไบโอชาร์ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3 และผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันแสดงดังตารางที่ 1 โดยทำการตรวจพบหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ฟังก์ชันไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล (C-H) หมู่ฟังก์ชัน

ไฮโดรคาร์บอนคาร์บอนิล (C=O) หมู่ฟังก์ชันอะโรมาติก (C=C) หมู่ฟังก์ชันไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์ (C-O) และหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติก (C-H) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chowdhury และคณะ [29] ที่ได้ทำการศึกษาไปโอซาร์จากซีเลียมไม้ทุเรียน ซึ่งตรวจพบหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) หมู่ฟังก์ชันไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล (C-H) หมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติก (C-H) และหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติก (C=C) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ควรตรวจพบในไปโอซาร์ จากผลการศึกษาในส่วนนี้พบว่า ปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ อาจจะมีผลจากไปโอซาร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ทำให้ยังคงเหลือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวที่เป็นตัวบ่งบอกถึงกลไกหลักของการดูดซับ

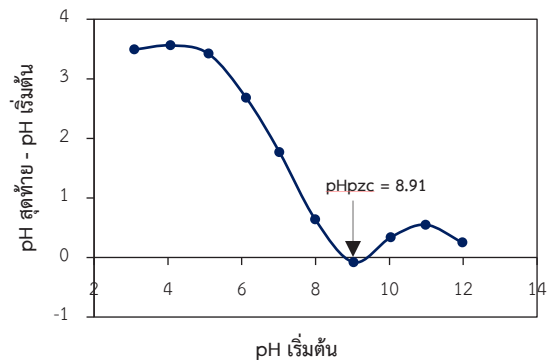
**ตารางที่ 1** ช่วงเลขคลื่นที่เกิดหมู่ฟังก์ชัน ชนิดของพันธะ และชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่ตรวจพบบนพื้นผิวของไปโอซาร์ไม้ทุเรียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน	ตำแหน่งเลขคลื่นที่พบ (cm <sup>-1</sup> )
3650-3000	O-H	ไฮดรอกซิล*	3453
2950-2970	C-H	ไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล	2920
1780-1520	C=O	ไฮโดรคาร์บอนคาร์บอนิล	1591
1520-1300	C=C	อะโรมาติก*	1381, 1433
1350-1330	C-H	ไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล	1305, 1382
1200-1130	C-O	ไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์	1109
940-400	C-H	อะลิฟาติก	873, 810, 750, 465

**หมายเหตุ:** \*บอกลิงก์การดูดซับบนพื้นผิว ซึ่งเป็นกลไกหลักของการดูดซับ [30]

### 3.1.5 ค่าประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์

การศึกษาค่าประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ (pHpzc) ของไปโอซาร์ไม้ทุเรียน แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า ไปโอซาร์ไม้ทุเรียนมีค่าประจุ

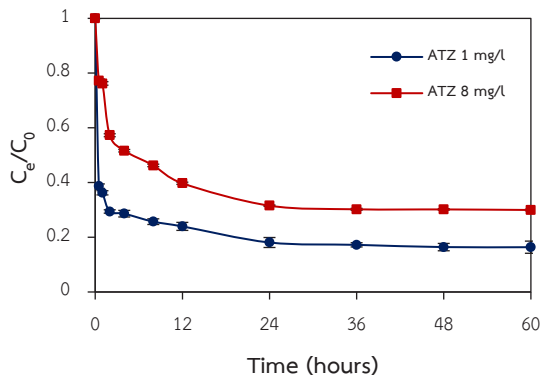


**รูปที่ 4** ประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ของไปโอซาร์ไม้ทุเรียน

บนพื้นผิวเท่ากับ 8.91 ดังนั้นเมื่อค่า pH มีค่าสูงกว่า pHpzc แสดงว่าประจุบนพื้นผิวของไปโอซาร์ไม้ทุเรียนเป็นประจุลบ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของไปโอซาร์ไม้ทุเรียนในการศึกษาครั้งนี้ทั้งในประเด็นของลักษณะทางกายภาพและเคมี พบว่าลักษณะพื้นผิวภายนอกที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงขนาดอนุภาครูพรุนภายนอก (External Pore) ของไปโอซาร์ พบรูพรุนจำนวนมาก กระจายอยู่เต็มพื้นที่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนในช่วง 10-20 ไมโครเมตร ซึ่งตามมาตรฐานของระบบ IUPAC จัดว่าเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) และจากผลการศึกษาขนาดรูพรุนภายใน (Internal pore) ด้วยเครื่อง Surface Area and Porosity Analyzer พบว่ารูพรุนภายในมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 นาโนเมตร จัดว่าเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) และมีพื้นที่ผิวในปริมาณมาก จะส่งผลต่อกลไกการดูดซับสารอะโรมาติกในช่องว่างทั้งสองแบบ และมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอะโรมาติก นอกจากคุณสมบัติทางกายภาพของไปโอซาร์ไม้ทุเรียนพบว่า ในส่วนของคุณสมบัติทางเคมี ได้มีการตรวจพบหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (O-H) และหมู่ฟังก์ชันอะโรมาติก (C=C) ที่มีคุณสมบัติในการดูดซับ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไปโอซาร์ไม้ทุเรียนมีศักยภาพในการนำมาเป็นวัสดุดูดซับ อย่างไรก็ตาม มีความจำเป็นที่ต้องศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับกรณีที่ต้องการบำบัดสารเคมีทางการเกษตรโดยเฉพาะสารอะโรมาติกที่เป็นเป้าหมายของงานวิจัยนี้ โดยผลการศึกษา





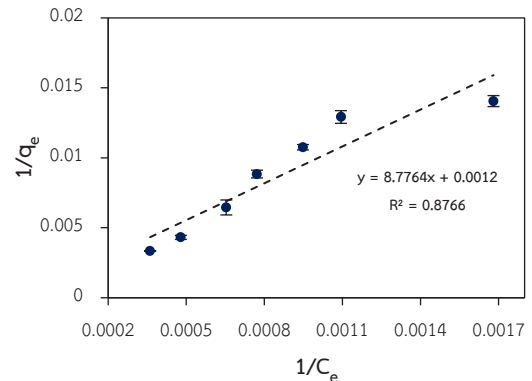
รูปที่ 5 ระยะเวลาสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายอะทราซีน โดยใช้ไบโอชาร์ไม้ไผ่เป็นวัสดุดูดซับ

ประสิทธิภาพไบโอชาร์ไม้ไผ่ต่อการดูดซับสารละลายอะทราซีน โดยผลการศึกษาแสดงดังนี้

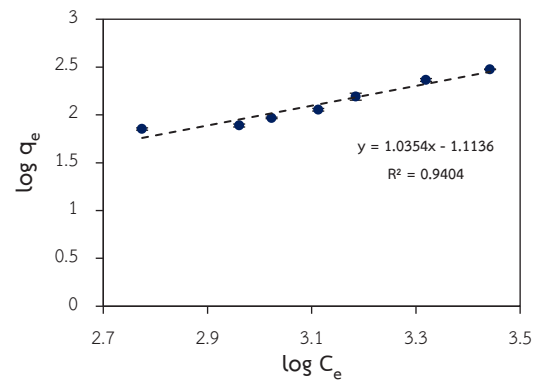
### 3.2 ผลการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลโดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลายอะทราซีน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 5

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย ( $C_e/C_0$ ) กับระยะเวลา พบว่า ในช่วงระยะเวลา 12 ชั่วโมงแรกการดูดซับดีมาก เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอชาร์ไม้ไผ่ ได้แก่ พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน หมู่ฟังก์ชัน และประจุบนพื้นผิวของไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่เหมาะสมแก่การดูดซับสารอะทราซีน และหลังจากระยะเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงตามลำดับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของไบโอชาร์ถูกใช้ในการดูดซับไปแล้ว ส่งผลให้เหลือพื้นที่ในการดูดซับสารอะทราซีนน้อยลง และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mandal และคณะ [31] Llado และคณะ [32] ที่ทำการศึกษาการดูดซับสารอะทราซีนในน้ำด้วยไบโอชาร์ โดยพบว่าระยะเวลาเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 24 และ 25 ชั่วโมง ดังนั้นในการศึกษาไอโซเทอร์มในการ



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับ (ก) แบบแลงเมียร์ และ (ข) แบบฟรุนดลิช

ดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับ จะเลือกใช้ระยะเวลาสัมพันธ์ที่ 24 ชั่วโมง ในการศึกษา

### 3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

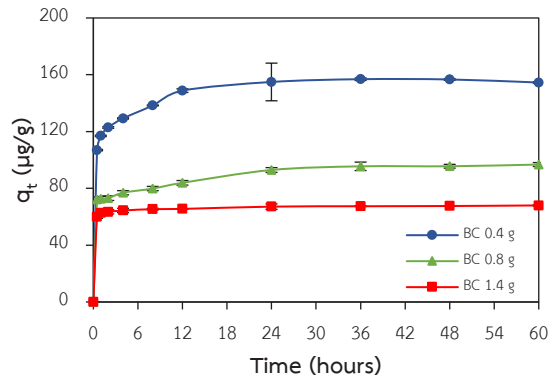
การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับอะทราซีน มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของการดูดซับ และประสิทธิภาพในการดูดซับ เพื่อใช้ในการอธิบายลักษณะของการดูดซับอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงข้อมูลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยเปรียบเทียบค่า  $R^2$  ทั้ง 2 ไอโซเทอร์ม หากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบใดมีค่า  $R^2$

มากกว่า แสดงว่าการดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอร์มชนิดนั้น และเหมาะที่จะนำไอโซเทอร์มชนิดนั้นมาอธิบายลักษณะการดูดซับ ซึ่งผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแสดงดังรูปที่ 6 และนำค่าที่ได้จากกราฟไปหาค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช สามารถแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ไม้ไผ่

พารามิเตอร์	อะทราซีน
<b>ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)</b>	
$q_{max}$ ( $\mu\text{g/g}$ )	833.33
$K_L$ ( $\text{L}/\mu\text{g}$ )	$1.37 \times 10^{-4}$
$R^2$	0.8766
<b>ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich Isotherm)</b>	
$K_F$ ( $\mu\text{g/g}$ )	0.77
$1/n$ ( $\mu\text{g/L}$ )	1.04
$R^2$	0.9404

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของทั้งสองไอโซเทอร์มพบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9404 ในขณะที่ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.8766 โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาที่ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.90 แสดงให้เห็นว่าค่า  $R^2$  ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิชมีค่าสูงกว่า จึงได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่เกิดจากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช โดยค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ ( $K_F$ ) เท่ากับ 0.77 ไมโครกรัมต่อกรัม ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการสมการมีค่าเท่ากับ 1.04 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของไบโอชาร์มีปริมาณที่มากพอ ทำให้สามารถดูดซับสารละลายอะทราซีนได้ดี และลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) สืบเนื่องจากปริมาณฟรุนดิชที่เกิดขึ้นทั้งภายในภายนอก และกลไกการดูดซับทางเคมีอันเกิดจากประจุและหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้น



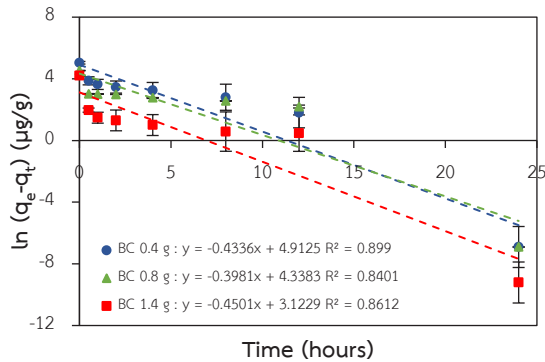
**รูปที่ 7** ความสามารถในการดูดซับ และระยะเวลาสัมพัทธ์

บนพื้นผิวของไบโอชาร์ โดยสอดคล้องกับการอธิบายไว้ของ Mandal และคณะ [31] ที่ได้ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับอะทราซีนด้วยไบโอชาร์จากเปลือกต้นยูคาลิปตัส ชิงช้าโพศ ไม้ไผ่ และแกลบ

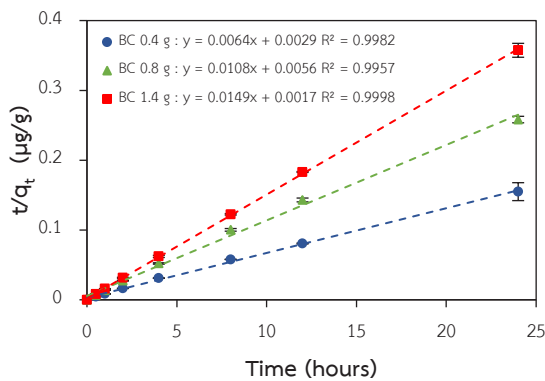
### 3.4 การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับอะทราซีน มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับตามแบบจำลองปฏิกิริยาทางเคมีของการดูดซับระหว่างอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ โดยจลนศาสตร์การดูดซับอธิบายลักษณะของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลหรือการแพร่ของสารตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อเป็นการเพิ่มข้อมูลในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางจลนศาสตร์ จึงได้ทำการศึกษาที่ปริมาณไบโอชาร์ 3 ค่า ได้แก่ 0.4, 0.8 และ 1.4 กรัม โดยความสามารถในการดูดซับ และแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับแสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ และระยะเวลาสัมพัทธ์ ในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของวัสดุดูดซับ ( $q_t$ ) กับระยะเวลาสัมพัทธ์พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเมื่อระยะเวลาผ่านไปการดูดซับของไบโอชาร์จะเพิ่มขึ้นลดลงจนเริ่มคงที่ และเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดลองแสดงความสัมพันธ์ในแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ (รูปที่ 8) และพิจารณาค่าความ



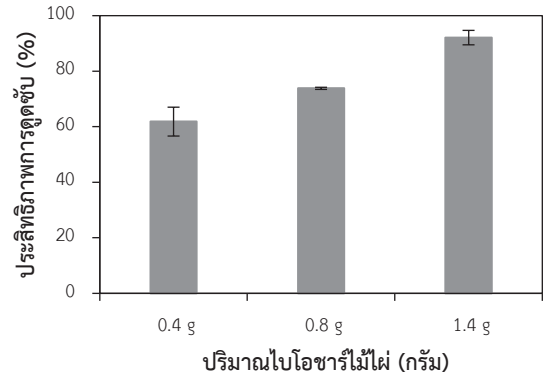
(ก)



(ข)

รูปที่ 8 จลนศาสตร์การดูดซับ (ก) แบบอันดับหนึ่งเทียม และ (ข) แบบอันดับสองเทียม

สัมพันธของสมการถดถอยเชิงเส้น หรือ  $R^2$  ระหว่างปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พบว่าปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่า  $R^2$  มากกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ประกอบกับผลการประเมินค่าความคลาดเคลื่อน (Sum of Squared Error; SSE) ซึ่งถูกนำมาใช้พิจารณา รวม หากมีค่า SSE ต่ำ แสดงว่าชุดข้อมูลนั้นมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลต่ำ และมีความน่าเชื่อถือสูง ดังนั้นจากการคำนวณพบว่า ค่า SSE ของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าต่ำกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ในทุกปริมาณ มีความสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม อีกทั้งเมื่อพิจารณา



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพของไบโอชาร์ไม้ไผ่ ในการดูดซับสารละลายอะทราซีน

ค่า  $q_e$  (exp) ที่ได้จากการทดลองพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $q_e$  (cal) ที่ได้จากการคำนวณปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม โดยค่าคงที่จากการวิเคราะห์ลักษณะจลนศาสตร์การดูดซับสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ไม้ไผ่ทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3 โดยอธิบายได้ว่าที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่ระยะเวลาคงตัว การดูดซับสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ไม้ไผ่เป็นการดูดซับแบบกายภาพเคมี (Phisicochemical) โดยเป็นการทำงานร่วมกันของสองกลไก ได้แก่ กลไกการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นผิว และขนาดรูพรุนภายในภายนอกที่มีความเหมาะสมในการดูดซับ และกลไกการดูดซับทางเคมี ได้แก่ องค์กรประกอบของธาตุบนพื้นผิว และหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องในการดูดซับ

ในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ ได้เลือกปริมาณไบโอชาร์มาจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับที่ 0.4, 0.8 และ 1.4 กรัม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับเมื่อมีปริมาณของตัวดูดซับต่างกันพบว่า ที่ปริมาณไบโอชาร์ 0.4, 0.8 และ 1.4 กรัม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 61.84, 73.83 และ 92.10 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 9 โดยการทดลองในส่วนนี้ภายใต้ความเข้มข้นและเงื่อนไขที่กำหนดพบว่า ปริมาณไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย



**ตารางที่ 3** ค่าคงที่จากการวิเคราะห์หลักขมมะจนาศาสตร์การดูดซับสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ไม้ไผ่

พารามิเตอร์	ไบโอชาร์ 0.4 กรัม	ไบโอชาร์ 0.8 กรัม	ไบโอชาร์ 1.4 กรัม
% Removal	61.8447	73.8295	92.0987
$q_e$ (exp) ( $\mu\text{g/g}$ )	154.9379	92.9582	67.1534
<b>อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo First Order)</b>			
$q_e$ (cal) ( $\mu\text{g/g}$ )	135.9789	76.5772	22.7121
$K_1$ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{min}$ )	0.4336	0.3981	0.4501
$R^2$	0.8990	0.8401	0.8612
SSE (%)	359.4437	268.3372	1975.0291
<b>อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo Second Order)</b>			
$q_e$ (cal) ( $\mu\text{g/g}$ )	156.2500	92.5926	67.1141
$K_2$ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{min}$ )	0.01412	0.0282	0.1306
$R^2$	0.9982	0.9957	0.9998
SSE (%)	1.7216	0.1337	0.0015

#### 4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติของไบโอชาร์ไม้ไผ่พบว่า มีศักยภาพในการดูดซับเนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ โดยในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพพบว่า มีการกระจายตัวเฉลี่ยของอนุภาคไบโอชาร์ ( $D_{50}$ ) อยู่ในช่วง 200 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 756.43 ตารางเมตรต่อกรัม และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.32 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ในส่วนของขนาดรูพรุนภายนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 10–20 ไมโครเมตร ขนาดรูพรุนภายในเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 นาโนเมตร จัดเป็นวัสดุดูดซับแบบ Micropore ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการเป็นวัสดุดูดซับสารเคมีทางการเกษตรที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก นอกจากนั้นพบว่า มีคุณสมบัติทางเคมีในส่วนของหมู่ฟังก์ชันของไบโอชาร์ ที่ตรวจพบหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (O-H) ไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลคิล (C-H) อะลิฟาติก (C-H) และอะโรมาติก (C=C) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารอะทราซีน

ในส่วนของความสามารถในการดูดซับสารละลายอะทราซีนด้วยไบโอชาร์ไม้ไผ่พบว่า ระยะเวลาในการดูดซับ

เริ่มเข้าสู่สมดุลในช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับการดูดซับแบบฟรุนดิช อธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น เนื่องจากมีรูพรุนบนพื้นผิวจำนวนมาก การศึกษาขมมะจนาศาสตร์การดูดซับ โดยพิจารณาค่า  $R^2$  และ SSE พบว่า มีความสอดคล้องกับกับปฏิกิริยาอันดับที่สองเทียม เป็นกลไกการดูดซับแบบกายภาพเคมี ดังนั้นไบโอชาร์ไม้ไผ่ที่ไม่ต้องปรับสภาพจึงนับว่าเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอะทราซีน จึงเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับพื้นที่ทางการเกษตรและแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนต่อไป

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินโครงการจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม โดยหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม สัญญาเลขที่ B400660030 สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สัญญาเลขที่ วช. 04/07/2564 และสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิธานินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2564 และทุนศิษย์ก้นกุฏิจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2561

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pariona. (2019, November). Pesticide Using Countries 2017. [Online]. Available: <https://www.worldatlas.com/articles/top-pesticide-consuming-countries-of-the-world.html>
- [2] Department of Agriculture in Thailand. (2021, December). The Importation for a large amount to Hazardous substances. [Online]. (in Thai) Available: <http://thaisdi.gistda.or.th/ne/dataset/doa0008>
- [3] S. Ungsoongnem, "Environmental impact from pesticide utilization," *EAU Heritage Journal*

- Science and Technology*, vol 9, no 1, pp. 50–63, 2015 (in Thai).
- [4] A. N. Ardiwinata, E. S. Harsanti, A. Kurnia, E. Sulaeman, R. Fauriah, and D. M. W. Paputri, “Contamination of paraquat residues in soil and water from several provinces in Indonesia,” in *AIP Conference Proceedings*, 2019, pp. 040024.
- [5] N. Thi Hue, T. P. M. Nguyen, H. Nam, and N. H. Tung, “Paraquat in surface water of some streams in Mai Chau Province, the Northern Vietnam: Concentrations, profiles, and human risk assessments,” *Journal of Chemistry*, vol. 2018, no. 2, pp. 1–18, 2018.
- [6] V. Patarasiriwong, *Knowledge development and management risks from organophosphate in the upper northern part of Thailand with participatory action research*, Lamphun and Lampang provinces, Bangkok: Infinity Media Publishing, 2017, pp. 96–99 (in Thai).
- [7] P. Kajitvichyanukul. (2020, April). Integrated Research for Empowerment of Local Authorities in the Management and Prevention of Poisonous Contamination in the Nan River Basin, Phase 2. [Online]. Available: [http://www.thai-explore.net/search\\_detail/result/3983](http://www.thai-explore.net/search_detail/result/3983)
- [8] T. Pornprom, *Herbicides: Principles and mode of action*. Bangkok: Kasetsart University press, 2011 (in Thai).
- [9] C. Nualsri, S. Dangwongjaroenporn, C. Sreela-or, T. Kassanuk, and K. Phasinam, “Effect of biochar from banana peel on the stability of methane production from food waste at different organic loading rates,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 770–780, 2021 (in Thai).
- [10] M. Inyang and E. Dickenson, “The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: a review,” *Chemosphere*, vol. 134, pp. 232–240, 2015.
- [11] P. Zhang, X. Zhang, Y. Li, and L. Han, “Influence of pyrolysis temperature on chemical speciation, leaching ability, and environmental risk of heavy metals in biochar derived from cow manure,” *Bioresource Technology*, vol. 302, 122850, 2020.
- [12] X. Zhu, B. Chen, L. Zhu, and B. Xing, “Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review,” *Environmental Pollution*, vol. 227, pp. 98–115, 2017.
- [13] X. Zhao, W. Ouyang, F. Hao, C. Lin, F. Wang, S. Han, and X. Geng, “Properties comparison of biochars from corn straw with different pretreatment and sorption behaviour of atrazine,” *Bioresource Technology*, vol. 147, pp. 338–344, 2013.
- [14] K. B. Delwiche, J. Lehmann, and M. T. Walter, “Atrazine leaching from biochar-amended soils,” *Chemosphere*, vol. 95, pp. 346–352, 2014.
- [15] N. Liu, A. B. Charrua, C. H. Weng, X. Yuan, and F. Ding, “Characterization of biochars derived from agriculture wastes and their adsorptive removal of atrazine from aqueous solution: A comparative study,” *Bioresource Technology*, vol. 198, pp. 55–62, 2015.
- [16] T. Phuangchik. (2019, November). “Bamboo” Energy Crop Great future. [Online]. Available: [https://www.technologychaoban.com/bullet-newstoday/article\\_97236](https://www.technologychaoban.com/bullet-newstoday/article_97236)



- [17] S. M. Taha, M. E. Amer, A. E. Elmarsafy, and M. Y. Elkady, "Adsorption of 15 different pesticides on untreated and phosphoric acid treated biochar and charcoal from water," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 2013–2025, 2014.
- [18] A. Dixit, S. Gupta, S. D. Pang, and H. W. Kua, "Waste Valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 238, 117876, 2019.
- [19] M. A. Martín-Lara, F. Hernáinz, M. Calero, G. Blázquez, and G. Tenorio, "Surface chemistry evaluation of some solid wastes from olive-oil industry used for lead removal from aqueous solutions," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 44, no. 2–3, pp. 151–159, 2009.
- [20] K. R. Solomon, D. B. Baker, R. P. Richards, K. R. Dixon, S. J. Klaine, T. W. La Point, and W. M. Williams, "Ecological risk assessment of atrazine in North American surface waters," *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 31–76, 1996.
- [21] B. Tasim, T. Masood, Z. A. Shah, M. Arif, A. Ullah, G. Miraj, and M. Samiullah, "Quality evaluation of biochar prepared from different agricultural residues," *Sarhad Journal of Agriculture*, vol. 35, no. 1, pp. 134–143, 2019.
- [22] X. Zhu, C. Li, J. Li, B. Xie, J. Lu, and Y. Li, "Thermal treatment of biochar in the air/nitrogen atmosphere for developed mesoporosity and enhanced adsorption to tetracycline," *Bioresource Technology*, vol. 263, pp. 475–482, 2018.
- [23] A. Swiatkowski, "Electrochemical studies of phenomena at active carbon-electrolyte solution interfaces," *Chemistry & Physics of Carbon*, vol. 27, pp. 125–225, 2000.
- [24] K. D. Hammond and W. C. Conner Jr., "Analysis of catalyst surface structure by physical sorption," *Advances in Catalysis*, vol. 56, pp. 1–101, 2013.
- [25] D. Chen, X. Yu, C. Song, X. Pang, J. Huang, and Y. Li, "Effect of pyrolysis temperature on the chemical oxidation stability of bamboo biochar," *Bioresource Technology*, vol. 218, pp. 1303–1306, 2016.
- [26] P. Temyarasilp, "Preparation and Characterization of Activated carbon from *Dendrocalamus asper* backer and *Dendrocalamus latiflorus*," M.S. thesis, Department of Chemistry, Faculty of Science Kasetsart University, 2008 (in Thai).
- [27] S. Sangpongchai, "Adsorption of Volatile organic compounds (VOCs) in indoor environment using Activated carbon produced from Coffee bean residue," M.S. thesis, Department of Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2011 (in Thai).
- [28] T. Vitidsant, *Activated carbon production and use*. Khon Kaen: Klungnana vitthaya press, 2011, pp. 129–130 (in Thai).
- [29] Z. Z. Chowdhury, M. Z. Karim, M. A. Ashraf, and K. Khalid, "Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood (*Durio zibethinus*) sawdust," *BioResources*, vol. 11, no. 2, pp. 3356–3372, 2016.
- [30] X. Cao, L. Ma, B. Gao, and W. Harris, "Dairy-manure derived biochar effectively sorbs





- lead and atrazine,” *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 9, pp. 3285–3291, 2009.
- [31] A. Mandal, N. Singh, and T. J. Purakayastha, “Characterization of pesticide sorption behaviour of slow pyrolysis biochars as lowcost adsorbent for atrazine and imidacloprid removal,” *Science of the Total Environment*, vol. 577, pp. 376–385, 2017.
- [32] J. Llado, C. Lao-Luque, B. Ruiz, E. Fuente, M. Solé-Sardans, and A. D. Dorado, “Role of activated carbon properties in atrazine and paracetamol adsorption equilibrium and kinetics,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 95, pp. 51–59, 2015.

