

จลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลต
โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหอย

KINETIC AND THERMODYNAMIC STUDIES ON THE ADSORPTION
OF CRYSTAL VIOLET USING MODIFIED ACTIVATED CARBON
FROM *DIALIUM COCHINCHINENSIS* SHELLS

ฟารีดา หะยียะ¹ และ เมมูน ซัตตาร์^{2*}

Fareeda Hayeeye¹, and Memoon Sattar^{2*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

²คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตยะลา

¹Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani Campus

²Faculty of Sports and Health Science, Thailand National Sports University, Yala Campus

*corresponding author e-mail: memoonsattar@gmail.com

(Received: 4 March 2025; Revised: 29 May 2025; Accepted: 1 June 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนถ่านกัมมันต์จากเปลือกลูกหอย (DS) ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งในชุมชนอำเภอยะรัง จังหวัดปัตตานี นำเปลือกลูกหอยมาผ่านกระบวนการเผาและกระตุ้นด้วยด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการดูดซับ และจากการศึกษาผลของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH (DSAC-KOH) และ H_3PO_4 (DSAC- H_3PO_4) พบว่า สมการการดูดซับสอดคล้องตามสมการของแลงเมียร์และจลนศาสตร์การดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตสูงสุด (q_m) 294.12 และ 416.67 มิลลิกรัมต่อกรัมบน DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 ที่ 30°C และ pH=5 ตามลำดับ อีกทั้งผลการศึกษาปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่า การดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อนและเกิดขึ้นได้เอง ผลการวิจัยนี้เป็นการนำวัสดุชีวมวลท้องถิ่นที่เป็นของเสียมาสร้างมูลค่าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำ และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: คริสตัลไวโอเลต การดูดซับ ถ่านกัมมันต์ เปลือกลูกหอย

Abstract

This research studies the kinetics and thermodynamics of crystal violet adsorption on the activated carbon of *Dialium cochinchinensis* shells; DS, a biomass waste material from the Yarang in Pattani province. The DS was carbonized and activated with potassium hydroxide (KOH) and phosphoric acid (H_3PO_4) to enhance its adsorption properties. The study also examined the adsorption of crystal violet on modified activated carbon (DSAC–KOH and DSAC– H_3PO_4), revealing that the adsorption behavior follows the Langmuir isotherm model and the pseudo–second–order kinetic model. The maximum adsorption capacities (q_m) for crystal violet were 294.12 and 416.67 mg g^{-1} on DSAC–KOH and DSAC– H_3PO_4 at 30°C and pH 5, respectively. From thermodynamic studies, the adsorption process was endothermic and spontaneous. This research demonstrates the potential of utilizing local agricultural waste as a low–cost and effective adsorbent for dye–contaminated wastewater treatment, contributing to environmental pollution reduction and promoting sustainable circular economy practices at the community level.

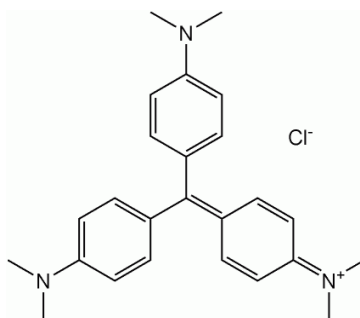
Keywords: Crystal Violet, Adsorption, Activated carbon, *Dialium cochinchinensis* shells

บทนำ

ลูกหยีเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดปัตตานี มีจำนวนมากในพื้นที่อำเภอยะรัง ทั้งนี้ชุมชนได้พัฒนาผลิตภัณฑ์จากลูกหยีจนเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่เป็นสินค้าโอท็อปของจังหวัด จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เป็นที่ต้องการของตลาดมากขึ้นสร้างรายได้ให้กับประชากรในชุมชน ทั้งนี้เมื่อสินค้าเป็นที่ต้องการของตลาด จึงทำให้มีผลผลิตจากลูกหยีเป็นจำนวนมากออกมาวางจำหน่ายในท้องตลาด อาทิเช่น ลูกหยีกวน ลูกหยีคั้นน้ำตาล เป็นต้น จึงส่งผลให้ในเขตชุมชนมีเปลือกลูกหยีเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากซึ่งจัดว่าเป็นวัสดุเศษเหลือที่ไม่มีมูลค่าทำให้ไม่มีต้นทุนของวัตถุดิบ นอกจากนี้เปลือกลูกหยีก็เป็นวัสดุชีวมวลที่มีลิกนินสูงกว่าวัสดุอื่น เช่น เปลือกมะพร้าวหรือซังข้าวโพดที่มีปริมาณลิกนินร้อยละ 36.51 และร้อยละ 15.90 ซึ่งต่ำกว่าเปลือกลูกหยี จึงให้คาร์บอนคงรูปสูงหลังการเผา และยังมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการเกิดรูพรุนได้ดีเมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้น (Thirumal et al., 2021; Donbebe & Prof Ezekiel, 2015) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเปลือกลูกหยีมาสร้างมูลค่าโดยการปรับปรุงสภาพให้เป็นถ่านกัมมันต์ดัดแปลงและใช้เป็นทางเลือกเพื่อทดแทนถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีราคาแพง

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมย้อมสีผ้า ย้อมแบคทีเรีย ย้อมฝ้ายและไหม ก็ยังคงมีการใช้สีย้อมสังเคราะห์คริสตัลไวโอเลตเป็นจำนวนมาก รวมถึงอุตสาหกรรมการย้อมกระดาษ และสีย้อมคริสตัลไวโอเลตยังเป็นส่วนประกอบของหมึกพิมพ์ หมึกปากกา นอกจากนี้ในทางนิติ

วิทยาศาสตร์ยังมีการใช้สีย้อมคริสตัลไวโอเลต ในการทำให้ลายนิ้วมือปรากฏชัดขึ้นอีกด้วย อีกทั้งสีย้อมคริสตัลไวโอเลตยังถูกนำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งจะปรากฏเป็นสีเหลือง เมื่อทดสอบด้วยสารละลายที่มี pH 1 และเปลี่ยนเป็นสีม่วงเมื่อทดสอบด้วยสารละลายที่มี pH 2 (Adams & Rosenstein, 1914; Takashi, 2004) ทั้งนี้จากคุณสมบัติของสีย้อมคริสตัลไวโอเลต ที่ทำให้มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย แต่ทั้งนี้โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมมีสีเข้มทำให้ขัดขวางการสังเคราะห์แสงของผู้ผลิตได้น้ำจึงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลงหรือค่า Biochemical Oxygen Demand; BOD สูง นอกจากนี้สีย้อมคริสตัลไวโอเลตเป็นสีย้อมในกลุ่มไตรฟีนิลมีเทนที่อยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์ ดังภาพที่ 1 เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้โมเลกุลสีย้อมประจุบวก โดยทั้งนี้สีย้อมคริสตัลไวโอเลตมีสูตรโมเลกุลและคุณสมบัติ ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้สีย้อมยังมีโทษหนักเป็นองค์ประกอบจึงก่อให้เกิดสารก่อมะเร็ง ที่ส่งผลกระทบต่อน้ำทิ้งจากสีย้อมให้ค่า BOD สูงถึง 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg L^{-1}) (มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดให้มีค่า BOD ไม่เกิน 20 mg L^{-1} (ElAzz et al., 2017; Loulidi et al., 2020) ทั้งนี้ น้ำเสียจากสีย้อมจึงเป็นมลพิษทางน้ำที่ต้องได้รับการแก้ไขและบำบัดโดยเร่งด่วน



ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

ตารางที่ 1 สมบัติทางเคมีของสีย้อมคริสตัลไวโอเลต (Loulidi et al., 2020)

ชื่อทั่วไป	Crystal violet
สูตรโมเลกุล	$\text{C}_{25}\text{H}_{30}\text{N}_3\text{Cl}$
ชื่อตาม IUPAC	Tris (4-(dimethylamino) phenyl) methylium chloride
ประเภทของสีย้อม	Basic dye (cationic dye)
มวลโมเลกุล (g mol^{-1})	407.98
ความยาวคลื่น (nm)	591
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	205
การละลายน้ำ	16 g L^{-1} at 25°C

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีหลายกระบวนการ เช่น การตกตะกอน (Vijayaraghavan & Shanthakumar, 2018) การแลกเปลี่ยนประจุ (Karcher, Kommüller & Jekel, 2002) และเทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Ashraf et al., 2022; Chakraborty, Bag & Gupta, 2003) แต่กระบวนการดูดซับซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการทางเคมี-กายภาพ เป็นเทคนิคที่เรียบง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียภายในเวลาอันสั้น กระบวนการดูดซับเป็นการถ่ายเทตัวถูกดูดซับไปยังผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดได้ระหว่างสารสองสถานะ เช่น ของแข็งกับของเหลว หรือของแข็งกับก๊าซ (Vassilis et al., 2020) วัสดุดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิลิกา (Niculescu & Raboaca, 2021) ซีโอไลต์ (Tharcil et al., 2013) ไคโตซาน (Tapan et al., 2010) และถ่านกัมมันต์ (Hayeeye et al., 2014) ด้วยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง จึงสามารถดูดซับมลพิษ เช่น โลหะหนักและสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถผลิตได้จากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้ง เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เปลือกกล้วย และขี้ข้าวโพด (Hayeeye & Sattar, 2020; Lairini et al., 2013; Miyah et al., 2016; Sagnik et al., 2011) ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้ไมโครเวฟ (Yongbin et al., 2007) ไฮโดรเทอร์มอล (Farahin et al., 2021) หรือการเผาและกระตุ้น (Elena et al., 2022)

ทั้งนี้งานวิจัยนี้เตรียมโดยใช้วิธีการเผาและการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นที่เป็นเบสและกรด คือ KOH และ H_3PO_4 ตามลำดับ ซึ่งเทคนิคนี้ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและมีรูพรุนมากขึ้น กว่ากระบวนการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ที่มีความเป็นกลาง (Abdelhakim et al., 2017; Yosra et al., 2023) และยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารต่างๆ โดยเฉพาะสีย้อมได้เป็นอย่างดีเยี่ยม อุตสาหกรรมขนาดเล็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงด้วยต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังศึกษากระบวนการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตโดยศึกษาปัจจัยของเวลา ปริมาณที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเริ่มต้น ความเป็นกรดเบส และอุณหภูมิ โดยออกแบบกระบวนการดูดซับเป็นแบบ Batch ซึ่งมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กง่ายต่อการควบคุมและมีต้นทุนต่ำ ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเป็นทางเลือกในการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมขนาดเล็กในชุมชนเพื่อลดปัญหามลภาวะทางน้ำ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

เปลือกกล้วย (อำเภอยะรัง จังหวัดปัตตานี) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์; KOH และ กรดฟอสฟอริก; H_3PO_4 จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นสารกระตุ้นเพื่อปรับปรุงสภาพผิวของถ่านกัมมันต์ สีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต จากบริษัท Fluka ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

โดยเตรียมสารละลายสีย้อมเริ่มต้นความเข้มข้น 1000 mg L^{-1} และเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นในช่วง $50\text{--}600 \text{ mg L}^{-1}$ เพื่อใช้สำหรับการศึกษารูปแบบของการดูดซับ โซเดียมไฮดรอกไซด์; NaOH และกรดไฮโดรคลอริก; HCl จากบริษัท Labscan ประเทศไอร์แลนด์ ใช้สำหรับการปรับค่า pH

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วย

นำเปลือกกล้วยมาล้างสิ่งสกปรกออกด้วยน้ำสะอาดและตากแดดให้แห้งสนิท แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำเปลือกกล้วยมาบดให้มีขนาดเล็กและเผา (Carbonization) โดยใช้เตาเผาอุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ถ่านชาร์ (DS) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมีโดยใช้สารกระตุ้นที่เป็นเบสและกรด (KOH และ H_3PO_4) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างถ่านชาร์และสารกระตุ้น 1 : 1.50 เเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 และ 2 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เท่ากับน้ำที่ใช้ล้างและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วยเบส (DSAC-KOH) และถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยที่กระตุ้นด้วยกรด (DSAC- H_3PO_4) เก็บใส่ภาชนะแห้งที่ไม่มีน้ำและความชื้น และนำไปคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้ (% yield)

2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วย

วิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ โดยสามารถหาได้ตามรูปแบบสมการ Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Barrett, Joyner & Halenda, 1951; Brunauer, Skalny & Bodor, 1969) ทำการวิเคราะห์ ณ ศูนย์เครื่องวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้ Surface Area and Porosity Analyzer รุ่น ASAP2060 ยี่ห้อ Micromeritics วิเคราะห์หาค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรดเบสของพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการ pH drift (Bakatula et al., 2018; Fiol & Villaescusa, 2009) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ เตรียมสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 3–9 ด้วยสารละลาย NaOH และ HCl เข้มข้น 0.10 M โดยใช้ pH meter (ST3100-F, Ohaus) (pH_i) จากนั้นนำสารละลาย NaCl ปริมาตร 50 mL ที่ปรับ pH แล้ววัดค่า pH เริ่มต้นเดิมตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 0.05 กรัม แล้วเขย่าที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกตัวดูดซับ วัดค่า pH สุดท้าย (pH_f) และนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pH_i และ pH_f โดยค่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 คือ จุดตัดระหว่างกราฟดังกล่าวและกราฟเส้นตรง $\text{pH}_f = \text{pH}_i$

2.3 ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต บน DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4

การศึกษาการดูดซับสามารถทำได้โดยใช้วิธีการแบบ Batch (Bakatula et al., 2018) โดยมีขั้นตอนดังนี้เติมถ่านกัมมันต์ (DSAC-KOH หรือ DSAC-H₃PO₄) 0.05 g ลงใน 50 mL ของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตที่มีความเข้มข้นต่างๆ (100–800 mg L⁻¹) จากนั้นเขย่าที่อุณหภูมิ 30°C และ pH=5 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มากพอที่จะทำให้กระบวนการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบน DSAC-KOH หรือ DSAC-H₃PO₄ เข้าสู่ภาวะสมดุล จากนั้นนำสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตก่อนและหลังการดูดซับไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (UV 2600, Shimadzu) ที่ความยาวคลื่น 591 nm เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับสีย้อม คริสตัลไวโอเลต สามารถคำนวณหาความเข้มข้นก่อนและหลังการดูดซับได้จากกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตจากค่าความเข้มข้นก่อนและหลังการดูดซับสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (q_e) และเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตของ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ จากนั้นทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลองและหาค่าเฉลี่ย

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต ดังนี้ อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต (50–600 mg L⁻¹) เวลา (30–200 นาที) ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (0.05–0.30 g)

3. รูปแบบสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

3.1 ร้อยละผลผลิตที่ได้ (% Yield) ปริมาณการดูดซับ (q_e) และเปอร์เซ็นต์การดูดซับ

จากการเตรียม DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ สามารถคำนวณหาร้อยละผลผลิตที่ได้ดังสมการที่ 1

$$\%Yield = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

โดย M_1 และ M_2 คือ น้ำหนักเปลี่ยนกลูกลูกหยีก่อนการเผา และหลังเผาและยังสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (q_e) และเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต ของ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ดังสมการที่ 2 และสมการที่ 3 ตามลำดับ

$$q_e = \frac{V(C_o - C_e)}{w} \quad (2)$$

$$\%adsorbed = \frac{C_o - C_e}{C_e} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

w คือ น้ำหนักของ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ (g)

C_0 และ C_e คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ จุดสมดุลของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต (mg L^{-1})

3.2 สมการของการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ สามารถสร้างรูปแบบการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir, 1916) และสมการของฟรุนดิช (Freundlich, 1907) ดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ตามลำดับ

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (4)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (5)$$

จัดรูปสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ให้เป็นสมการเส้นตรง ได้ดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m b} + \frac{C_e}{q_m} \quad (6)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg g^{-1})

q_m คือ ปริมาณตัวที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg g^{-1}) ที่ถูกดูดซับในชั้นเดียว

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L mg^{-1})

K_F คือ ค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg g^{-1})

n คือ ค่าคงที่ฟรุนดิชสัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลาย

3.3 สมการจลนศาสตร์ของการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบน DSAC-KOH หรือ DSAC-H₃PO₄ โดยเก็บข้อมูลในทุกๆ 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 591 nm จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่ 120 นาที และ 180 นาที สำหรับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ตามลำดับ คำนวณหาค่าความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณปริมาณการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (q_t) ดังสมการที่ 8 ทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันผลการทดลอง

$$q_t = \frac{V(C_o - C_t)}{w} \quad (8)$$

เมื่อ C_o และ C_t คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ ของสารละลาย สีย้อมคริสตัลไวโอเลต (mg L^{-1}) ตามลำดับ

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

w คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

นำข้อมูลที่ได้สร้างรูปแบบจลนศาสตร์การดูดซับโดยรูปแบบจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับที่เลือกใช้ คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกริยาอันดับสองเทียม (Ho, 1999; Lagergren, 1898) ดังสมการที่ 9 และสมการที่ 10 ตามลำดับ

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (9)$$

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (10)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 9 และสมการที่ 10 โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = t$ จะได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ 11 และสมการที่ 12 ตามลำดับ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (11)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (12)$$

โดยที่ q_t และ q_e คือ ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ และ ณ สมดุล (mg g^{-1}) ตามลำดับ

k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1}) และ ปฏิกริยาอันดับสองเทียม ($\text{mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

3.4 สมการอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบน DSAC-KOH หรือ DSAC- H_3PO_4 โดยศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตที่อุณหภูมิ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่สมดุล สำหรับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 คำนวณหาค่าความเข้มข้นด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณปริมาณการดูดซับสูงสุด ณ อุณหภูมิต่างๆ (q_e) ทำการทดลองซ้ำ

เพื่อยืนยันผลการทดลอง นำข้อมูลที่ได้อธิบายปัจจัยทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ ดังนี้ การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (ΔS°) โดยใช้สมการของ แวนท์ฮอฟฟ์ (Van't Hoff) ดังสมการที่ 13 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชันและจุดตัดแกนของ กราฟแวนท์ฮอฟฟ์ ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน กิบส์อิสระ (ΔG°) โดยใช้สมการที่ 14 (Nepu et al., 2020; Zhou & Zhou, 2014)

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (13)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_c \quad (14)$$

โดยที่ K_c คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารละลายที่ยอมที่ดูดซับ (C_A) และความเข้มข้นของสารละลายที่ยอมที่เหลือ ณ จุดสมดุล (C_e)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ผลการวิจัย

1. ผลของการเตรียมและคุณลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับดัดแปลงจาก เปลือกลูกหอย

จากการทดลองเมื่อเผาเปลือกลูกหอยที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ ถ่านชาร์ที่มีร้อยละผลผลิตที่ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 66.53 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาเป็น 500°C และ 600°C พบว่า ปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ลดลง จากนั้นนำถ่านชาร์จากเปลือก ลูกหอยที่ได้เข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วยเบสและกรดต่อไป โดยทั้งนี้ในกระบวนการกระตุ้นด้วย KOH และ H_3PO_4 ใช้อัตราส่วนถ่านชาร์ต่อสารกระตุ้น 1 : 1.50 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที จะได้ตัวดูดซับดัดแปลงจากเปลือกลูกหอย (DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4) และนำไปศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ให้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 2

จากผลร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย เบสและกรด (DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4) และเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วยการเผาเป็น เวลา 60 นาที และ 120 นาที พบว่า DSAC- H_3PO_4 ที่เผาในเวลา 60 นาที ให้ร้อยละผลผลิต ที่ได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 33.33 และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลผลิตที่ได้น้อยลง ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหอยที่กระตุ้นด้วยกรด H_3PO_4 และเผาเป็นเวลา 120 นาที เนื่องด้วยให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ $716.32 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ โดยทั้งนี้ค่าพื้นที่ผิวและ ค่าการกระจายตัวของรูพรุนสามารถหาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ

77 K นอกจากนี้ขนาดรูพรุนยังเป็นอีกตัวแปรสำคัญ ซึ่งขนาดรูพรุนจะถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ รูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 นาโนเมตร) ซึ่งการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็กมักเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ที่สูงภายในพื้นที่ผิวจำเพาะที่มาก รูพรุนขนาดกลาง (2–50 นาโนเมตร) เหมาะสำหรับการดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น สารอินทรีย์หรือสีย้อม การแพร่ของสารละลายภายในรูพรุนจะทำให้เกิดการดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพและรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 นาโนเมตร) เป็นทางผ่านเหมาะสำหรับการดูดซับสารแวนดอลอย (Tay, Ucar & Karagöz, 2009) จากผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับดัดแปลงจากเปลือกกล้วยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 16–21 นาโนเมตร ซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนขนาดกลางซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

ค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) เป็นจุดที่ประจุสุทธิบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นจุดที่ประจุบวกและประจุลบบนพื้นผิวสมดุลกัน ทั้งนี้ในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลต ซึ่งเป็นสารที่มีประจุบวกในสารละลาย เมื่อ pH ของสารละลายสูงกว่าค่า pH_{pzc} พื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นลบ ทำให้มีประสิทธิภาพในการจับกับสารละลายสีย้อมที่มีประจุบวกได้ดี ทั้งนี้ค่า pH_{pzc} สามารถหาได้จากจุดที่ pH สุดท้าย (pH_f) มีค่าเท่ากับ pH เริ่มต้น (pH_i) ซึ่งพบว่า ค่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 มีค่าเท่ากับ 6.50 และ 4 ตามลำดับ

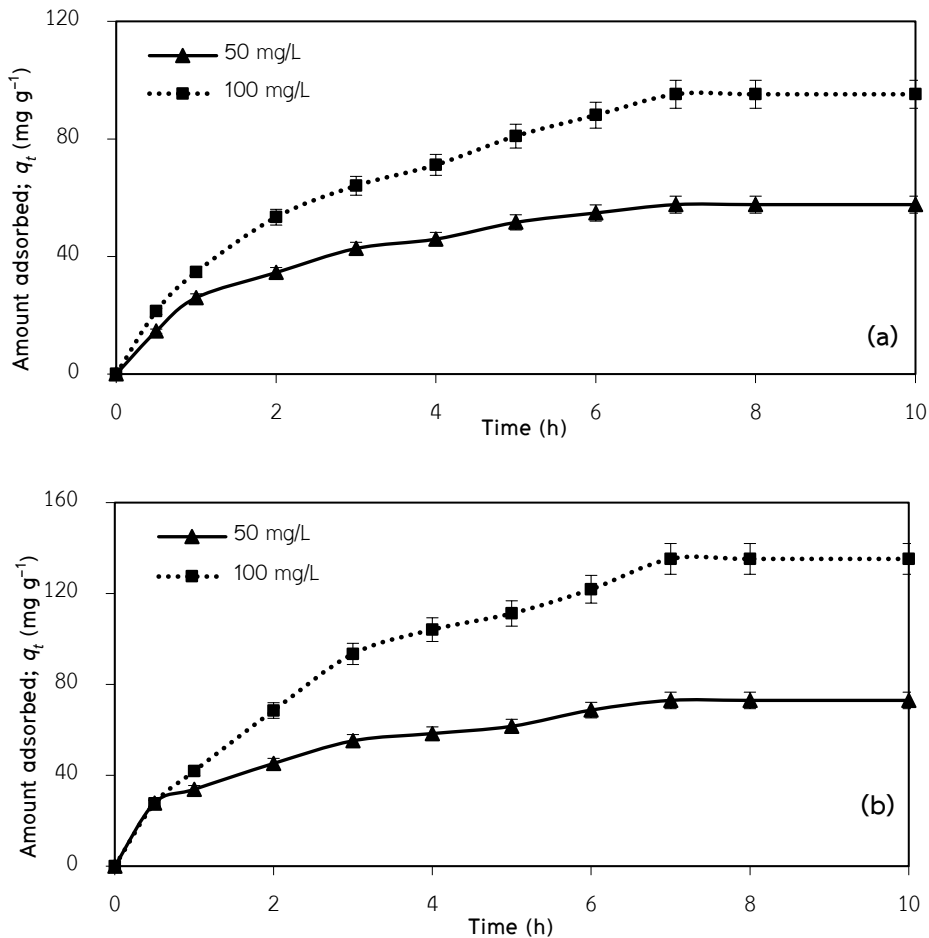
ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางกายภาพของ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4

คุณลักษณะทางกายภาพ	เวลาในการเผา (นาที)			
	DSAC-KOH		DSAC- H_3PO_4	
	60	120	60	120
ร้อยละผลผลิตที่ได้	30.44	23.79	33.33	28.78
พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	489.45	659.24	515.88	716.32
ปริมาตรรูพรุน ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	0.14	0.23	0.48	0.63
ขนาดของรูพรุน (nm)	21.15	19.44	17.26	16.51
ค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc})	–	6.5	–	4

2. ผลของการศึกษาการดูดซับสารละลายคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4

ภาพที่ 2 แสดงอิทธิพลของเวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นในช่วงโมเมนต์ 2–4 และเริ่มคงที่ในช่วงโมเมนต์ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับได้เข้าสู่ภาวะสมดุล

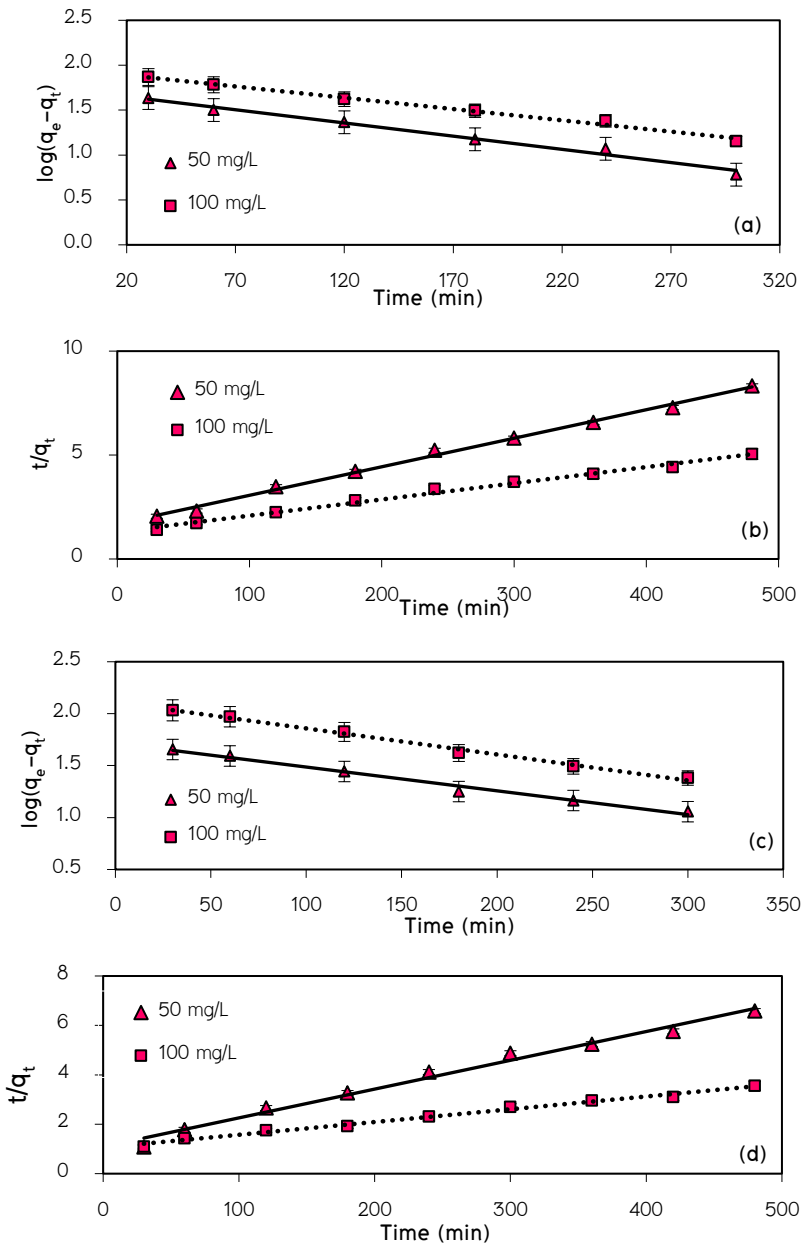
แล้ว ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการกระบวนการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่เหมาะสม คือ 6 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิ 30°C และ pH=5 (DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄=0.05 กรัม)



ภาพที่ 2 อิทธิพลของเวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต (50 100 mg L^{-1}) บนตัวดูดซับ DSAC-KOH (a) และ DSAC-H₃PO₄ (b) ที่ 30°C และ pH 5

จากอิทธิพลของเวลาสามารถนำไปศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังสมการที่ 11 เขียนกราฟระหว่าง $\text{Log}(q_e - q_t)$ กับเวลา และสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังสมการที่ 12 เขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ เวลาดังภาพที่ 3(a)–(d) พบว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เนื่องด้วยมีค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) เข้าใกล้ 1 นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราของการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณ

การดูดซับได้จากความชันและจุดตัดแกน y จากการทดลอง พบว่า ปริมาณการดูดซับของการทดลอง (q_e (exp)) และค่าปริมาณการดูดซับที่คำนวณได้ (q_e) จากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 3

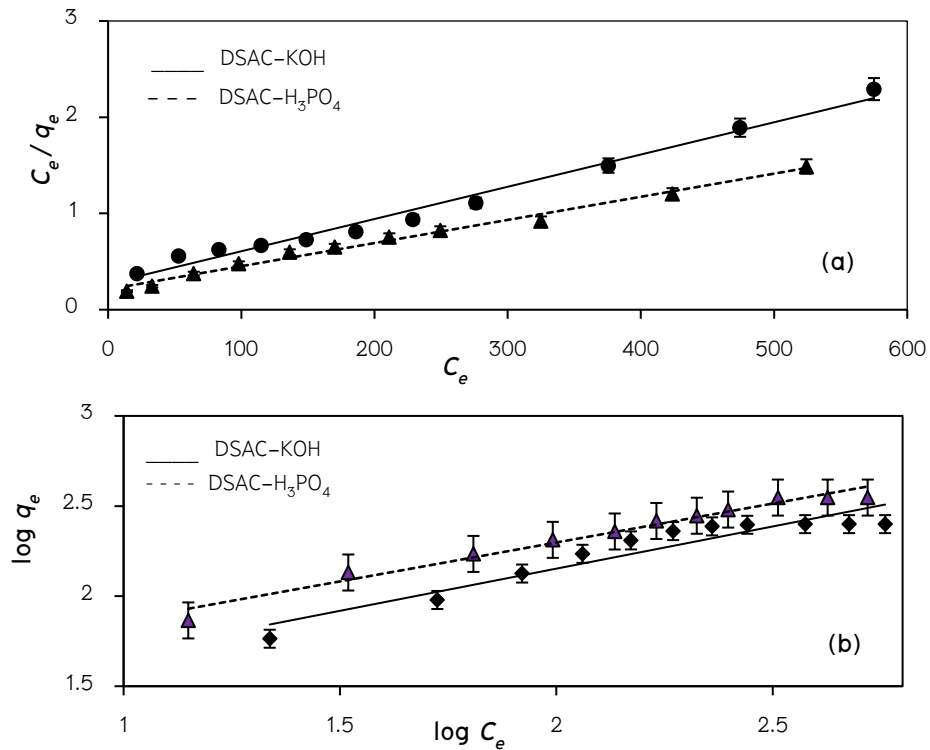


ภาพที่ 3 จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต (50 and 100 mg L⁻¹) บนตัวดูดซับ DSAC-KOH (a, b) และ DSAC-H₃PO₄ (c, d) ที่ 30°C และ pH 5

ตารางที่ 3 ปัจจัยทางจลนศาสตร์ของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต (50 and 100 mg L⁻¹) บนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่ 30°C และ pH 5

DSAC-KOH							
C ₀ (mg L ⁻¹)	q _e (exp) (mg g ⁻¹)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		q _e (mg g ⁻¹)	k ₁ (×10 ⁻³) (min ⁻¹)	R ²	q _e (mg g ⁻¹)	k ₂ (×10 ⁻⁵) (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
50	57.65	6.96	2.90	0.98	72.99	1.10	0.99
100	95.20	5.53	2.50	0.99	128.21	4.66	0.99
DSAC-H ₃ PO ₄							
50	72.95	5.56	2.30	0.98	85.47	6.22	0.99
100	135.23	8.12	2.40	0.98	192.31	2.78	0.99

ภาพที่ 4 แสดงแบบจำลองของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 30°C และ pH = 5 และสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_m) จากความชันของกราฟ พบว่า ปริมาณการดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 294.12 และ 416.67 mg g⁻¹ สำหรับการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ตามลำดับ โดยทั้งนี้ค่าคงที่ของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังตารางที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่า DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ให้ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด สูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ดังตารางที่ 5 จึงเป็นการยืนยันว่าตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ มีประสิทธิภาพสามารถดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตได้ดี



ภาพที่ 4 แบบจำลองการดูดซับตามสมการแลงเมียร์ (a) และฟรุนดิช (b) ของสารละลายสีย้อม คริสตัลไวโอเล็ต บนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ (c, d) ที่ 30°C และ pH 5

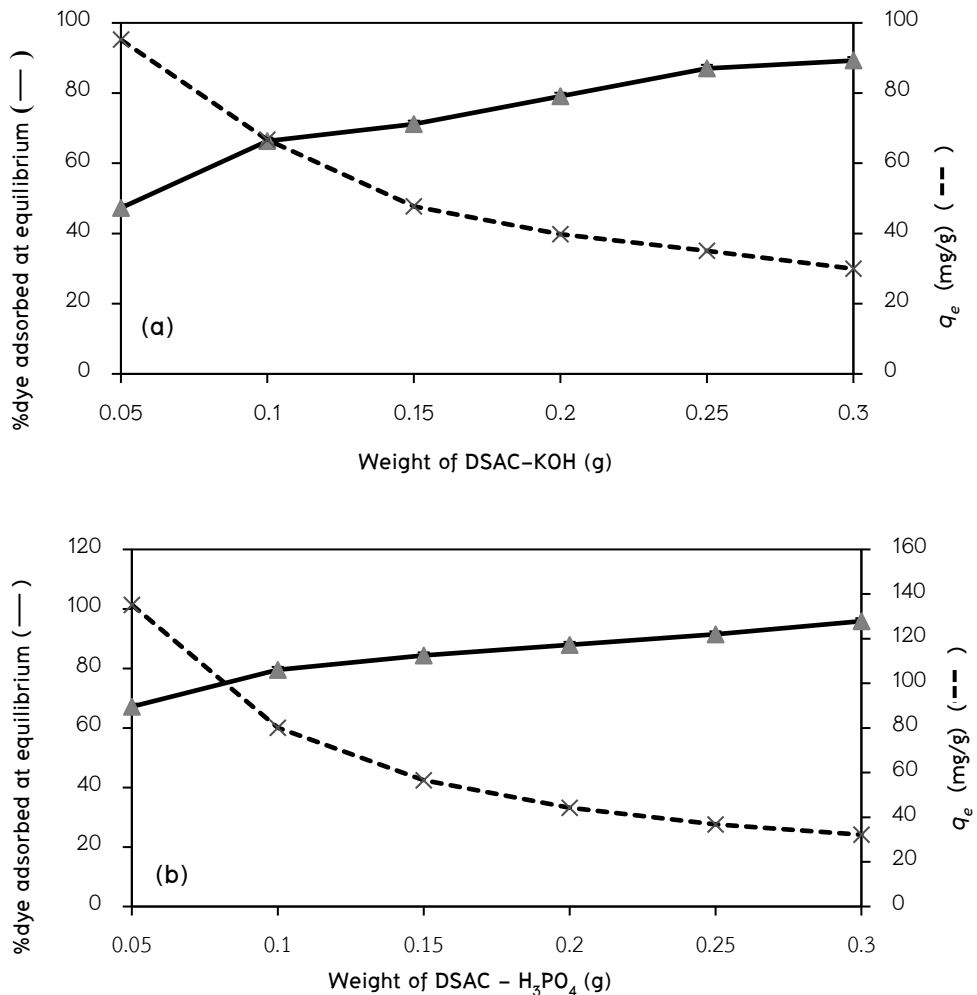
ตารางที่ 4 ค่าคงที่การดูดซับตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดิชของการดูดซับสารละลายสีย้อม คริสตัลไวโอเล็ต บนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่ 30°C และ pH 5

Adsorbent	Langmuir			Freundlich		
	q_m (mg g ⁻¹)	b (×10 ⁻²) (L mg ⁻¹)	R^2	K_F (mg g ⁻¹)	n	R^2
DSAC-KOH	294.12	1.25	0.98	2.94	0.82	0.90
DSAC-H ₃ PO ₄	416.67	1.14	0.99	2.70	0.70	0.97

ตารางที่ 5 ปริมาณการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตสูงสุดบนตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ที่	ตัวดูดซับ	pH	q_m (mg g ⁻¹)	Ref.
1.	Motherwort (<i>Leonurus cardiaca</i> L.)	6	125.61	Giannin et al., 2022
2.	Cedar cone forest waste	5	13.65	Meriem et al., 2020
3.	Carbonaceous materials (waste cotton and polyester)	5	74.80 (waste cotton) 92.80 (waste polyester)	Fumihiko et al., 2024
4.	Coniferous <i>Pinus</i> bark powder	8	32.78	Ahmad, 2009
5.	Charred rice husks	5	62.85	Puspa et al., 2022
6.	Nascent Rice Husk	5	24.48	Quansah, Hlaing & Lyonga, 2020
7.	Lemon (<i>Citrus limon</i>) wood	9	23.61	Rauf et al., 2021
8.	DSAC-KOH	5	294.12	This study
	DSAC-H ₃ PO ₄	5	416.67	

ภาพที่ 5 แสดงอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณตัวดูดซับที่ศึกษาในช่วง 0.05–0.30 g เปรี่เซนต์การดูดซับคริสตัลไวโอเล็ตที่สภาวะสมดุลแปรผันตรงกับปริมาณของตัวดูดซับ แต่จะแปรผกผันกับปริมาณการดูดซับ (q_e) และพบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ 0.05 กรัม จะให้ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด คือ 95.20 และ 135.23 mg g⁻¹ ตามลำดับ ทั้งนี้ 0.05 g จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่ใช้การศึกษาการดูดซับคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄

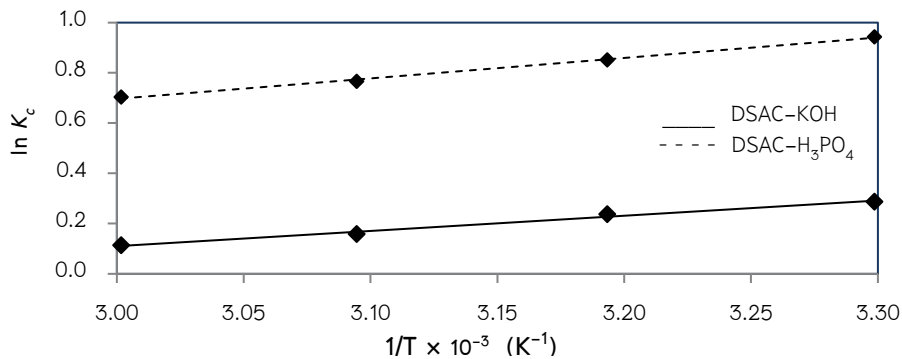


ภาพที่ 5 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH (a) และ DSAC-H₃PO₄ (b) ที่ 30°C และ pH 5.0

3. ผลของการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄

ภาพที่ 6 เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์จากสมการแวนท์ฮอฟฟ์ และค่า ΔH° สามารถคำนวณได้จากความชันของกราฟ จากการทดลองพบว่ากระบวนการดูดซับสารละลายคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ให้ค่าความชันเป็นลบ (ΔH° เป็นบวก) จัดว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และ ค่า ΔS° เป็นปริมาณที่บอกถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบ ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง ΔS° ก็จะมีค่าสูง ซึ่งสามารถหาได้จากจุดตัด

แกนของกราฟจากสมการแวนฮอฟฟ์ และค่า ΔG° ที่เป็นลบแสดงถึงการเกิดขึ้นได้เองของกระบวนการดูดซับ (Hayeeye, Benhawan & Sattar, 2022); Tariq, Nasir & Mirza, 2017) ดังตารางที่ 6



ภาพที่ 6 สมการแวนฮอฟฟ์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่ 30°C 40°C 50°C และ 60°C และ pH 5

ตารางที่ 6 ปัจจัยทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่ 30°C 40°C 50°C และ 60°C และ pH 5

Temp (°C)	DSAC-KOH			DSAC- H ₃ PO ₄		
	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	$-\Delta G^\circ$ (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	$-\Delta G^\circ$ (kJ mol ⁻¹)
30			0.73			2.38
40	5.04	0.01	0.62	6.77	0.02	2.22
50			0.43			2.06
60			0.32			1.95

ตารางที่ 7 วิเคราะห์ต้นทุนในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกลูกหอย

รายการต้นทุน	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ปริมาณ ที่ใช้	ต้นทุน (บาท)
1. วัตถุดิบ (เปลือกลูกหอย)	กิโลกรัม	0	5	0
2. สารเคมี (เช่น KOH, H ₃ PO ₄)	กิโลกรัม/ลิตร	50	0.20	10
3. พลังงานไฟฟ้า (เผา+อบแห้ง)	กิโลวัตต์ชั่วโมง	4	5	20
4. ค่าน้ำสำหรับล้างและบำบัด	ลูกบาศก์เมตร	15	0.10	1.50
5. ค่าแรงงาน	ชั่วโมง	60	0.50	30
6. ค่าสึกหรอเครื่องมือ	กิโลกรัมของถ่าน	5	1	5
รวม				66.50

จากการประมาณต้นทุนเบื้องต้น ดังตารางที่ 7 พบว่า การผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยหี มีต้นทุนเฉลี่ยประมาณ 70 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าราคาจำหน่ายถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ที่มีราคาประมาณ 200–300 บาทต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ (Saleem et al., 2019) ด้านเศรษฐศาสตร์จึงถือว่าสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีความต้องการใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมากและต่อเนื่อง (Ali et al., 2012) การประยุกต์ใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกกล้วยหีในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจึงมีศักยภาพทางเศรษฐกิจ ทั้งด้านต้นทุนที่ลดลงและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

อภิปรายผล

การเพิ่มอุณหภูมิในการเผาส่งผลให้ปริมาณร้อยละผลผลิตที่ได้ลดลงเนื่องจากการระเหยของสารอินทรีย์ในวัสดุเพิ่มขึ้น แต่จะมีปริมาณถ่านมากขึ้นเป็นผลจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ในเปลือกกล้วยหี การลดลงของร้อยละผลผลิตเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสอดคล้องกับการศึกษาการผลิตถ่านชาร์จากเปลือกกล้วย ซึ่งจัดว่าเป็นกระบวนการที่ใช้การไพโรไลซิส (Pyrolysis) เพื่อเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นถ่านชาร์ โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในการไพโรไลซิสจะมีผลสำคัญต่อร้อยละผลผลิต ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสสามารถลดผลผลิตถ่านชาร์ต เนื่องจากสารระเหยในชีวมวลถูกปล่อยออกไปในรูปของไอหรือก๊าซ (Ghenwa et al., 2023; Tran, You & Chao, 2016)

จากผลร้อยละผลผลิตที่ได้ของถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยหีที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและกรด (DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄) และกระตุ้นด้วยการเผาเป็นเวลา 60 นาที และ 120 นาที พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลผลิตที่ได้น้อยลงเนื่องมาจากปริมาณถ่านเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยหีจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นเนื่องด้วยระยะเวลาการกระตุ้นที่มากขึ้นทำให้เกิดการขยายตัวของรูพรุนภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ในระดับโมเลกุล ส่งผลให้สารกระตุ้นสามารถซึมและเข้าสู่ถ่านกัมมันต์ได้ลึกขึ้น รูพรุน ซึ่งเชื่อมต่อกันจะช่วยเพิ่มการกำจัดส่วนประกอบอินทรีย์ที่อาจจะขัดขวางการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นด้วย จึงทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (El-Hendawy, A.A., & Abdel-Nasser, 2009; Hu, Srinivasan & Ni, 2001) อีกทั้งการกระตุ้นด้วยเบสและกรดนั้นยังช่วยดึงน้ำมันดินและสารประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในโครงสร้างของเปลือกกล้วยหีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อใช้อุณหภูมิสูงร่วมด้วยจะทำให้เกิดการสลายพันธะของสารประกอบอินทรีย์ทำให้โครงสร้างของรูพรุนขยายตัวได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะรูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) ที่ช่วยเสริมคุณสมบัติในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Liu,

Han & Sun, 2020; Yahya, Al-Qodah & Ngah, 2019) โดยได้รับการยืนยันจากงานวิจัยของ Zhang, Ma & Yu (2021) ทำให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้นว่าการกระตุ้นด้วยกรดและเบสที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อโครงสร้างรูพรุนทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นทั้งนี้เป็นที่ทราบกันว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณและขนาดของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกับกระบวนการดูดซับสาร และส่งผลให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ (Zhang, Ma & Yu, 2021) นอกจากนี้ค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) ของตัวดูดซับทำให้ทราบกลไกและพฤติกรรมของพื้นผิวดูดซับ พบว่า DSAC-KOH จะมีประจุบวกบนพื้นผิวเมื่อ pH ของสารละลายน้อยกว่า 6.50 และมีประจุลบบนพื้นผิวเมื่อ pH มากกว่า 6.50 และ DSAC-H₃PO₄ จะมีประจุบวกบนพื้นผิวเมื่อ pH ของสารละลายน้อยกว่า 4 และมีประจุลบบนพื้นผิวเมื่อ pH มากกว่า 4 ดังนั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าตัวดูดซับ DSAC-H₃PO₄ มีลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคริสตัลไวโอเล็ตที่ pH=5 มากกว่า DSAC-KOH เนื่องจากพื้นผิว DSAC-H₃PO₄ มีประจุลบที่สามารถจับกับประจุบวกของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตได้ดีกว่าตัวดูดซับ DSAC-KOH ที่มีประจุพื้นผิวใกล้เคียงสมดุลหรือเป็นกลาง (Giannin, 2022)

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตแปรผันตรงกับปริมาณการดูดซับ เนื่องด้วยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตก็เพิ่มขึ้นทำให้มีโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตและตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกกล้วยหี ทั้งนี้กระบวนการดูดซับในงานวิจัยนี้เป็น การดูดซับระหว่างของเหลวกับของแข็ง ซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่บนบริเวณผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก ทั้งนี้การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงจุดสมดุลแล้วจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนตัวดูดซับแล้ว (Ilyasse et al., 2023; Meriem et al., 2020)

อิทธิพลของเวลาของกระบวนการดูดซับสามารถนำไปศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งพบว่า สอดคล้องตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยค่าปริมาณการดูดซับที่คำนวณได้ และที่ทดลองได้มีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งการเสนอแบบจำลองของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC-H₃PO₄ ที่อุณหภูมิ 30°C และ pH=5 ยังพบว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวซึ่งทุกตำแหน่งของพื้นผิวมีโอกาสเท่ากันในการจับโมเลกุลของสาร สอดคล้องตามแบบจำลองของแลงเมียร์ และนอกจากนี้การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ต่อกระบวนการดูดซับช่วยให้เข้าใจถึงปัจจัยทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้

ในการทำนายว่า กระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอย่างไร และจะเกิดขึ้นเองในทิศทางใดในสภาวะที่กำหนดไว้

สรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหิเตรีียมโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นด้วยเบสและกรด (KOH และ H_3PO_4) ในอัตราส่วนโดยมวล 1 : 1.50 พบว่า ถ่านกัมมันต์ดัดแปลงจากเปลือกลูกหิเตรีที่กระตุ้นด้วยกรด และเผา 120 นาที (DSAC- H_3PO_4) ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด คือ $716.32 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ และมีค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) เท่ากับ 4.50 ซึ่งสามารถดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต ที่ $\text{pH}=5$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและในการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 พบว่า จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองการดูดซับสอดคล้องตามสมการของแลงเมียร์ มีปริมาณการดูดซับสูงสุด คือ 294.12 และ 416.67 mg g^{-1} บนตัวดูดซับ DSAC-KOH และ DSAC- H_3PO_4 ตามลำดับ และจากการศึกษาอุณหพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากให้ค่าเอนทัลปีที่เป็นค่าบวก นอกจากนี้ค่าลบของพลังงานกิบส์อิสระยังยืนยันว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้เอง อีกทั้งยังเป็นอีกหนึ่งทางเลือกและแนวทางของการดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ ในระดับอุตสาหกรรม และการผลิตถ่านกัมมันต์จากเปลือกลูกหิเตรีไม่เพียงแต่จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียทางการเกษตร แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมสีเขียวและการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี และมหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตยะลา ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abdelhakim, E., Esther, B.G., Agustín, F.P., Francisco, J.M., & Francisco, C.M. (2017). Activated carbons from KOH and H_3PO_4 –activation of olive residues and its application as supercapacitor electrodes, *Electrochimica Acta*, **229**(3), 219–228.
- Adams, E.Q., & Rosenstein, L. (1914). The color and ionization of crystal violet, *J. Am. Chem. Soc.*, **36**(7), 1452–1473.
- Ahmad, R. (2009). Studies on adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto *Coniferous Pinus* bark powder (CPBP), *J. Hazard. Mater.*, **171**, 767–773.
- Ali, I., Mohammad, T.A., & Asim, M. (2012). Low-cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *J. Environ. Manage.*, **113**, 170–183.

- Ashraf, M.W., Michael, P.C., Amin Mir, M., Abdus, S., & Anwar, U.H. (2022). Separation of crystal violet dye from wastewaters by using supported liquid membrane technology. **J. Chem.**, **1**, 1–9.
- Bakatula, E.N., Richard, D., Neculita, C.M., & Zagury, G.J. (2018). Determination of point of zero charge of natural organic materials. **Environ. Sci. Pollut. Res.** **25**, 7823–7833.
- Barrett, E.P., Joyner, L.G., & Halenda, P.P. (1951). Pore size distribution for porous materials. **J. Amer. Chem. Soc.**, **73**, 373–380.
- Brunauer, S., Skalny J., & Bodor, E.E. (1969), Adsorption on nonporous solids. **J. Colloid Inter. Sci.**, **30**, 546–552.
- Chakraborty, S., Bag, B.C., & Gupta, S.D., (2003). Separation and fractionation of dye solution by nanofiltration. **Sep. Sci. Tech.**, **38**(1), 219–235.
- Donbebe, W. & P.Ezekiel, D. (2015), Comparative study of coconut shell and palm kernel shell biomass as adsorbents for sorption of Pb^{2+} from aqueous solution. **Asian J. Chem.**, **27**(2), 690 – 696.
- ElAziz A., Nayl, A., Elkhashab, R.A., Malah, T.E., Yakout, S.M., El-Khateeb, M.A., Ali, M.S., & Ali, H.M., (2017). Adsorption studies on the removal of COD and BOD from treated sewage using activated carbon prepared from date palm waste, **Environ. Sci. Pollut. Res.**, **24**, 22284–22293.
- Elena, D., Ines, S., Charles, J., & Angel, F.M (2022). Activated carbons from hydrothermal carbonization and chemical activation of olive Stones: application in sulfamethoxazole adsorption. **Resources**, **11**(5), 43.
- El-Hendawy, A.A., & Abdel-Nasser, A., (2009). An insight into the KOH activation mechanism through the production of microporous activated carbon for the removal of Pb^{2+} cations. **App. Sur. Sci.**, **255**(24), 8818–8823.
- Farahin, M.J., Shaliza, I., Yern, C., & Zubaidah, I. (2021). High removal of crystal violet dye and tetracycline by hydrochloric acid assisted hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse prepared at high yield, **Sus. Chem. Phar.**, **24**, 100541.
- Fiol, N., & Villaescusa, I. (2009). Determination of sorbent point zero charge: Usefulness in sorption studies. **Environ. Chem. Lett.**, **7**, 79–84.
- Freundlich, H. (1907), Ueber Kolloidfällung und Adsorption. Zeitschrift für Chemie und Industrie der **Kolloide**, **1**, 321–331.
- Fumihiko, O., Kazuki, S., Noriaki, N., Chalerm pong, S., Keiji, N., & Naohito, K. (2024). Adsorption efficiency of crystal violet from the aqueous phase onto a carbonaceous material prepared from waste cotton and polyester. **RSC Sustainability**, **2**, 179–186.
- Ghenwa, K., May, I., Mejdi, J., & Akram, H. (2023). Characterization and environmental application potential of banana peels. **Biochar. Eng. Proc.** **37**(1), 105.
- Giannin, M., Cosmin, V., Simona, P., Mircea, D., & Sorina, B. (2022). Crystal violet adsorption on eco-friendly lignocellulosic material obtained from motherwort (*Leonurus cardiaca* L.) biomass. **Polymers**, **14**(18), 3825.

- Hayeeye, F., Sattar, M., Tekasakul, S., & Sirichote, O. (2014). Adsorption of rhodamine B on activated carbon obtained from pericarp of rubber fruit in comparison with the commercial activated carbon, **Songklanakarin J. Sci. Technol.**, **36**, 177–187.
- Hayeeye, F., & Sattar, M. (2020). Removal of crystal violet in aqueous solution by activated carbon from the pericarp of rubber fruit and bagasse: kinetics, thermodynamics and adsorption studies. **Desal. Water Treat.**, **202**, 420–434.
- Hayeeye, F., Benhawan, A., & Sattar, M. (2022). Adsorption efficiency of batik dye by modified *Dialium cochinchinense* activated carbon beads: kinetics and thermodynamics. **Desal. Water Treat.**, **269**, 200–211.
- Ho, Y.S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second-order model for sorption processes. **Process Biochem.** **34**, 451–465.
- Hu, Z., Srinivasan, M.P., & Ni, Y. (2001). Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous carbons. **Micro. Meso. Mater.**, **43**(3), 267–275.
- Ilyasse, L., Maria, J., Abdelouahed, A., Abderahim, K., Awad, A.A., Chairmaa, H., Mbark, O., Palsan, S.A., Hassane, L., Youngjae, C., & Fatima, B. (2023). Comparative study on adsorption of crystal violet and chromium (VI) by activated carbon derived from spent coffee grounds. **Appl. Sci.**, **13**(2), 985.
- Karcher, S., Kormmüller, A., & Jekel, M. (2002). Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. **Water Res.**, **36**, 4717–4724.
- Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. **Handlingar Band**, **24**, 1–39.
- Langmuir, I., (1916). The constitution and fundamental properties of solids and liquids. part i. solids. **J. Amer. Chem. Soc.**, **38**, 2221–2295.
- Lairini, S., El Mahtal, K., Miyah, Y. Tanji, K., Guissi, S., Boumchita, S., & Zerrouq, F. (2013). The adsorption of crystal violet from aqueous solution by using potato peels (*Solanum tuberosum*): equilibrium and kinetic studies, **J. Mater. Environ. Sci.**, **8**, 3252–3261.
- Liu, X., Han, L., & Sun, Y. (2020). Effect of activation method on the porosity and adsorption performance of activated carbon derived from biomass. **Rene. Ener.**, **146**, 1435–1442.
- Loulidi, I., Boukhelifi, F., Ouchabi, M., Amara, A., Jabri, M., Kali, A., & Aziz, F. (2020). Kinetic, isotherm and mechanism investigations of the removal of basic violet 3 from water by raw spent coffee grounds, **Phy. Chem. Res.**, **8**(3), 869–884.
- Meriem, Z., Asma, H., Kenza, S., & Mossaab, B.L. (2020). Batch mode for adsorption of crystal violet by cedar cone forest waste. **SN Appl. Sci.**, **2**, 198.
- Miyah, Y., Lahrichi, A., & Idrissi, M. (2016). Removal of cationic dye–methylene bleu– from aqueous solution by adsorption onto corn cob powder calcined. **J. Mater. Environ. Sci.**, **7**, 96–104.
- Nepu, S., Maurizio, V., Luca, F., Roberto, V., Antonio, M., & Toufiq, R. (2020). Cationic Dye adsorption on hydro chars of winery and citrus juice industries residues: performance, mechanism, and thermodynamics. **Energies**, **13**(18), 4686.

- Niculescu, V.C., & Raboaca, M. (2021). Efficient rice–husk–derived silica nanocatalysts for organic dye removal from water. **Catalysts**, **11**, 815.
- Puspa, L.H., Rachana, P., Sujana, P., & Ajaya, B. (2022). Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk. **Heliyon**, **8**(4), e09261.
- Quansah, J.O., Hlaing, T., & Lyonga, F.N. (2020). Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. **Appl. Sci.**, **10**, 3437.
- Rauf, F., Seyed, J.P., Seyed, J.P., Hadi, P., Miran, P., & Jose, M.L. (2021). Adsorption of crystal violet dye using activated carbon of Lemonwood and activated carbon/ Fe_3O_4 magnetic nanocomposite from aqueous solutions: A kinetic, equilibrium and thermodynamic study, **Molecules**, **26**(8), 2241.
- Sagnik, C., Shamik, C., & Papita, D.S. (2011). Adsorption of crystal violet from aqueous solution onto NaOH–modified rice husk, **Carbohydr. Polym.**, **86**, 1533–1541.
- Saleem, J., Shahid, U.B., Hijab, M., Mackey, H.R., & McKay, G. (2019). Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones. **Renew. Sus. Ener. Reviews**, **103**, 113–123.
- Takashi, M., (2004). Determination of cationic surfactants by a photometric titration method with crystal violet as a color indicator, **Anal. Lett.**, **37**(3), 499–506.
- Tapan, K.S., Nikhil, C.B., Subarna, K., Mahmooda, G.A., Hideki, I., & Yoshinobu, F. (2010). Adsorption of methyl orange onto chitosan from aqueous solution, **J. Water Resour. Prot.**, **2**, 898–906.
- Tariq, J., Nasir, K., & Mirza, M.L. (2017). Kinetics, equilibrium and thermodynamics of cerium removal by adsorption on low-rank coal. **Desal. Water Treat.**, **89**, 240–249.
- Tay, T., Ucar, S., & Karagöz, S., (2009). Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass. **J. Hazard. Mater.**, **165**(1–3), 481–485.
- Tharil, C.R.B., Juliana, C.I., Carina, P.M., & Denise, A.F. (2013). Adsorption of crystal violet dye from aqueous solution onto zeolites from coal fly and bottom ashes, **Orbital: Electron. J. Chem.**, **5**, 179–191.
- Thirumal, V., Dhamodharan. Y., Dhayalan, V. & iDhayalan, V. (2021). Cleaner production of Tamarind fruit shell into bio–mass derived porous 3D–activated carbon nanosheets by CVD technique for supercapacitor applications. **Chemosphere.**, **282**(18), 131033.
- Tran, H.N., You, S.J., & Chao, H.P. (2016). Effect of pyrolysis temperatures and times on the adsorption of cadmium onto orange peel derived biochar. **Waste Manag. Res.**, **34**, 129–138.
- Vassilis, J.I., Marco, B., & Fabio, M. (2020). Liquid–solid mass transfer in adsorption systems – an overlooked resistance. **Ind. Eng. Chem. Res.**, **59**, 22007–22016.
- Vijayaraghavan, G., & Shanthakumar, S. (2018). Effective removal of reactive magenta dye in textile effluent by coagulation using algal alginate. **Desal. Water Treat.**, **121**, 22–27.
- Yahya, M.A., Al–Qodah, Z., & Ngah, W.Z. (2019). Agricultural bio–waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. **Rene. Sust. Ener. Reviews**, **46**, 218–235.

- Yongbin, J., Tiehu, L. Li, Z., Xiaoxian, W., & Qilang, L. (2007), Preparation of activated carbons by microwave heating KOH activation, **App. Sur. Sci.**, **254**(2), 506–512.
- Yosra, R., Ayoub, N., Issam, M., Meriem, S. Omar, C., & Souad, Z. (2023). High adsorption capacities of crystal violet dye by low-cost activated carbon prepared from *Moroccan Moringa oleifera* wastes: characterization, adsorption and mechanism study, **Diam. Rela. Mater.**, **135**, 109834.
- Zhang, Y., Ma, X., & Yu, Z., (2021). Preparation and characterization of activated carbon from agricultural waste by chemical activation with KOH. **J. Cleaner Prod.**, **292**, 126035.
- Zhou, X., & Zhou, X. (2014). The unit problem in the thermodynamic calculation of adsorption using the Langmuir equation. **Chem. Eng. Commun.** **201**, 1459–1467.