

การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Adsorption of Free Fatty Acids in Palm Oil Using Potassium Hydroxide-Modified Corn Cob Biochar

ศศิประภา แก้วแดง¹ สุรัชชัย ณัฐ จันทร์ศรี¹ พันธุ์ลพ สีนุธยา² รจพรรณ นิธิภูศิลป์³

วียงค์ กังวานศุภมมงคล⁴ กนิษฐา บุญภาวนาณิชกุล⁴ และหทัยทิพย์ สีนุธยา¹

¹ สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ 50180

² สาขาวิชานวัตกรรมเกษตรอินทรีย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50180

³ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50300

⁴ ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธินตำบลคลองหนึ่ง
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

¹Corresponding author: E-mail address: hathaithip_nin@cmru.ac.th

Received: 16 May 2024, Revised: 1 August 2024, Accepted: 20 December 2024, Published online: 30 December 2024

Abstract

Corn cob residue from agricultural harvests is often disposed of by open burning, which contributes to air pollution due to particulate matter. This research aims to produce biochar from corn cobs through pyrolysis at a temperature of 500 °C for 35 minutes and chemically modify it with potassium hydroxide (CCB-KOH) to be used as a material for adsorbing free fatty acids (FFA). The study found that using 4 molar concentrated potassium hydroxide (CCB-KOH) complies with the standard iodine adsorption values and provides a higher surface area and pore size than unmodified biochar. Additionally, when tested for the adsorption of free fatty acids in palm oil, it aligned more with the Freundlich adsorption isotherm ($R^2 = 0.914$) rather than the Langmuir isotherm ($R^2 = 0.879$), indicating multilayer adsorption capabilities. Kinetic studies showed consistency with the pseudo-second-order reaction model, which implies chemical adsorption.

Keywords: Biochar, Corn Cob, Pyrolysis, Kinetics

บทคัดย่อ

ซังข้าวโพดที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรมักถูกกำจัดด้วยการเผาในที่โล่ง ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละอองก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที และดัดแปรด้วยสารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระ (FFA) ผลการศึกษาพบว่า การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) เข้มข้น 4 โมลาร์ มีค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นไปตามมาตรฐานการดูดซับ และมีพื้นผิว ขนาดรูพรุนมากกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ทำการดัดแปร นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ($R^2 = 0.914$) มากกว่าแบบแลงเมียร์ ($R^2 = 0.879$) แสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น และผลการศึกษาการดูดซับแบบจลนพลศาสตร์พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิริยาอันดับสองเทียมซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพด ไพโรไลซิส ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์

บทนำ

ข้าวโพดที่ถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดมีวัสดุเหลือทิ้งที่เหลือประมาณ 190,000 ตัน/ปี ประกอบไปด้วย ลำต้นข้าวโพด (ร้อยละ 43.52) เปลือกข้าวโพด (ร้อยละ 38.48) และซังข้าวโพด (ร้อยละ 18) [1] เมื่อสิ้นสุดฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิต เกษตรกรส่วนมากกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วยวิธีการเผาในที่โล่งแจ้งซึ่งก่อให้เกิดหมอกควัน และฝุ่นละออง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของเกษตรกร อีกทั้งยังเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาไฟไหม้ป่าที่ยากต่อการควบคุม [2] จึงมีการส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งทางภายหลังการเก็บเกี่ยวมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาอัดรีดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแท่ง ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดสามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน และเนื่องจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนจึงช่วยกักเก็บน้ำและแร่ธาตุได้ดี และเป็นไปตามมาตรฐานถ่านชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ทางการเกษตร [3] จากคุณสมบัติความมีรูพรุนของถ่านซังข้าวโพด ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ จึงมีงานวิจัยต่างๆที่สนใจนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะในปัจจุบันมีการส่งเสริมการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว แต่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซลจึงต้องใช้เครื่องมือจำเพาะ ราคาสูง ซึ่งถ่านชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขรุขระ มีรูพรุนจำนวนมาก สามารถผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ [4] จากการศึกษา พบว่าซังข้าวโพดมีสมบัติที่ดีในการใช้เป็นวัสดุดูดซับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการกระตุ้นหรือดัดแปร ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ โดยการดัดแปรทางเคมีมักเลือกใช้สารเคมีที่ทำได้ง่าย มีต้นทุนต่ำ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งพบว่าสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปรับปรุงขนาดรูพรุนของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติการดูดซับที่ดียิ่งขึ้น [5] การนำซังข้าวโพดมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดความคุ้มค่าอย่างยั่งยืน

วิธีการวิจัย

นำซังข้าวโพดไปตากแดดเพื่อลดความชื้น 2-3 วัน ทำการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาขนาด 50 ลิตร เป็นเวลา 35 นาที ในสภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นทำการล้างถ่านชีวภาพซังข้าวโพดด้วยน้ำกลั่นจนกว่าน้ำที่ออกแช่ถ่านชีวภาพ

ซึ่งข้าวโพดจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ทำการอบถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ล้างทำความสะอาดแล้วในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการบดด้วยโกร่งบดสาร ร้อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) ทำการตัดแปรถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพด โดยการฝังตัวแบบแห้ง (dry impregnation) โดยการนำถ่านมาแช่กับ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 M และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาด้วยเตา muffler furnace ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นลงตามอุณหภูมิห้อง และล้างถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยสารเคมีด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ไหลผ่านถ่านจะมีค่า pH เท่ากับ 7 อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะใช้สัญลักษณ์ CCB และ CCB-KOH ตามลำดับ

1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของซึ่งข้าวโพด

1) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซึ่งข้าวโพด แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ตามมาตรฐาน ASTM D 3176 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซึ่งข้าวโพด

2) การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่า ความชื้น (moisture) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3174

3) การดูดซับเลขไอโอดีนเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับสารของถ่านที่มีโมเลกุลต่ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D46-7-94 ด้วยเทคนิคการไทเทรชันด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตจนสารละลาย เปลี่ยนเป็นไม่มีสี

4) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น CLARA ศึกษาโครงสร้างและวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง

5) ลักษณะพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) ด้วยเครื่อง Specific surface area analyzer, Belsorp, mini II ซึ่งใช้การวัดปริมาตรแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ตัวอย่างสำหรับ วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว และความรู้นของตัวอย่าง

1.2 การดูดซับกรดไขมันอิสระ

นำถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ในข้างต้นมาทำการดูดซับกรดไขมันอิสระประเภทกรดปาล์มเมติก ในน้ำมันปาล์มที่มีกรด ไขมันอิสระร้อยละ 5 ทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้ง ในอ่าง oil bath ที่ อัตราการกวนผสม 600 rpm นาที ใช้ปริมาณถ่านดูดซับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม เวลาในการดูดซับ 30 - 360 นาที รอให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรองสุญญากาศ ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการ ไทเทรชัน ด้วยวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a -40 [6] โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ สามารถคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระได้จากสมการดังนี้

$$FFA (\%) = \frac{25.6 \times V \times N}{W_{oil}} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรชัน (mL) , N คือ ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์, W_{oil} คือ น้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ (กรัม)

คำนวณความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ดังนี้

$$q = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (2)$$

$$Removal = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g), C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (mg/L), C_e คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (mg/L), V คือ ปริมาตรของน้ำมัน (mL) W คือ น้ำหนักของถ่านดูดซับ (mg)

1.3 ศึกษาผลของเวลาในการสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

โดยใช้ปริมาณถ่านในการดูดซับกรดไขมันอิสระ 4 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้งในอ่าง oil bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 30 - 360 นาที อัตราการกวนผสม 600 rpm ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรอง ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสมการ (1) และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับใช้โมเดลจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เพื่ออธิบายกลไกของการดูดซับ จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ดังนี้

สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาใด ๆ (mg/g), t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที), k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที), k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

1.4 ศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพ และไอโซเทอมของการดูดซับ

ในการศึกษาผลของเวลาในการสัมผัสจะใช้ปริมาณถ่านในการดูดซับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์ม ปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้งในอ่าง oil bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 240 นาที อัตราการกวนผสม 600 rpm ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรอง ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระ โดยวิธีการไทเทรชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากสมการ (1) และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมัน อิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ในการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ นั้น ใช้โมเดลของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช จากสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

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

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

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

เมื่อ q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g), K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (mg/g), K_F คือ ค่าคงที่ของ ฟรุนดลิชที่อธิบายความสัมพันธ์ค่าความสามารถในการดูดซับ (mg/g), n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่ใช้อธิบายความเข้มข้นของ การดูดซับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของซังข้าวโพด

1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และ คาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าซังข้าวโพดมีความชื้น และสารระเหยสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพด เนื่องจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ภายในซังข้าวโพด แต่เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิสสารระเหยภายในซังข้าวโพดจะมีค่าลดลง ส่วนปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะไปสลายสารประกอบภายในชีวมวลซังข้าวโพด เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ ทาร์หรือน้ำมันดินที่เกาะติดอยู่กับรูพรุนหรือพื้นผิวของซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว [7] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphaiboon [8] และ Drané, M. [9] ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ถ่านซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 78.86 ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5.77 และมีค่าความชื้น และ ปริมาณสารระเหยร้อยละ 4.61 และ 10.76 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (%)				อ้างอิง
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
CC	11.45	83.23	2.4	2.92	[8]

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (%)				อ้างอิง
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
CCB	1.78	33.05	6.13	59.04	[8]
CCB	4.17	75.96	1.36	18.51	[9]
CCB	2.14	14.28	4.39	79.18	[9]
CC	11.89	73.37	1.17	11.57	การศึกษาครั้งนี้
CCB	4.61	10.76	5.77	78.86	การศึกษาครั้งนี้
CCB -KOH 4 M	8.1	11.38	9.49	71.03	การศึกษาครั้งนี้

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ภายในของแข็งข้าวโพด และถ่านชีวภาพแข็งข้าวโพด ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ซังข้าวโพดมีธาตุคาร์บอนร้อยละ 48.45 เมื่อผ่านการเผาไหม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสถ่านแข็งข้าวโพดจะมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81.16 ในขณะที่เดียวกันจะมีปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 0.28 และ 16.95 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphaiboon [7] และ Adekanye และคณะ [10] ที่พบว่าปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นไปสลายพันธะออกซิเจนทำให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีปริมาณลดลง หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาคายน้ำ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพแข็งข้าวโพด

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%)					อ้างอิง
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ออกซิเจน	
CC	44.76	5.89	0.52	0.04	43.99	[8]
CCB	71.49	3.06	0.85	0.03	10.26	[8]
CC	48	6.04	0.77	0.14	43	[9]
CCB	84.60	2.80	0.88	0.11	4.98	[9]
CC	48.45	5.86	0.25	0.08	45.36	การศึกษาครั้งนี้
CCB	81.16	0.28	1.46	0.14	16.95	การศึกษาครั้งนี้
CCB -KOH 4 M	81.57	0.09	1.29	0.15	16.90	การศึกษาครั้งนี้

3) ผลการดูดซับไอโอดีน

การดูดซับไอโอดีนเป็นการหาพื้นที่ผิวของถ่านจากจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับ จากตารางที่ 3 ผลการทดลองการดูดซับไอโอดีนพบว่า ซังข้าวโพด (CC) มีสีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากจากซังข้าวโพดไม่มีความพรุนจึงไม่สามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ ถ่านซังข้าวโพดชีวภาพ (CCB-500) มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ 389.09 มิลลิกรัมต่อกรัม เกิดจากถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะมีความพรุนเกิดขึ้นจึงสามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ระดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gotore, O. และคณะ [11] ที่มีการศึกษาการดูดซับไอโอดีนจากการใช้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบที่อยู่ภายในซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว และเหลือเป็นคาร์บอนคงตัว

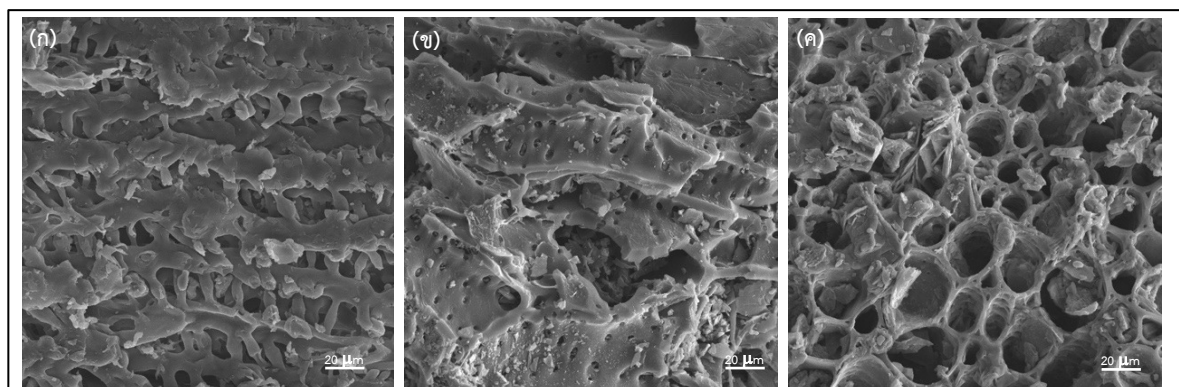
เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณก่อนหน้า จากผลการศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 663.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้เป็นไปตาม มอก.900-2547 [12] ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์หรือถ่านดูดซับต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงเลือกเงื่อนไขของการศึกษาดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ และศึกษาในขั้นต่อไป

ตารางที่ 3 ผลการดูดซับไอโอดีนของซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมี

วัสดุ	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
CC	สีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
CCB	389.09
CCB -KOH 0.1 M	530.12
CCB -KOH 0.5 M	561.95
CCB -KOH 1 M	589.86
CCB -KOH 2 M	593.26
CCB -KOH 4 M	663.11
CCB -KOH 6 M	674.09

4) ผลการศึกษาโครงสร้างลักษณะทางภายนอก

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านซังข้าวโพด ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) เป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพที่แสดงโครงสร้างพื้นผิวของซังข้าวโพด รวมถึงรูพรุน ความหนาหรือความเรียบของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 1 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยาย 2000 เท่า ซังข้าวโพด (CCB) มีพื้นผิวเรียบมีรูพรุนเล็กๆ ที่เป็นลักษณะรูพรุนธรรมชาติ ส่วน (ข) ถ่านซังข้าวโพด (CCB) พื้นผิวมีความขรุขระ ไม่เรียบ มีรอยแตก มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการระเหยของสารประกอบที่ระเหยง่ายและการสลายตัวของวัสดุจากการไพโรไลซิส [13] สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พื้นผิวมีความพรุนมากขึ้น รูพรุนมีขนาดใหญ่และมีการกระจายที่ดูสม่ำเสมอกว่าวัสดุอื่น ซึ่งเป็นข้อสมบัติที่ดีของตัวดูดซับ



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของซังข้าวโพด (ก) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (ข)

และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยสารเคมี (ค) กำลังขยาย 2000 X

5) ผลการศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

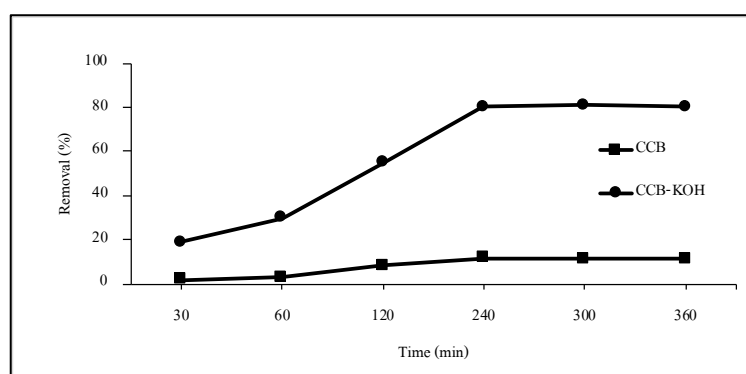
การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุน เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิว 15.78 m²/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.09 nm. ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิว 61.35 m²/g ปริมาตรรูพรุน 0.04 cm³/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ยน้อยลงที่ 2.67 nm แสดงให้เห็นถึงการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการดัดแปรทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยอาจเกิดจากสารเคมีทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงหรือการขยายรูพรุน ทั้งนี้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดไม่ได้ดัดแปร [11,13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีน นัมเบอร์ก่อนหน้าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของซังข้าวโพด ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

วัสดุ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
CCB	15.78	0.02	5.09
CCB-KOH 4 M	61.35	0.04	2.67

1.2 ผลการศึกษาเวลาในการสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ผลของเวลาในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีการดูดซับกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาของการดูดซับ 30 – 240 นาที เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจำนวนมาก และเข้าสู่สมดุลการดูดซับ การดูดซับที่ลดลงนั้นเกิดจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง ทำให้สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้น้อย [9,11]



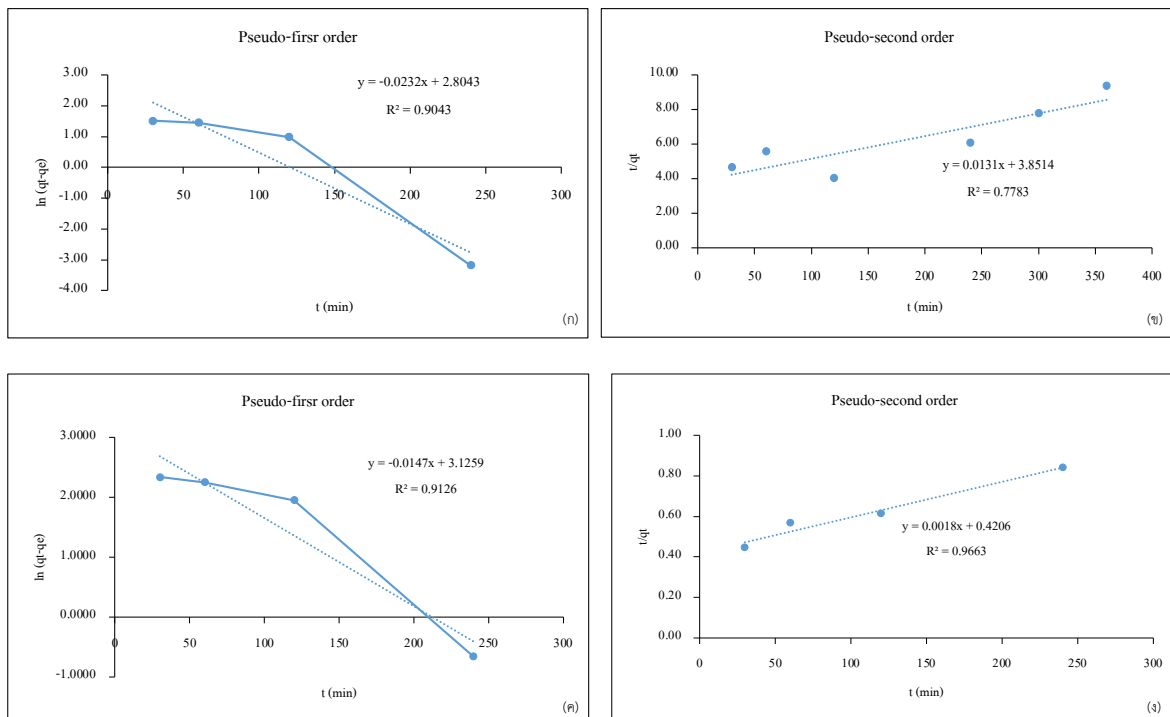
ภาพที่ 2 ผลของเวลาในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปรมีการดูดซับกรดไขมันอิสระสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

เนื่องจากมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูด ส่วนถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีการดูดซับสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) นอกจากนี้ยังมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) ของการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม แสดงดังตารางที่ 5 และแสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

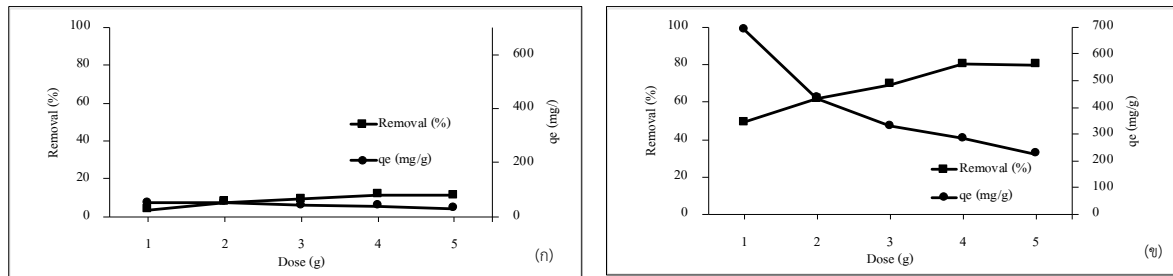
วัสดุ	$q_{e, \text{exp}}$ (mg/g)	จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)			จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
		$q_{e, \text{cal}}$	K_1	R^2	$q_{e, \text{cal}}$	K_2	R^2
		(mg/g)	(min^{-1})		(mg/g)	(g/mg-min)	
CCB	39.4	2.804	-0.053	0.9043	76.336	5827.166	0.7783
CCB-KOH	285.02	3.126	-0.034	0.9126	555.55	7.7E-06	0.9663



ภาพที่ 3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (ก), ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ตามแบบจำลองอันดับสองเทียม (ข), ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (ค) และ ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ตามแบบจำลองอันดับสองเทียม (ง)

1.3 ผลการศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพ และไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลของปริมาณถ่านในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณถ่านในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 4 และในทางกลับกันทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านดูดซับ และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านในการดูดซับเป็น 5 กรัม กลับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากปริมาณถ่านดูดซับที่มากเกินไปทำให้เกิดการจำกัดในการกระจายตัวของถ่านในระบบดูดซับ [14] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณถ่านในการดูดซับ 4 กรัม ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าสูงสุดที่สุด

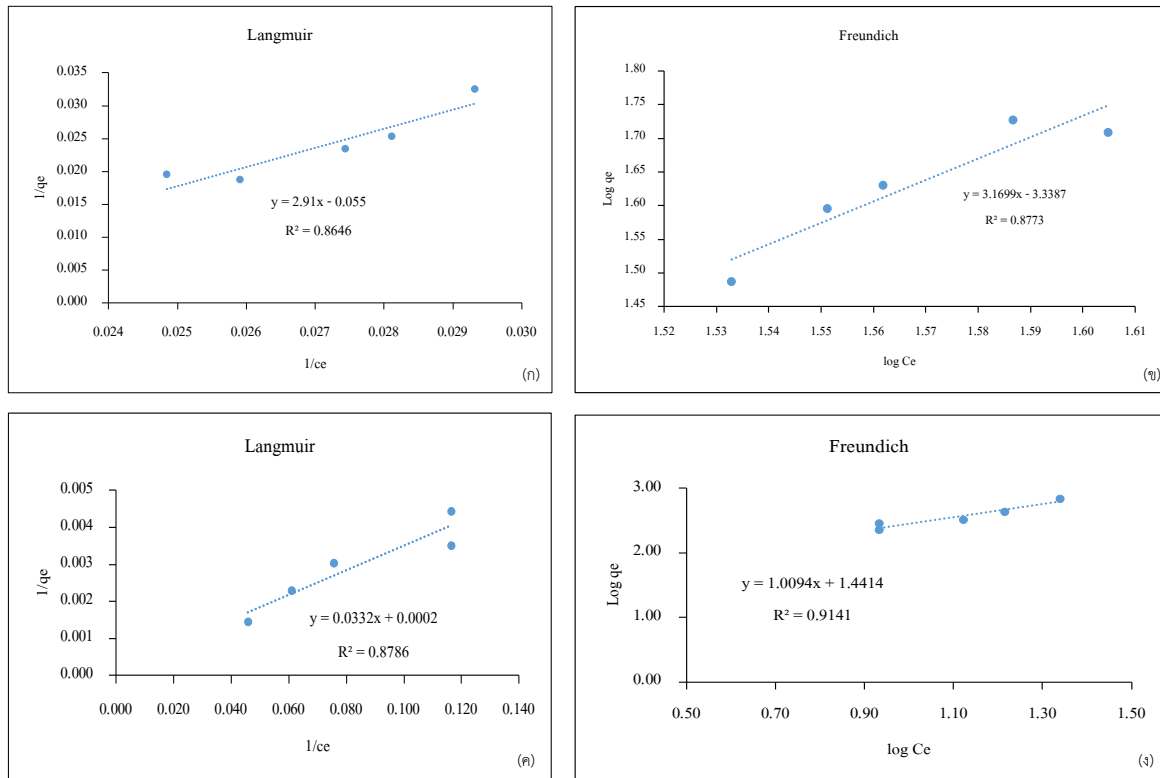


ภาพที่ 4 ผลของปริมาณผงถ่านที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม และความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) (ก) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH 4M) (ข)

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปร และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่า R² ในไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich) เท่ากับ 0.877 และ 0.914 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า R² ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ซึ่งถือได้ว่าถ่านทั้ง 2 แบบ มีการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดการซ้อนทับกันของถ่านที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [15] แสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 5

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

วัสดุ	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg/g)	K _L (mg/g)	R ²	K _F (mg/g)	n	R ²
CCB	18.182	0.019	0.865	3.339	0.315	0.877
CCB-KOH	5000	0.006	0.879	1.4414	0.991	0.914



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) แบบ Langmuir (ก), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) แบบ Freundlich (ข), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) แบบ Langmuir (ค), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) แบบ Freundlich (ง)

สรุปผลการวิจัย

ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจากการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และทำการดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มความเป็นรูพรุนให้แก่วัสดูดูดซับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ BET และมีประสิทธิภาพการดูดซับสามารถนำมาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้ปริมาณผงถ่านดูดซับ 4 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 240 นาที นอกจากนี้ยังมีผลการดูดซับสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ และสอดคล้องกับการดูดซับไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิชซึ่งสามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มได้ และเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอื่นๆ ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการนำมาใช้ประโยชน์และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจได้อย่างมีศักยภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติตามสัญญาสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย เลขที่ SCA-CO-2561-

7134TH ในโอกาสนี้ขอขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีงบประมาณ 2566 ภายใต้โครงการวิจัยการพัฒนาระบบดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยโอโซนสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้ว สัญญาเลขที่ สกสว. 30/66 และการสนับสนุนจากวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ช่วยสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์สำหรับทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จุฬา สีนโพบูลย์. (2564). การจัดการวัสดุเหลือทิ้งเป็นศูนย์และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [2] ณิชา บุรณสิงห์. (2562). ชังข้าวโพด : เชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อสิ่งแวดล้อม. เอกสารวิชาการ อีเล็กทรอนิกส์. สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.
- [3] Cole, Emily J., Omid R. Zandvakili, Baoshan Xing, Masoud Hashemi, Stephen Herbert, & Hamid H. Mashayekhi. (2019). Dataset on the Effect of Hardwood Biochar on Soil Gravimetric Moisture Content and Nitrate Dynamics at Different Soil Depths with FTIR Analysis of Fresh and Aged Biochar. *Data in Brief* 25:104073.
- [4] Simon, S., Saran, S., Stuart, H., David, M., and Ondrej, M. (2009). Biochar, reducing and removing CO₂ while improving soils: A significant and sustainable response to climate change.
- [5] พัชราภรณ์ สุริยะ และ สุชัยญา ทองเครือ. (2562). การผลิตถ่านกัมมันต์จากชังข้าวโพดเพื่อบำบัดสี้อมแอซิดแดง. เรื่องเต็มการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16: เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16: เกษตรศาสตร์กำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน. (หน้า 1940-1949). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน กองบริหารวิชาการและนิสิต.
- [6] Firestone, D. 2004. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society, AOCS Press. IL: Campaign
- [7] Ronsse, F., Hecke, S.V., Dickinson, D., and Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology Bioenergy*. 5, 104-115.
- [8] Rattanaphai boon, P., Homdoug, N., & Tippayawong, N. (2022). Production and characterization of corncob biochar for agricultural use. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2681, No. 1, 020034). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.01117160>
- [9] Drané, M.; Zbair, M.; Hajjar-Garreau, S.; Josien, L.; Michelin, L.; Bennici, S.; Limousy, L. Unveiling the Potential of Corn Cob Biochar: Analysis of Microstructure and Composition with Emphasis on Interaction with NO₂. *Materials* 2024, 17, 159. <https://doi.org/10.3390/ma17010159>

- [10] T., A., Adekanye., Oluwasogo, A., Dada., Kolapo, Jegede., Makun, Aderinto. (2022). Pyrolysis of maize cob at different temperatures for biochar production: Proximate, ultimate and spectroscopic characterization. *Research in Agricultural Engineering*, doi: 10.17221/106/2020-rae
- [11] Gotore, O., Itayama, T., Dang, B.-T., Nguyen, T.-D., Ramaraj, R., Osamu, N., Shuji, T., & Maseda, H. (2022). Adsorption analysis of ciprofloxacin and delafloxacin onto the corn cob derived-biochar under different pyrolysis conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03156-y>
- [12] Thai Industrial Standards Institute. (2004). Thai Industrial Standard for Activated Carbon (TIS 900-2547). Ministry of Industry.
- [13] Purevsuren, B., Avid, B., Tesche, B. and Davaajav, Y. (2003). A biochar from casein and its properties. *Journal of Materials Science*. 38, 2347–2351.
- [14] Ismaila, Ammaru, Nur Nazlina Saimon, Mazura Jusoh, & Zaki Yamani Zakaria. (2017). Adsorption of Free Fatty Acid in Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate Using Koh-Activated Starch. *Chemical Engineering Transactions* 56:619–24.
- [15] Mbah, J. B., Kada, B., Daniele, E. M., Larissa, T. T., Antoine, E., & Richard, K. (2020). Adsorption mechanisms of pigments and free fatty acids in the discoloration of shea butter and palm oil by an acid-activated Cameroonian smectite. *Scientific African*, 9, e00498. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00498>