

การปรับปรุงคุณภาพกากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเถ้าลอยเหลือทิ้ง จากกระบวนการผลิตไอน้ำของโรงงานน้ำตาล

Quality Improvement of Molasses by Activated Carbon Prepared from Fly Ash as Waste Driven out of Boiler in The Sugar Factory

ณัฐวุฒิ พิมพ์พะนิตย์,¹ มนต์ทิพย์ ชำชอง¹ และเชาว์ อินทร์ประสิทธิ์^{1*}
Nuttawoot Pimpanit,¹ Montip Chamchong¹ and Chouw Inprasit^{1}*

Received 13 June 2025, Revised 20 October 2025, Accepted 20 October 2025

ABSTRACT

The sugar industry generates significant byproducts, particularly bagasse fly ash and molasses. This study added value to these residues by converting fly ash from boiler stacks (600–800°C) into activated carbon through physical activation at 700°C and 900°C for 0–200 min. The efficiency of the produced activated carbon was evaluated by measuring the residual weight after burning, iodine adsorption, and surface area. The results showed that the optimal condition was activation at 900°C for 80 minutes, which yielded a product with 83% residual weight, increased iodine adsorption capacity from 92 mg/g to 329 mg/g, and increased surface area from 16.2702±0.0177 m²/g to 80.2001±0.0375 m²/g. The produced activated carbon was tested for its efficiency in reducing the color value of molasses, studying factors of quantity, temperature, and time. The most suitable condition was found to be using 25% activated carbon by mass at 83°C for 68 minutes, which reduced the color value from 208,139±2335 ICU to 125,896 ICU, representing a 40% color reduction efficiency. Other molasses properties also improved: the concentration of soluble solids increased from 70.81±0.15% to 80.24% enhancing quality and reducing transportation costs, pH decreased from 4.79±0.01 to 4.49 while lower pH promoted sucrose hydrolysis beneficial for ethanol fermentation without affecting total sugar, total sugar content remained above the standard from 50.72±0.48% to 51.71% as a result of increased concentration, and turbidity decreased from 33.66±1.31 ICU to 25.35 ICU consistent with reduced sulfate ash ($\leq 11\%$). This research demonstrates the potential for adding value to sugar industry byproducts and presents an environmentally friendly waste management approach by converting fly ash into efficient activated carbon for improving molasses properties.

Keywords: Activated carbon, Molasses, Bagasse fly ash, Color reduction

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140
Department of Food Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus,
Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* Corresponding author: Tel. 08-1803-5716, E-mail address: fengchi@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมน้ำตาลเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมสำคัญที่ก่อให้เกิดผลพลอยได้จำนวนมาก ซึ่งรวมถึงแกลลวยจากการเผาขานอ้อยและกากน้ำตาล การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยศึกษาการใช้ประโยชน์จากแกลลวยเหลือทิ้งเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ และนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของกากน้ำตาล วัตถุประสงค์หลักคือการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลลวยที่ได้จากหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ ซึ่งมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ประมาณ 600-800°C และถูกดักจับจากปล่องด้วยระบบสเปรย์น้ำ กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ใช้วิธีการเผากระตุ้นทางกายภาพที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C เป็นเวลา 0-200 นาที ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ถูกประเมินด้วยการวัดน้ำหนักคงเหลือหลังเผา การดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิว ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการเผากระตุ้นที่ 900°C เป็นเวลา 80 นาที ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักคงเหลือ 83% ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 92 มก./ก. เป็น 329 มก./ก. และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก 16.2702±0.0177 ตร.ม./ก. เป็น 80.2001±0.0375 ตร.ม./ก. ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ถูกนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการลดค่าสีของกากน้ำตาล โดยศึกษาปัจจัยด้านปริมาณ อุณหภูมิ และเวลา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือใช้ถ่านกัมมันต์ 25% โดยมวล ที่อุณหภูมิ 83°C เป็นเวลา 68 นาที สามารถลดค่าสีจาก 208,139±2335 ICU เหลือ 125,896 ICU คิดเป็นประสิทธิภาพการลดสี 40% กากน้ำตาลที่มีสีอ่อนลงอาจช่วยเพิ่มความน่าสนใจของผลิตภัณฑ์และอาจเพิ่มมูลค่าทางการค้าได้ นอกจากนี้ ยังส่งผลต่อคุณสมบัติอื่นๆ ของกากน้ำตาล โดยความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้เพิ่มขึ้นจาก 70.81±0.15% เป็น 80.24% ส่งผลดีต่อคุณภาพและอาจเพิ่มมูลค่าเนื่องจากต้นทุนการขนส่งที่ลดลง ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 4.79±0.01 เป็น 4.49 แม้ค่า pH จะไม่ผ่านมาตรฐาน แต่ไม่กระทบต่อปริมาณน้ำตาลรวมของกากน้ำตาล ในสภาวะ pH ต่ำ ซูโครสแตกตัวเป็นกลูโคสและฟรุกโตสที่ไม่ตกผลึก ซึ่งกลับเอื้อต่อการหมักของยีสต์ในการผลิตเอทานอล อีกทั้ง pH ยังสามารถปรับแก้ได้ในขั้นตอนต่อไป ปริมาณน้ำตาลรวมยังคงรักษาระดับได้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานจาก 50.72±0.48% เป็น 51.71% โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากผลของความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น และค่าความขุ่นลดลงจาก 33.66±1.31 ICU เป็น 25.35 ICU การลดลงของความขุ่นอาจสัมพันธ์กับการลดลงของเถ้าซิลิเกต ซึ่งตามมาตรฐาน ที่กำหนดไม่เกิน 11% โดยน้ำหนัก ช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพทั้งยังส่งผลดีต่อความคงตัวของผลิตภัณฑ์ ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล และนำเสนอแนวทางการจัดการของเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการนำแกลลวยมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติของกากน้ำตาล

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ กากน้ำตาล แกลลวยจากขานอ้อย การลดค่าสี

บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตน้ำตาลรายสำคัญของโลก โดยมีอ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจหลัก เนื่องจากสามารถสะสมน้ำตาลในรูปซูโครสได้สูง ผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการผลิตน้ำตาล ได้แก่ น้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ควบคู่กับผลิตภัณฑ์พลอยได้ เช่น กากน้ำตาล กากอ้อย และกากหม้อกรอง จากรายงาน

ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (2567) ระบุว่า ในฤดูการผลิต 2566/67 ประเทศไทยมีอ้อยเข้าหีบราว 93 ล้านตัน และผลิตน้ำตาลได้เฉลี่ยประมาณ 10 ล้านตัน ซึ่งสะท้อนถึงการพึ่งพิงจากภาวะภัยแล้ง โดยไทยยังคงเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลรายใหญ่อันดับ 2 ของโลก (รองจากบราซิล) และเป็นผู้ส่งออกกากน้ำตาลอันดับ 3 ของโลก กากน้ำตาล (molasses) เป็นของเหลวข้นเหนียว สีน้ำตาลเข้ม มี

กลิ่นเฉพาะ ใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น การผลิตเอทานอล กรดซิตริก โมโนโซเดียมกลูตาเมต และอาหารสัตว์ อย่างไรก็ตาม สีที่เข้มและกลิ่นเฉพาะของกากน้ำตาลทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท เช่น น้ำอัดลม ที่ต้องการวัตถุดิบที่มีสีและกลิ่นควบคุมได้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 394-2524 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2524) ได้กำหนดคุณสมบัติของกากน้ำตาลไว้ เช่น ความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 79 %Brix น้ำตาลรวมไม่ต่ำกว่า 50% เถ้าซัลเฟตไม่เกิน 11% และค่า pH อยู่ระหว่าง 5-6 โดยในทางปฏิบัติ ผู้ซื้อมักให้ความสำคัญกับค่า %Brix และน้ำตาลรวม เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดคุณภาพและใช้ประกอบการคำนวณราคาซื้อขาย ดังนั้น การปรับปรุงคุณสมบัติกากน้ำตาลเพื่อขยายขอบเขตการใช้งานจึงเป็นประเด็นที่สำคัญ หนึ่งในแนวทางที่มีศักยภาพคือการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งนิยมใช้ในการดูดซับสี จากงานวิจัยของชินธันย์ และคณะ (2561) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยและถั่วลันเตาเมื่อทำการกระตุ้น (activation) ด้วยไฮโดรเทอร์มอลที่ 800°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นมากจาก 5.3 m²/g เป็น 390.2 m²/g และสามารถดูดซับค่าสีน้ำเชื่อมสูงสุดได้ 88%และอิมิตที่ 120 นาที โดยถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัสดุชีวมวลด้วยวิธีการกระตุ้นหลัก 2 แนวทาง ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพ ซึ่งใช้ความร้อนสูงในช่วง 800-1000°C อาจร่วมกับก๊าซออกซิไดซ์หรือไอน้ำ และการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งใช้สารเคมีกระตุ้น เช่น สังกะสีคลอไรด์ (ZnCl₂) หรือกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าในช่วง 600-700 °C เพื่อเร่งการเกิดโครงสร้างรูพรุน งานวิจัยหลายฉบับยืนยันว่า การกระตุ้นทางเคมีมักได้ผลผลิตที่มีพื้นที่ผิวสูงและปริมาตรรูพรุนมาก โดยใช้เวลาและอุณหภูมิต่ำกว่าวิธีการกายภาพ (Liu *et al.*, 2010) แต่ข้อเสียสำคัญคือ สารเคมีกระตุ้นอาจคงค้างบนผิวถ่านกัมมันต์ แม้ผ่านการล้าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jagtoyen & Derbyshire (1998)

รายงานว่ามีฟอสเฟตและโพสเฟตยังคงอยู่บนถ่านที่กระตุ้นด้วย H₃PO₄ หลังล้าง ทำให้ต้องพิจารณาความเหมาะสมหากนำไปใช้ในด้านอาหารหรือเภสัชกรรม ขณะทำงานวิจัยของ (Lua & Guo, 1998) พบว่า ZnCl₂ มีจุดเดือดสูงและบางส่วนยังตกค้างบนผิวคาร์บอนหลังการกระตุ้น ซึ่งเป็นประเด็นด้านความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมหากการชะล้างไม่สมบูรณ์

ดังนั้น เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัย เช่น Food Chemicals Codex (FCC) งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการนำถั่วลันเตาจากการเผาชานอ้อยซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำตาลมาผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพโดยตรง เพื่อใช้ปรับปรุงคุณสมบัติกากน้ำตาลอย่างปลอดภัย เพิ่มมูลค่า และขยายการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

ถั่วลันเตาและกากน้ำตาลถูกเก็บจากบริษัทน้ำตาลบ้านโป่ง จำกัด ในช่วงฤดูการผลิตระหว่างเดือนมกราคมถึงมีนาคม พ.ศ. 2566 โดยถั่วลันเตาได้จากกระบวนการเผาชานอ้อยด้วยหม้อไอน้ำยี่ห้อ John Thomson ประเทศอินเดีย ชนิด water tube ที่อุณหภูมิประมาณ 600-800°C และถูกดักจับด้วยระบบ Wet Scrubber จากนั้นนำถั่วลันเตาที่ได้มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 40 Mesh เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคที่สม่ำเสมอ ก่อนนำไปเก็บรักษาในถังอะลูมิเนียมขนาด 200 ลิตร สำหรับกากน้ำตาลนั้นเก็บจาก Lot การผลิตเดียวกัน โดยมีค่าความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ (%Brix) ประมาณ 80% และมีปริมาณน้ำตาลรวม (Total Sugar) ประมาณ 50% โดยน้ำหนัก บรรจุในถังพลาสติกทึบแสงชนิด HDPE ขนาด 20 ลิตร จำนวน 6 ถัง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อคงคุณภาพของวัตถุดิบให้เหมาะสม

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ส่วน A การศึกษากระบวนการกระตุ้นเถ้าลอยจากขานอ้อยด้วยวิธีทางกายภาพ

1.1 การผลิตถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอย โดยใช้การกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อน โดยนำเถ้าลอยใส่ในถ้วยเผาและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปเผาในเตาเผา Sybron/Thermolyne Type 1500, USA ที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C (Sekirifa *et al.*, 2013) เป็นเวลา 0-200 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 20 นาที จำนวน 5 ซ้ำ หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการเผาและคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่คงเหลือ

1.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ 2 วิธี คือ

1) การทดสอบความสามารถในการดูดซับ ไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM (ASTM International, 2011) D 4607-94 ซึ่งการทดสอบใช้วิธีการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต เพื่อคำนวณปริมาณการดูดซับไอโอดีนของตัวอย่าง 2) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องมือวัดค่า BET ตามมาตรฐาน ISO 9277 ซึ่งจะใช้เฉพาะตัวอย่างที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดจากแต่ละอุณหภูมิ ทั้งที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างเถ้าลอยก่อนการเผา การดำเนินการทั้งสองวิธีดังกล่าวจะช่วยประเมินผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

2. ส่วน B กระบวนการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีากน้ำตาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เองจากเถ้าลอย

2.1 การทดลองเบื้องต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการลดค่าสีของกากน้ำตาล โดยกำหนดอุณหภูมิในการทดลองไว้ที่ 75°C, 85°C และ 95°C และกำหนดปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการ

ดูดซับ (dosage) เป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก (w/w) ดังแสดงใน Table 1 การออกแบบนี้ครอบคลุมช่วงของเงื่อนไขที่คาดว่าจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพื่อนำไปสู่การกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสม (t_1 , t_2 , t_3) สำหรับการทดลองหลัก โดยมุ่งเน้นหาค่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (optimization) ภายใต้การใช้เวลาและทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 การออกแบบการทดลองหลัก ตามรายละเอียด ดังแสดงใน Table 2 ดำเนินการโดยใช้เทคนิค Box-Behnken Design (BBD) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองเชิงสถิติที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาผลของตัวแปรอิสระหลายปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน โดยใช้จำนวนชุดการทดลองน้อยกว่าการออกแบบแบบ Full Factorial Design แต่ยังสามารถวิเคราะห์แนวโน้มและพฤติกรรมของระบบได้อย่างแม่นยำ (Ferreira *et al.*, 2007) ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยปริมาณถ่านกัมมันต์ (Dosage), อุณหภูมิ (Temperature) และเวลา (Time) โดยกำหนดไว้ที่ 3 ระดับในแต่ละปัจจัย (-1, 0, +1)

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab Statistical Software Version 21.1.0 (USA) เวอร์ชันทดลองใช้ (Free Trial) ซึ่งมีระยะเวลาการใช้งาน 30 วัน สำหรับการประมวลผลข้อมูลเชิงสถิติและตรวจสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปร หลังจากนั้นผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) โดยใช้โปรแกรม RStudio Cloud ซึ่งเป็นเวอร์ชันออนไลน์ที่เปิดให้ใช้งานฟรี โปรแกรมถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและผลลัพธ์ โดยได้รับความนิยมในการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) และการวิเคราะห์เชิงพหุคูณ โดยสามารถประมวลผลข้อมูล สร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างเป็น

ระบบ ช่วยให้สามารถตีความผลการทดลองและหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยแบบจำลองสมการพหุนามลำดับสอง (Second-order Polynomial Model) ดังสมการ :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} X_i X_j$$

โดยที่ Y : การลดค่าสี (ตัวแปรตาม) X_1 : ปริมาณ (Dosage) X_2 : อุณหภูมิ (Temperature) X_3 : เวลา (Time) $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ

ในแบบแผน Box-Behnken Design ค่าตัวแปร X_1, X_2, X_3 จะไม่ใช่ค่าจริงโดยตรง แต่จะแปลงเป็นค่ารหัส (coded values) ได้แก่ -1, 0 และ +1 ซึ่งแทนค่าระดับต่ำ กลาง และสูงของแต่ละปัจจัยตามลำดับ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยได้อย่างเท่าเทียมโดยไม่ขึ้นกับหน่วยหรือขนาดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังศึกษาคุณสมบัติของกากน้ำตาลที่เปลี่ยนแปลงหลังจากดูดซับ โดยอ้างอิงวิธีการ ICUMSA (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis)

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกากน้ำตาลหลังผ่านการดูดซับ ครอบคลุมพารามิเตอร์หลัก 5 รายการตามมาตรฐาน ICUMSA Method ดังนี้

(1) ค่าสี วัดตามมาตรฐาน ICUMSA Method GS1/3-7 (2011) โดยเตรียมตัวอย่างให้มีค่า pH 7.0 $\pm$ 0.1 ด้วยสารละลาย NaOH หรือ HCl และเจือจางให้มีความเข้มข้น 50 %Brix จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 นาโนเมตรด้วยเครื่อง Spectrophotometer นำค่ามาคำนวณค่าสีด้วยสูตร : ค่าสี (ICU) = (ค่าการดูดกลืนแสง $\times$ 1000) / (ความเข้มข้น $\times$ ความยาวเซลล์) (2) ค่า %Brix วัดตาม ICUMSA Method GS4-15 (1994) โดยใช้เครื่อง Digital Refractometer ควบคุมอุณหภูมิที่ 20°C $\pm$ 0.1°C (3) ค่า pH วัดตาม ICUMSA Method GS1/2/3/4/7/8/9-23 (2009) โดยใช้ pH meter ที่สอบเทียบด้วยบัฟเฟอร์ pH 4.0 และ 7.0 วัดค่าที่อุณหภูมิ 20°C $\pm$ 0.1°C จากตัวอย่างที่เจือจาง 50 %Brix (4) ค่าปริมาณน้ำตาลรวม (TSAI) วัดตาม ICUMSA Method GS4/3-7 (2011) โดยใช้ไฮโดรไลซ์ตัวอย่างด้วยกรด จากนั้นไทเทรตกับสารละลาย Fehling's solution (5) ค่าความขุ่น (Turbidity) วัดตาม ICUMSA Method GS2/3-18 (2007) โดยใช้หลักการวัดการกระเจิงของแสงจากอนุภาคแขวนลอยในตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 860 นาโนเมตร โดยค่าที่ได้รายงานในหน่วย NTU หรือ ICU ตามเครื่องมือที่ใช้

Table 1 Factors studied in Box-Behnken Design

Independent variable	Symbol	Level		
		Low (-1)	Middle (0)	High (+1)
Dosage (%)	X1	10	20	30
Temp (°C)	X2	75	85	95
Time (min)	X3	t 1	t 2	t 3

Table 2 Box- Behnken design

Run	Dosage (%)	Temp (°C)	Time (min)	Coded Dosage (%)	Coded Temp (°C)	Coded Time (min)
1	10	75	t 2	-1	-1	0
2	30	75	t 2	1	-1	0
3	10	95	t 2	-1	1	0
4	30	95	t 2	1	1	0
5	10	85	t 3	-1	0	1
6	30	85	t 3	1	0	1
7	10	85	t 1	-1	0	-1
8	30	85	t 1	1	0	-1
9	20	75	t 3	0	-1	1
10	20	95	t 3	0	1	1
11	20	75	t 1	0	-1	-1
12	20	95	t 1	0	1	-1
13	20	85	t 2	0	0	0
14	20	85	t 2	0	0	0
15	20	85	t 2	0	0	0

ผล

ส่วน A ผลการกระตุ้นเถ้าลอยจากขาน้อย

1. ผลของอุณหภูมิและเวลา ต่อ น้ำหนักเถ้าคงเหลือหลังเผา (%Yield)

การศึกษาผลของการเผากระตุ้นเถ้าลอยที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C เป็นเวลา 0-200 นาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 20 นาที เพื่อวิเคราะห์น้ำหนักคงเหลือแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้นส่งผลให้น้ำหนักเถ้าลอยลดลง ดังแสดงใน Figure 1 โดยที่ 700°C ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 15.05±0.03 g ลดลงอย่างต่อเนื่องถึง 12.56±0.05 g ที่ 160 นาที หลังจากนั้นตั้งแต่ 180-200 นาที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ 900°C น้ำหนักลดลงเร็วกว่าและมีนัยสำคัญจาก 15.05±0.03 g ที่เวลาเริ่มต้น ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 12.53±0.05 g ที่ 80 นาที หลังจาก

นั้นในช่วง 100-200 นาที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีการกระตุ้นทางความร้อนและทฤษฎีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน โดยในช่วงแรกความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยและสารอินทรีย์ ส่งผลให้น้ำหนักลดลงและเกิดรูพรุน เมื่อถึงจุดหนึ่ง อัตราการลดลงของน้ำหนักจะช้าลงเนื่องจากสารระเหยส่วนใหญ่ถูกกำจัด แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า (900°C) การลดลงของน้ำหนักเกิดขึ้นเร็วกว่าและเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิต่ำกว่า (700°C) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีที่อธิบายว่าอุณหภูมิสูงจะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น การลดลงของน้ำหนักหลังจุดคงที่อาจเกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างคาร์บอน แต่เกิดช้าและไม่คุ้มค่าในแง่พลังงานและเวลา ดังนั้น จุดที่น้ำหนักเริ่มคงที่จึงเป็นจุดที่

เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นเถ้าลอย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชินธัญญ์ และคณะ (2561) นอกจากนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในช่วงแคบ (± 0.03 ถึง ± 0.22 g) สะท้อนถึงความแม่นยำของผลการทดลอง ขณะที่ด้วยกำลังที่แตกต่างกัน (a-f) แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของค่าน้ำหนักคงเหลือในแต่ละ

ช่วงเวลา โดยผลการเปรียบเทียบดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ร่วมกับการทดสอบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งยืนยันได้ว่าค่าที่มีด้วยกำลังต่างกันมีความแตกต่างกันจริงในเชิงสถิติ

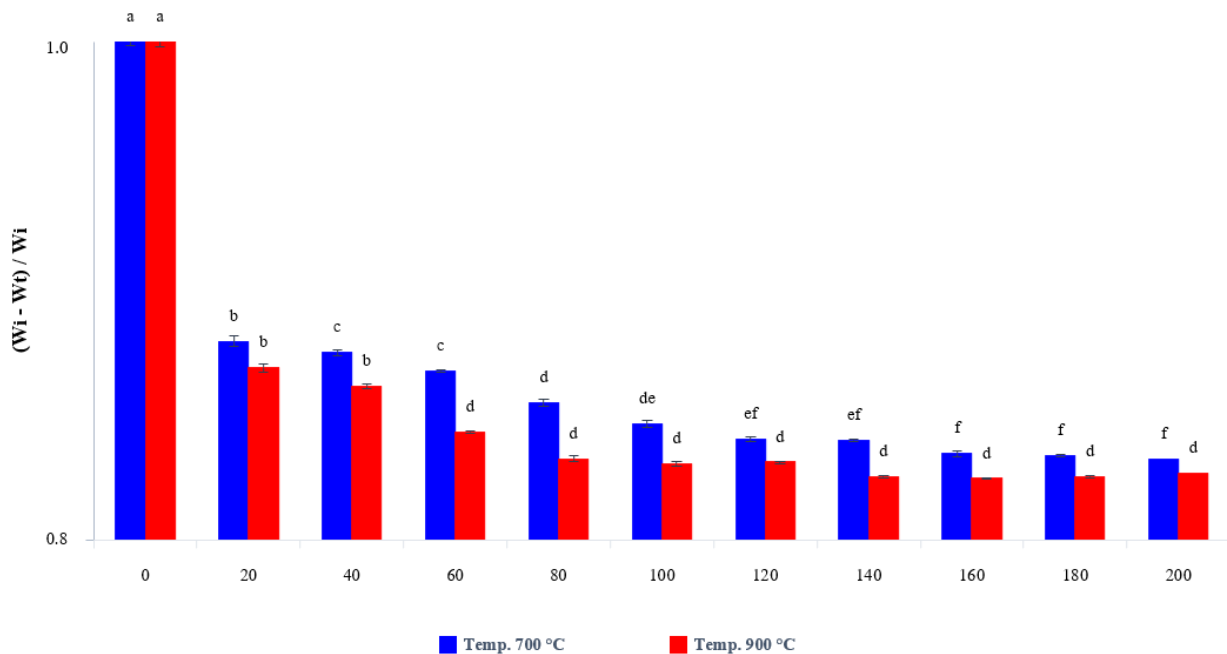


Figure 1 Weight of fly ash after combustion at temperatures of 700 °C and 900 °C for durations of 0-200 minutes

Wi : weight before burning, Wt : weight after burning at different times.

Bars marked with different superscript letters (a-f) indicate significant differences among means at $p < 0.05$, according to Duncan's multiple range test (DMRT).

2. ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของเถ้าลอยหลังผ่านการเผากระตุ้น

การประเมินสมรรถนะของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเถ้าลอยขานอ้อยหลังการเผากระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิการกระตุ้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงใน Figure 2 โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 92.04 ± 8.53 mg/g เป็นค่าสูงสุดที่ 328.94 ± 6.55 mg/g ภายในเวลาเพียง 80 นาที ก่อนจะ

ลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงอยู่ในระดับสูงกว่า 267.47 ± 3.23 mg/g ตลอดช่วงเวลา 100–200 นาที ในทางตรงกันข้าม ที่ 700°C มีการเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป โดยเริ่มจาก 92.04 ± 8.53 mg/g เช่นกัน แต่ใช้เวลาถึง 180 นาทีเพื่อถึงจุดสูงสุดที่ 251.68 ± 5.62 mg/g ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่ช้ากว่าเนื่องจากพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญในทุกช่วงเวลา แสดงให้เห็นว่าการเผากระตุ้นที่ 900°C ไม่เพียงให้ความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าเท่านั้น แต่ยังมีประสิทธิภาพในแง่ของเวลาด้วย โดยสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้เร็วและมากกว่า นอกจากนี้ ผลการศึกษา ยังพบ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแฉะคองเหลือและความสามารถในการดูดซับ โดยช่วงเวลาที่น้ำหนักเริ่มคงที่ (80 นาที ที่ 900°C และ 180 นาที ที่ 700°C) สอดคล้องกับช่วงที่ค่าการดูดซับไอโอดีนอยู่ในระดับสูงสุด แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียน้ำหนักเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญของกระบวนการพัฒนาโครงสร้างดูดซับ และจุดดังกล่าวจึงถือเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดการเผากระตุ้นเพื่อให้ได้สมรรถนะสูงสุดอย่างมี

ประสิทธิภาพทั้งในด้านพลังงานและเวลา ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับงานของ สุภาพร และคณะ (2557) ซึ่งรายงานไว้ว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกมังคุดเกิดขึ้นในช่วงที่น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและหลักเกณฑ์ที่สามารถใช้ประเมินจุดเหมาะสมของการเผากระตุ้นได้อย่างแม่นยำ ทั้งในด้านของคุณภาพผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

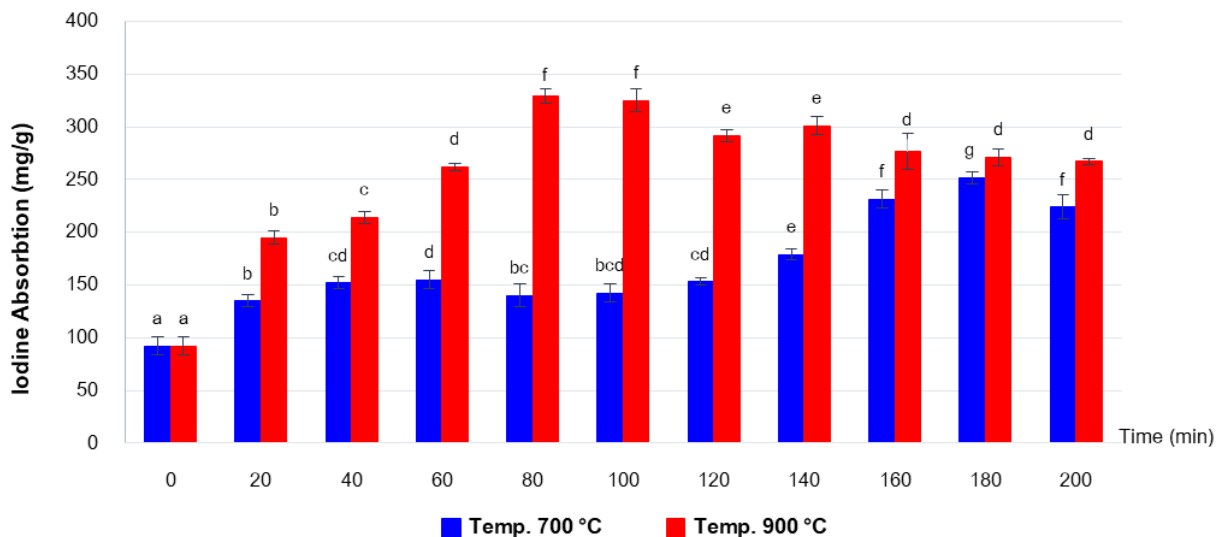


Figure 2 Iodine adsorption of fly ash at temperatures of 700 °C and 900 °C for durations of 0-200 minutes

Bars marked with different superscript letters (a–f) indicate significant differences among means at $p < 0.05$, according to Duncan's multiple range test (DMRT).

3. พื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุน

จากการวิเคราะห์ผลการดูดซับไอโอดีน ดังแสดงใน Table 3 ตัวอย่างแฉะคองก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 180

นาที และ 900°C เป็นเวลา 80 นาที ถูกนำมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิค BET เพื่อหาพื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดรูพรุน (Pore size) และปริมาตรรูพรุน (Pore volume)

Table 3 Analysis of Surface Area, Pore Size, and Pore Volume of Fly Ash using BET Method

Type of Ash	Surface Area (m ² /g)	Pore Size (nm)	Pore Volume (cm ³ /g)
Ash before burning	16.2702±0.0177	16.7245	0.0352
Ash burned at 700 °C for 180 minutes	53.5023±0.0185	9.6980	0.0521
Ash burned at 900 °C for 80 minutes	80.2001±0.0375	7.4567	0.0549

Note: Deviation (±) of the surface area value is an indication of the uncertainty of the instrument.

ผลการศึกษาด้วยเทคนิค BET พบว่าการกระตุ้นเถ้าลอยด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 700°C และ 900°C ส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 16.27 m²/g (ก่อนเผา) เป็น 53.50 m²/g และ 80.20 m²/g ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้เกิดจากกระบวนการสลายตัวของสารอินทรีย์ (thermal decomposition) ภายในเถ้าลอย ซึ่งก่อให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อนมากขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งความร้อนสูงเร่งให้เกิดการเปิดของรูพรุนที่เคยอุดตัน และส่งเสริมการจัดเรียงตัวใหม่ของซิลิกาและอลูมิโนซิลิกेटภายในเถ้าลอย นำไปสู่การสร้างโครงข่ายของรูพรุนขนาดเล็กในลักษณะสามมิติ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานของ อลิสร่า (2553) ที่ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมีย โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้นมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน แม้จะใช้เวลาการเผาที่สั้นลงก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sutthasupa *et al.* (2023) เรื่องการผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยโดยใช้การกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าพื้นที่ผิว BET สูงสุดอยู่ที่ 489 m²/g สาเหตุของความแตกต่างเหล่านี้อาจมาจากการกระตุ้น อุณหภูมิและเวลาในการกระตุ้น รวมถึงเงื่อนไขของการคาร์บอน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและปริมาตรของถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยลดลงจาก 16.7245 nm (ก่อนเผา) เหลือ 9.6980 nm ที่ 700°C และ 7.4567 nm ที่ 900°C ขณะที่ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.0352 cm³/g เป็น 0.0521 cm³/g และ 0.0549 cm³/g ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงการสร้างรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากแม้ขนาดรูพรุนลดลง ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทางความร้อน เช่น การเกิดผลึก (crystallization), การหลอมรวมบางส่วน (sintering) และการเปลี่ยนเฟสของซิลิกาและอะลูมินา (Phothong, 2021) ปฏิกริยาเหล่านี้ทำให้โครงสร้างภายในซับซ้อนยิ่งขึ้น และก่อให้เกิดเครือข่ายรูพรุนขนาดเล็กทั้งแบบมีโซพอร์และไมโครพอร์จำนวนมาก (Yalçın & Sevinç, 2000) เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวและ

ขนาดรูพรุน วัสดุถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จัดเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนแบบมีโซพอร์ (mesoporous) แม้ว่าค่าพื้นที่ผิวโดยรวมจะไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุจากงานวิจัยอื่นที่คล้ายกัน แต่โครงสร้างลักษณะนี้ถือว่าเหมาะสมต่อวัตถุประสงค์ (fit-for-purpose) สำหรับการดูดซับโมเลกุลสารให้สีขนาดใหญ่ในกากน้ำตาล เนื่องจากรูพรุนขนาดกลางเอื้อต่อการแพร่กระจายและการยึดเกาะของโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดีกว่าโครงสร้างไมโครพอร์ที่มีช่องว่างเล็กเกินไป

ส่วน B ผลการลดค่าสีกากน้ำตาลโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเถ้าลอย

1. การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาเวลาที่เหมาะสม ในการลดค่าสีของกากน้ำตาล

การทดลองเบื้องต้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการลดค่าสีของกากน้ำตาลด้วยถ่านกัมมันต์ โดยพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณถ่านกัมมันต์ (10%, 20% และ 30% w/w) และอุณหภูมิ (75°C, 85°C และ 95°C) ภายใต้ช่วงเวลากการดูดซับ 0–90 นาที ดังแสดงใน Table 4 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มทั้งปริมาณถ่านกัมมันต์และอุณหภูมิช่วยให้การลดค่าสีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่ภาวะคงที่ได้เร็วขึ้น โดยในกรณีใช้ถ่านกัมมันต์ 10% w/w ค่าสีลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่เวลา 80 นาที ทุกช่วงอุณหภูมิมีค่าประมาณ 136,254±1,945 (75°C), 128,547±1,862 (85°C) และ 130,248±1,831 (95°C) ICU ขณะที่การใช้ถ่านกัมมันต์ 20% w/w ทำให้ค่าสีเริ่มคงที่เร็วขึ้นที่เวลา 60 นาที จาก 2 ใน 3 ของช่วงอุณหภูมิโดยมีค่าอยู่ที่ 133,524±2,170 (75°C), 129,300±1,081 (85°C) และ 135,478±1,084 (95°C) ICU ส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ 30% w/w แสดงผลการลดค่าสีได้เร็วที่สุด โดยเข้าสู่ภาวะคงที่ตั้งแต่เวลา 40 นาที และมีค่าคงจาก 2 ใน 3 ของช่วงอุณหภูมิที่ประมาณ 130,285±1,191 (75°C), 132,016±984 (85°C) และ 133,588±832 (95°C) ICU ซึ่งค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 50–90 นาที ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายโอนมวลและ

หลักการดูดซับที่ระบุว่า การเพิ่มปริมาณและอุณหภูมิ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและพลังงานจลน์ของโมเลกุล ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น (พรศุภรัตน์ และคณะ, 2556) อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลการดูดซับ อัตราการดูดซับและการคายซับจะเท่ากัน ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของสีไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงภาวะอิ่มตัวของตัวดูดซับ

จากผลการทดลองเบื้องต้นในการลดค่าสีของกากน้ำตาลด้วยถ่านกัมมันต์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ของอุณหภูมิและปริมาณถ่านกัมมันต์ พบว่าอัตราการลดค่าสีมีความสัมพันธ์โดยตรงกับทั้งอุณหภูมิและปริมาณของตัวดูดซับ ข้อมูลเหล่านี้จึงถูกนำไปใช้ในการกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการทดลองหลัก โดยเลือกช่วงเวลาเป็น 3 ระดับ ได้แก่ t1 (40 นาที), t2 (60 นาที)

และ t3 (80 นาที) ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาที่พบว่าการดูดซับใกล้เคียงหรือเข้าสู่สมดุล ทั้งนี้ เพื่อนำค่ามาออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken 3 ปัจจัย 3 ระดับ ดังแสดงใน Table 5 โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดลองหลัก ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (% w/w), อุณหภูมิ (°C) และเวลา (นาที) สำหรับกากน้ำตาลที่ใช้ในการทดลอง (Run 0) มีคุณสมบัติเบื้องต้นก่อนดูดซับ ได้แก่ ค่าสี 208,139±2335 ICU, ค่า pH 4.79±0.01, ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด (%Brix) 70.81±0.15%, ปริมาณน้ำตาลรวม (TSAI) 50.72±0.48% และค่าความขุ่น (Turbidity) 33.66±1.31 ICU จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถั่วลยซึ่งผ่านกระบวนการเผากระตุ้น มาใช้ในการดูดซับกากน้ำตาลภายใต้สภาวะการทดลองที่ออกแบบไว้

Table 4 Molasees color after Adsorption at Dosages of 10%, 20%, 30% (w/w) under Temperatures of 75 °C, 85 °C, 95 °C at 0–90 Minutes

Time (min)	Dosage 10%			Dosage 20%			Dosage 30%		
	Temp 75 °C	Temp 85 °C	Temp 95 °C	Temp 75 °C	Temp 85 °C	Temp 95 °C	Temp 75 °C	Temp 85 °C	Temp 95 °C
0	192,215±3229 ^a	191,929±2279 ^a	196,151±2579 ^a	190,254±2270 ^a	192,544±6605 ^a	197,050±1173 ^a	185,642±1593 ^a	179,250±1242 ^a	188,410±1149 ^a
10	192,100±2199 ^a	188,480±2098 ^b	202,000±2167 ^b	186,543±2370 ^a	174,200±1277 ^b	178,520±1154 ^b	164,250±1347 ^b	160,258±1249 ^b	168,523±1421 ^b
20	186,477±2175 ^b	179,587±1951 ^c	185,422±2207 ^c	168,523±2378 ^b	163489±1072 ^c	171,500±1436 ^c	138,520±1172 ^c	135,620±1369 ^c	142,014±1432 ^d
30	164,000±2103 ^c	156,688±2005 ^d	164,253±2191 ^d	150,254±2773 ^c	144,560±1171 ^d	148,520±2799 ^d	125,631±1184 ^f	130,778±1003 ^{def}	145,603±1162 ^c
40	157,636±1958 ^d	152,235±2042 ^e	152,014±2005 ^e	142,536±2167 ^d	133,026±1092 ^e	140,535±1130 ^e	130,285±1191 ^e	132,016±984 ^d	133,588±832 ^h
50	155,024±2032 ^d	140,520±2003 ^f	145,012±1940 ^f	132,596±2107 ^d	131,025±1261 ^f	138,542±1025 ^f	128,967±1146 ^e	129,645±1079 ^{ef}	142,500±1242 ^d
60	143,520±1894 ^e	132,547±1955 ^{gh}	138,574±1913 ^g	133,524±2170 ^e	129,300±1081 ^{gh}	135,478±1084 ^g	132,540±1179 ^d	131,059±1073 ^{de}	138,520±1170 ^f
70	140,254±1827 ^e	135,241±1935 ^g	134,258±1836 ^h	131,025±810 ^e	132,050±963 ^g	132,050±1102 ^h	130,022±1154 ^e	131,258±944 ^{de}	139,684±409 ^{ef}
80	136,254±1945 ^f	128,547±1862 ⁱ	130,248±1831 ⁱ	130,020±2056 ^f	130,840±1133 ⁱ	135,310±1071 ⁱ	131,254±1241 ^{de}	128,954±878 ^f	136,529±1149 ^g
90	133,547±1878 ^f	129,483±1817 ^{hi}	132,014±1837 ^{hi}	129,653±2085 ^f	130,562±1116 ^{hi}	135,820±1232 ^{hi}	129,630±1163 ^e	129,852±1036 ^{ef}	141190±1028 ^{de}

Note: Values are expressed as mean ± standard deviation. Values with different lowercase letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

Table 5 Factors Affecting Color Reduction in Molasses Using Box-Behnken Design

Independent variable	Symbol	Level		
		Low (-1)	Middle (0)	High (+1)
Dosage (%)	X ₁	10	20	30
Temp (°C)	X ₂	75	85	95
Time (min)	X ₃	40	60	80

ผลการทดลอง ดังแสดงใน Table 6 แสดงให้เห็นว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีและปรับปรุงคุณสมบัติของกากน้ำตาล ส่งผลให้ค่าสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์อื่น ๆ เช่น pH, Brix,

TSAI และ Turbidity ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป โดยเน้นวิเคราะห์แนวโน้ม ผลกระทบของแต่ละปัจจัย และความสัมพันธ์เชิงสถิติจากแบบจำลอง Box-Behnken Design แบบ 3 ปัจจัย 3 ระดับ

Table 6 Color and Properties of Molasses after Adsorption Using the Box–Behnken Design Experimental Method

Run	Doses (%)	Temp (°C)	Time (min)	Color (ICU)	pH	% Brix (%)	TSAI (%)	Turbidity (ICU)
0	-	-	-	208,139±2335 ^a	4.79±0.01 ^a	70.81±0.15 ^a	50.72±0.48 ^b	33.66±1.31 ^a
1	10	75	60	144,354±333 ^c	4.24±0.01 ^e	72.44±0.01 ^b	52.34±0.10 ^e	29.56±0.03 ^b
2	30	75	60	133,715±852 ^{gh}	4.54±0.01 ^b	80.25±0.01 ^l	51.39±0.06 ^{bc}	24.35±0.02 ^h
3	10	95	60	137,371±4331 ^{ef}	4.28±0.02 ^e	72.51±0.01 ^d	52.49±0.04 ^e	29.32±0.02 ^b
4	30	95	60	135,022±4333 ^{fg}	4.55±0.02 ^b	82.28±0.01 ⁿ	50.41±0.06 ^a	25.20±0.02 ^g
5	10	85	80	128,947±1083 ^{ij}	4.25±0.03 ^e	72.46±0.01 ^c	53.39±0.06 ^h	28.69±0.01 ^c
6	30	85	80	127,254±1392 ⁱ	4.55±0.02 ^b	81.58±0.01 ^{lm}	50.28±0.05 ^a	24.79±0.01 ^{gh}
7	10	85	40	152,720±1472 ^b	4.23±0.02 ^e	73.01±0.02 ^e	51.17±0.06 ^{bc}	29.16±0.02 ^{bc}
8	30	85	40	131,276±855 ^{hi}	4.58±0.02 ^b	81.67±0.01 ^m	50.42±0.07 ^a	24.75±0.02 ^{gh}
9	20	75	80	130,281±1285 ^{hij}	4.44±0.02 ^c	78.69±0.01 ⁱ	52.31±0.06 ^d	26.54±0.02 ^d
10	20	95	80	136,210±612 ^{efg}	4.45±0.02 ^c	79.46±0.01 ^j	52.07±0.07 ^{cd}	26.51±0.03 ^{de}
11	20	75	40	141,503±716 ^{cd}	4.42±0.02 ^{cd}	78.24±0.01 ^f	52.53±0.07 ^e	25.82±0.02 ^f
12	20	95	40	139,543±526 ^{de}	4.46±0.02 ^c	79.63±0.01 ^k	52.03±0.05 ^{cd}	25.92±0.03 ^{ef}
13	20	85	60	127,422±1632 ^j	4.38±0.03 ^d	78.57±0.01 ^h	52.58±0.08 ^f	26.38±0.03 ^{def}
14	20	85	60	130,351±1565 ^{hij}	4.42±0.02 ^{cd}	78.54±0.00 ^g	52.80±0.03 ^g	26.25±0.02 ^{def}
15	20	85	60	129,455±664 ^{ij}	4.44±0.02 ^{cd}	78.61±0.01 ^{hi}	52.05±0.04 ^{cd}	26.18±0.02 ^{def}

Note: Values are expressed as mean ± standard deviation. Values with different lowercase letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$)

2. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของกากน้ำตาลหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากถั่วลันเตา

2.1 การเปลี่ยนแปลงของค่าสี (Color) จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 10% เป็น 30% w/w ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดค่าสีของกากน้ำตาลได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของกากน้ำตาลก่อนดูดซับ (Run 0: 208,139±2,335 ICU) ค่าสีลดลงในทุกสภาวะการทดลอง เช่น ที่ 75°C เวลา 60 นาที ค่าสีลดลงจาก

144,354±333 (10%) run 1 เหลือ 133,715±852 ICU (30%) ใน run2 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Langmuir (1918) และ Freundlich (1906) ที่อธิบายว่าการเพิ่มตัวดูดซับช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและจุดดูดซับ ทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสี แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 75°C เป็น 95°C ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ไม่เหมือนกันแตกต่างกันในแต่ละสภาวะ มี 2 สภาวะที่ค่าสีลดลง

และ 2 สภาวะที่ค่าสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 75°C เป็น 95°C ผลค่าสีลดลง เช่น Run 1 กับ Run 3 (Dosage 10% w/w และเวลา 60 นาที) ค่าสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จาก 144,354±333 ICU เป็น 137,371±4331 ICU, Run 11 กับ Run 12 (Dosage 20% w/w และเวลา 40 นาที) ค่าสีลดลงเล็กน้อยจาก 141,503±716 ICU เป็น 139,643±526 ICU ในทางกลับกัน บางกรณีค่าสีกลับเพิ่มขึ้น เช่น Run 2 กับ Run 4 (Dosage 30% w/w และเวลา 60 นาที) ค่าสีเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 133,715±852 ICU เป็น 135,022±4333 ICU, แต่ที่ Run 9 กับ Run 10 (Dosage 20% w/w และเวลา 80 นาที) ค่าสีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 130,281±1285 ICU เป็น 136,210±612 ICU, ผลการทดลองนี้สะท้อนถึงความซับซ้อนของกระบวนการดูดซับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลมีพลังงานจลน์สูงขึ้น ทำให้เกิดการชนกันระหว่างสารให้สีกับผิวถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน การดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) ซึ่งอุณหภูมิสูงอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อเกินระดับที่เหมาะสม นอกจากนี้ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารให้สี เช่น การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด

สำหรับการศึกษาผลของเวลาต่อค่าสี แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาจาก 40 นาที เป็น 80 นาที ส่งผลต่อการลดลงของค่าสีทุกสภาวะการทดลอง เช่น Run 7 กับ Run 5 (10% w/w, 85°C) ค่าสีลดลงจาก 152,720±1,472 เป็น 128,947±1,083 ICU และ Run 8 กับ Run 6 (30% w/w, 85°C) ค่าสีลดลงจาก 131,276±855 เป็น 127,254±1,392 ICU ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีจลนพลศาสตร์การดูดซับที่อธิบายว่าการเพิ่มเวลาทำให้โมเลกุลของสารให้สีมีโอกาสสัมผัสและดูดซับกับผิวของถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงก่อนเข้าสู่สมดุล

เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ และเวลา พบว่าการเพิ่มทั้งสามปัจจัยพร้อมกันส่งผลเสริมกัน (synergistic effect) ต่อ

ประสิทธิภาพในการลดค่าสีของกากน้ำตาลอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น Run 1 (10% w/w, 75°C, 60 นาที) มีค่าสี 144,354±333 ICU ขณะที่ Run 6 (30% w/w, 85°C, 80 นาที) ค่าสีลดลงเหลือ 127,254±1,392 ICU อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีเฉลี่ยของ Run 13–15 (20% w/w, 85°C, 60 นาที) ที่มีค่าเฉลี่ย 129,076±1,754 ICU พบว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 20% เป็น 30% และเวลาเป็น 80 นาที ช่วยลดค่าสีได้เพียงเล็กน้อย สะท้อนถึงแนวโน้มของระบบที่เข้าใกล้สมดุล การดูดซับซึ่งประสิทธิภาพจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงควรพิจารณาจุดสมดุลระหว่างประสิทธิภาพการลดสีและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด

2.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มข้นของแข็งที่ละลายได้ (%Brix) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ค่า %Brix ของกากน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในทุกสภาวะ โดยมีปัจจัยหลักคือปริมาณถ่านกัมมันต์และอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลชัดเจนมากกว่าระยะเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับเริ่มต้น 70.81±0.15% (Run 0) พบว่าทุกสภาวะการทดลอง (Run 1-15) มีค่า %Brix สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ที่อุณหภูมิ 75°C และเวลา 60 นาที ค่า %Brix เพิ่มขึ้นจาก 72.44±0.01% (Run 1, 10% w/w) เป็น 80.25±0.01% (Run 2, 30% w/w) แสดงถึงผลของการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ช่วยดูดซับน้ำอิสระหรือตรึงน้ำบางส่วนไว้ในโครงสร้างของตัวดูดซับ ทำให้ %Brix เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมียังมีผลเสริม เช่น Run 2 กับ Run 4 (30% w/w, 75°C เป็น 95°C) ค่า %Brix เพิ่มขึ้นจาก 80.25±0.01% เป็น 82.28±0.01% ซึ่งสอดคล้องกับสมการ Arrhenius ที่อธิบายว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยลดความหนืดของสารละลายและเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Arrhenius, 1889) ส่งผลให้การดูดซับมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สำหรับผลของระยะเวลา พบว่ามีผลน้อยกว่าแต่ยังคงมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่น Run 11 กับ Run 9 (20% w/w, 75°C, 40 เป็น 80 นาที)

ค่า %Brix เพิ่มขึ้นจาก $78.24 \pm 0.01\%$ เป็น $78.69 \pm 0.01\%$ โดยรวมแล้ว แสดงให้เห็นว่าการควบคุมปริมาณถ่านกัมมันต์และอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่า %Brix ของกากน้ำตาลอย่างชัดเจน (Yang & Al-Duri, 2005)

2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ค่า pH ของกากน้ำตาลลดลงจากค่าเริ่มต้นที่ 4.79 ± 0.01 (Run 0) เหลือในช่วง 4.23 ± 0.02 – 4.58 ± 0.02 ในทุกสภาวะ ซึ่งเป็นผลจากสองปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) การดูดซับน้ำอิสระโดยถ่านกัมมันต์ ทำให้ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น (Li *et al.*, 2002) และ (2) คุณสมบัติความเป็นด่างของถ่านกัมมันต์เอง (pH ประมาณ 9) ซึ่งจะให้ผลตรงกันข้าม เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 10% เป็น 30% พบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เช่น Run 1 กับ Run 2 (75°C , 60 นาที) ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 4.24 ± 0.01 เป็น 4.54 ± 0.02 และ Run 3 กับ Run 4 (95°C , 60 นาที) ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 4.28 ± 0.02 เป็น 4.55 ± 0.02 แต่ยังต่ำกว่าค่าเริ่มต้น แสดงว่าอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดอินทรีย์มีมากกว่าความเป็นด่างของถ่านกัมมันต์ในการกำหนดค่า pH สุดท้าย ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และ %Brix เช่นใน Run 4 (30%, 95°C , 60 นาที) ที่ให้ค่า pH สูงสุด (4.55 ± 0.02) และค่า %Brix สูงสุด ($82.28 \pm 0.01\%$) ยืนยันว่าการดูดซับน้ำอิสระเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่ม %Brix และส่งผลต่อค่า pH ในขณะที่อุณหภูมิและเวลาให้ผลน้อยกว่าอย่างชัดเจน เช่น Run 11 กับ Run 12 (20%, 40 นาที) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 75°C เป็น 95°C ค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 4.42 ± 0.02 เป็น 4.46 ± 0.02 และ Run 9 กับ Run 11 (20%, 75°C) เพิ่มเวลาจาก 40 เป็น 80 นาที ค่า pH เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจาก 4.42 ± 0.02 เป็น 4.44 ± 0.02 โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ปริมาณถ่านกัมมันต์จึงเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ในระบบนี้

2.4 การเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำตาลรวม (TSAI) ผลการทดลองพบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ค่า TSAI ของกากน้ำตาลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น $50.72 \pm 0.48\%$ (Run 0) โดยสภาวะส่วนใหญ่ (Run 1–15) มีแนวโน้มค่า TSAI เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับน้ำอิสระและสารประกอบโมเลกุลเล็กที่ไม่ใช่น้ำตาล ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาตามสัดส่วน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 10% เป็น 30% w/w ส่งผลให้ค่า TSAI ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในหลายกรณี เช่น Run 1 กับ Run 2 (75°C , 60 นาที) ลดจาก $52.34 \pm 0.10\%$ เป็น $51.39 \pm 0.06\%$, Run 3 กับ Run 4 (95°C , 60 นาที) ลดจาก $52.49 \pm 0.04\%$ เป็น $50.41 \pm 0.06\%$, และ Run 5 กับ Run 6 (85°C , 80 นาที) ลดจาก $53.39 \pm 0.06\%$ เป็น $50.28 \pm 0.05\%$ สะท้อนถึงการดูดซับน้ำตาลบางส่วนโดยถ่านกัมมันต์ ตามกลไกการดูดซับทางกายภาพที่อธิบายว่าถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารได้หลากหลายชนิด ทั้งนี้ ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อค่า TSAI พบว่ามีอิทธิพลน้อยกว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ เช่น Run 11 กับ Run 12 (20%, 40 นาที) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 75°C เป็น 95°C TSAI ลดลงเล็กน้อยจาก $52.53 \pm 0.07\%$ เป็น $52.03 \pm 0.05\%$, หรือ Run 9 กับ Run 11 (20%, 75°C) เมื่อเพิ่มเวลา 40 เป็น 80 นาที TSAI ลดลงเล็กน้อยจาก $52.53 \pm 0.07\%$ เป็น $52.31 \pm 0.06\%$ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลของอุณหภูมิและเวลาไม่แสดงความชัดเจน เนื่องจากน้ำตาล เช่น ซูโครส มีขนาดโมเลกุลใหญ่ จึงแพร่เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ช้ากว่าสารให้สี ส่งผลให้การดูดซับน้ำตาลเกิดขึ้นจำกัด ขณะที่สารให้สีสามารถถูกกำจัดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาเพิ่มขึ้น

2.5 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขุ่น (Turbidity) ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถลดค่าความขุ่น (Turbidity) ของกากน้ำตาลจากค่าเริ่มต้น 33.66 ± 1.31 ICU (Run 0) ได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในทุกสภาวะการทดลอง (Run 1–15) โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือปริมาณถ่านกัมมันต์ เช่น ใน Run 1 และ Run 2 (75°C, 60 นาที) การเพิ่มปริมาณจาก 10% เป็น 30% w/w ทำให้ค่าความขุ่นลดลงจาก 29.56 ± 0.03 ICU เหลือ 24.35 ± 0.02 ICU อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอุณหภูมิส่งผลน้อย เช่น Run 9 กับ Run 10 (20%, 80 นาที) เพิ่มอุณหภูมิจาก 75°C เป็น 95°C ค่าความขุ่นลดลงเล็กน้อยจาก 26.54 ± 0.02 ICU เป็น 26.51 ± 0.03 ICU โดยไม่มีนัยสำคัญ ขณะที่ระยะเวลาแสดงผลอย่างจำกัดแต่นัยสำคัญในบางกรณี เช่น Run 7 กับ Run 5 (10%, 85°C) เพิ่มเวลาจาก 40 เป็น 80 นาที ค่าความขุ่นลดลงจาก 29.16 ± 0.02 ICU เป็น 28.69 ± 0.01 ICU แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอนุภาคแขวนลอย ตามกลไกของการดูดซับทางกายภาพที่อาศัยโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง (Rosenblum *et al.*, 2016) นอกจากนี้ การที่ค่าความขุ่นลดลงต่อเนื่องโดยไม่เกิดการคายซับกลับแม้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือเวลาบ่งชี้ถึงความเสถียรและประสิทธิภาพที่ยั่งยืนของกระบวนการดูดซับ

3. การทำนายคุณสมบัติกากน้ำตาล ด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM)

การวิเคราะห์เชิงสถิติโดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย ได้แก่ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (X_1), อุณหภูมิ (X_2) และเวลา (X_3) ต่อคุณสมบัติของกากน้ำตาลหลังการดูดซับ ได้แก่ ค่าสี pH, %Brix, TSI และความขุ่น (Turbidity) โดยสร้างแบบจำลอง

สมการพหุนามลำดับที่สองด้วยโปรแกรม R และแปลงค่าตัวแปรเป็นค่า coded (-1 ถึง +1) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินผล ทั้งนี้ แบบจำลองได้คัดเลือกตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) และตัดตัวแปรที่ไม่มีผลออกเพื่อลดความซับซ้อนและหลีกเลี่ยงปัญหา overfitting ผลลัพธ์จากแบบจำลองที่แสดงใน Table 7 มีความน่าเชื่อถือ และสามารถสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Figure 4–8) เพื่อแสดงผลกระทบเชิงเดี่ยวและเชิงปฏิสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยได้อย่างชัดเจน การใช้ RSM ยังสะท้อนถึงศักยภาพในการพัฒนาเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการ เนื่องจากการปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น การลดค่าสีและความขุ่น ช่วยยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ เพิ่มความสามารถในการแข่งขัน (Belouafa *et al.*, 2022) และลดภาระกระบวนการกรอง (Ogando *et al.*, 2021) ขณะที่การเพิ่มค่า %Brix มีส่วนช่วยลดพลังงานในการระเหยและต้นทุนการขนส่ง พร้อมเพิ่มมูลค่าทางการตลาดของผลิตภัณฑ์ (Madaeni & Zeresghi, 2010) สำหรับบริบทในประเทศไทย งานวิจัยโดย Nachat *et al.* (2014) พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยสามารถลดค่าสีในน้ำเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้คุณภาพผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเคมีนำเข้า ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการผลิตอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมน้ำตาลไทย ดังนั้น การประยุกต์ใช้แบบจำลอง RSM จึงมีศักยภาพทั้งในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Table7 Equation Representing the Relationship of Molasses Properties after Adsorption Using Activated Carbon

Response	Equation model	Equation no.	Adj-R ²	P-value
Color	$= 129.0767 - 4.515 X_1 - 5.2938 X_3 + 4.9350 X_1X_3 + 5.1854X_2^2$	(1)	0.8004	0.0211
%Brix	$= 78.5733 + 4.4125 X_1 + 0.5325 X_2 + 0.4900 X_1X_2 - 1.7717 X_1^2 + 0.3633 X_3^2$	(2)	0.998	$2.673e^{-7}$
pH	$= 4.4133 + 0.1525 X_1$	(3)	0.9611	0.0004
TSAI	$= 52.4767 - 0.8613X_1 - 0.5900 X_1X_3 - 0.8696 X_1^2$	(4)	0.7707	0.0290
Turbidity	$= 26.2700 - 2.2050 X_1 + 0.7438X_1^2$	(5)	0.9625	0.0004

Note. Xi: coded value (-1 to +1) by $X_i = (\text{actual value} - \text{center point value}) / (\text{step change})$

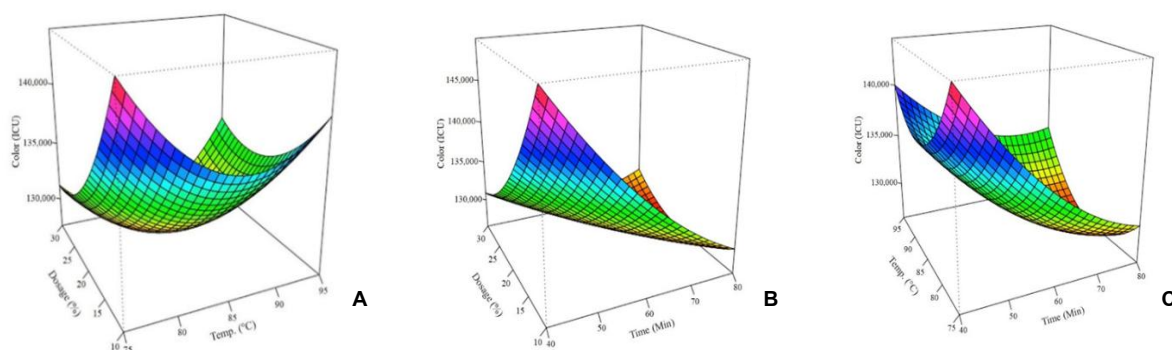


Figure 4 Response surface of Color (ICU): (A) the effect of dosage and temperature at a constant time of 60 min, (B) the effect of dosage and time at a constant temperature of 85°C, (C) the effect of temperature and time at a constant dosage of 20% w/w

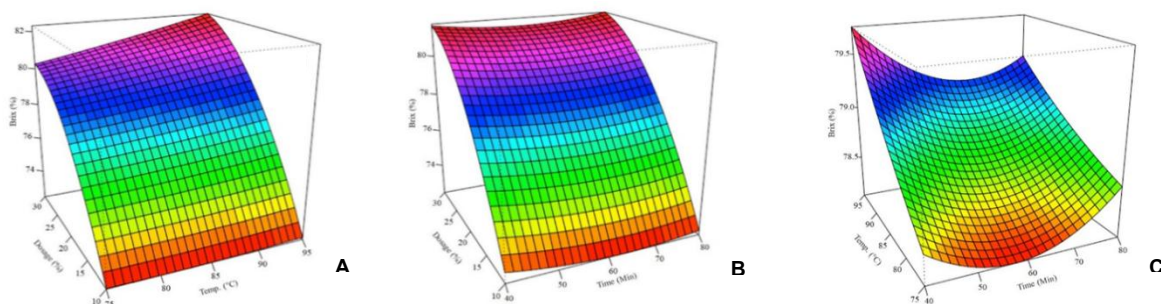


Figure 5 Response surface of %Brix: (A) the effect of dosage and temperature at a constant time of 60 min; (B) the effect of dosage and time at a constant temperature of 85°C; (C) the effect of temperature and time at a constant dosage of 20% w/w

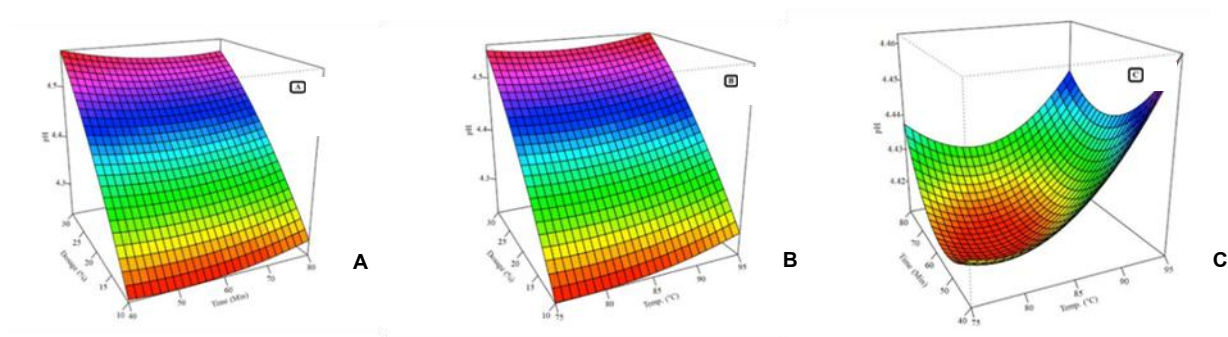


Figure 6 Response surface of pH: (A) the effect of dosage and temperature at a constant time of 60 min; (B) the effect of dosage and time at a constant temperature of 85°C; (C) the effect of temperature and time at a constant dosage of 20% w/w

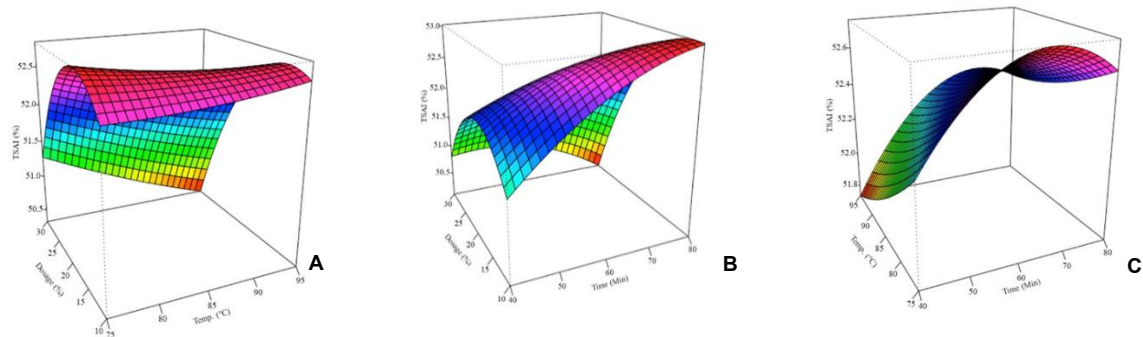


Figure 7 Response surface of TSAI: (A) the effect of dosage and temperature at a constant time of 60 min; (B) the effect of dosage and time at a constant temperature of 85°C; (C) the effect of temperature and time at a constant dosage of 20% w/w

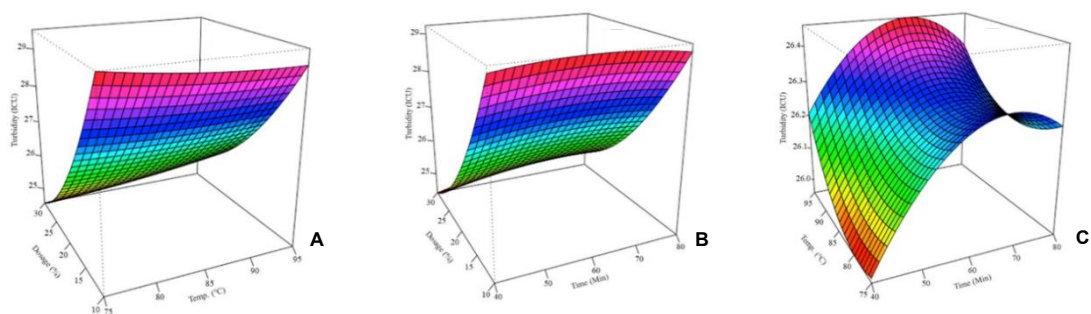


Figure 8 Response surface of Turbidity(ICU): (A) the effect of dosage and temperature at a constant time of 60 min; (B) the effect of dosage and time at a constant temperature of 85°C; (C) the effect of temperature and time at a constant dosage of 20% w/w

3.1 ความสัมพันธ์ของ Color ค่า Color ลดลงตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับ ดังแสดงใน Figure 4 โดยค่าสีของกากน้ำตาลขึ้นกับ dosage, temperature และ time ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (1)

$$\text{Color} = 129.0767 - 4.515X_1 - 5.2938X_3 + 4.9350X_1X_3 + 5.1854X_2^2$$

โดยที่ X_1 , X_2 , X_3 คือ dosage, temp และ time ตามลำดับ และมีค่า Adjusted $R^2 = 0.8004$ ซึ่งถือว่าดีในระดับหนึ่ง สะท้อนว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ประมาณ 80%

แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณถ่านกัมมันต์ (X_1) และเวลา (X_3) มีผลเชิงบวกต่อการลดค่าสี โดยสัมประสิทธิ์ -4.515 ของ X_1 และ -5.2938 ของ X_3 ชี้ว่าการเพิ่มตัวดูดซับและระยะเวลาการสัมผัสช่วยลดค่าสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกัน สัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ +4.9350 ของ X_1X_3 บ่งชี้ว่าการเพิ่มทั้งสองปัจจัยพร้อมกันในช่วงต้นจะเสริมกัน ทำให้ค่าสีลดลงได้มากกว่าการเพิ่มทีละปัจจัยเดียว แต่เมื่อเพิ่มเกินค่าที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการลดสีจะเพิ่มขึ้นน้อยลงตาม กฎผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง (diminishing returns) ส่วนสัมประสิทธิ์กำลังสอง +5.1854 ของ X_2^2 (อุณหภูมิ) แสดงถึงผลกระทบแบบโค้ง คือช่วงอุณหภูมิปานกลางช่วยให้การลดสีเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่ออุณหภูมิสูงเกินไปอาจเกิดการ desorption หรือการสลายตัวของโมเลกุลสี ทำให้ค่าสีกลับเพิ่มขึ้น แสดงถึงความสำคัญของการหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยทั้งสามในการลดสี

เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านกัมมันต์ 10–30% w/w ดังแสดงใน Figure 4a และ Figure 4b พบว่าค่าสีลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยค่าเริ่มต้นคือ 208,139 ICU ลดลงเหลือ 127,915 ICU ที่ 30% w/w (ที่ 85°C และ 60 นาที) แนวโน้มสอดคล้องกับทฤษฎีของ Langmuir และ Freundlich ที่การเพิ่มพื้นที่ผิวช่วยเพิ่มการดูดซับ แต่มีแนวโน้มอิ่มตัวที่ 25–30% w/w

นอกจากนี้ ที่ปริมาณ 20% w/w ดังแสดงใน Figure 4c พบว่าอุณหภูมิ 85°C ให้ค่าดูดซับดีที่สุด (129,077 ICU) ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 95°C ค่าสีกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการ desorption หรือสลายตัวของสารให้สีตามหลัก Le Chatelier's principle ส่วนผลของเวลาแสดงให้เห็นว่า ค่าสีลดลงต่อเนื่องจาก 40 ถึง 80 นาที แต่ช้าลงหลัง 60 นาที เนื่องจากพื้นที่ผิวเริ่มอิ่มตัว

3.2 ความสัมพันธ์ของ %Brix ค่า %Brix เพิ่มขึ้นหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ดังแสดงใน Figure 5 โดย %Brix ของกากน้ำตาลขึ้นกับ dosage, temperature และ time ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (2)

$$\%Brix = 78.5733 + 4.4125X_1 + 0.5325X_2 + 0.4900X_1X_2 - 1.7717X_1^2 + 0.3633X_3^2$$

โดย X_1 , X_2 , X_3 แทน dosage, temp, และ time ตามลำดับ มีค่า Adjusted $R^2 = 0.998$ ซึ่งถือว่าสูงมาก แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้เกือบทั้งหมดถือว่า ดีมาก

แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณถ่านกัมมันต์ (X_1) และอุณหภูมิ (X_2) มีผลเชิงบวกต่อค่า %Brix โดยสัมประสิทธิ์เชิงเส้น +4.4125 ของ X_1 ชี้ว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับช่วยกำจัดสิ่งเจือปนและสารสี ทำให้สัดส่วนน้ำตาลในของเหลวสูงขึ้น ส่วนสัมประสิทธิ์ +0.5325 ของ X_2 แสดงว่าอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อยช่วยเพิ่มการแพร่และประสิทธิภาพการดูดซับ ขณะที่สัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ +0.4900 ของ X_1X_2 บ่งชี้ว่าการเพิ่มทั้งสองปัจจัยพร้อมกันในช่วงต้นมีผลเสริมกัน ทำให้ %Brix เพิ่มขึ้นได้มากกว่าการเพิ่มทีละปัจจัยเดียว อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์กำลังสอง -1.7717 ของ X_1^2 สะท้อน กฎผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง คือเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เกินค่าที่เหมาะสม การเพิ่ม %Brix จะเริ่มช้าลง และสัมประสิทธิ์ +0.3633 ของ X_3^2 (เวลา) บ่งชี้ว่าผลของเวลามีลักษณะโค้ง คือการเพิ่มเวลาในช่วงต้นช่วยให้ %Brix เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเกินจุดสมดุลจะเปลี่ยนแปลง

น้อยลง แสดงถึงจุดที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณ อุณหภูมิ และเวลา

เมื่อพิจารณาจาก Figure 5a และ 5b พบว่า %Brix เพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 85°C และเวลา 60 นาที โดยค่าที่ 10% (72.39), 15% (75.92), 20% (78.57), 25% (80.34), และ 30% (81.21) แม้จะเพิ่มต่อเนื่อง แต่มีแนวโน้มช้าลงเมื่อปริมาณมากขึ้น เนื่องจากน้ำอิสระส่วนใหญ่ถูกดูดซับแล้ว ทำให้สารละลายเข้มข้นขึ้นและ %Brix เพิ่มขึ้นตาม ใน Figure 5c เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ 20% w/w พบว่า อุณหภูมิที่สูงขึ้น เช่น 75°C (78.04), 85°C (78.57), และ 95°C (79.11) ส่งผลให้ %Brix เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการระเหยของน้ำ ขณะที่ผลของเวลาที่ 85°C เช่น 40 นาที (78.94), 60 นาที (78.57), และ 80 นาที (78.94) แสดงว่าการดูดซับเกิดเร็วในช่วงต้นแล้วเข้าสู่ สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับการเพิ่มขึ้น ของ %Brix ส่งผลดีต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ลดน้ำหนักของเหลวหลังกรองถ่านออก ช่วยลดต้นทุน ขนส่ง และยืดอายุการเก็บรักษา

3.3 ความสัมพันธ์ของ pH ค่า pH มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ดัง แสดงใน Figure 6 โดยขึ้นกับ dosage เพียงอย่างเดียว อธิบายได้ด้วยสมการ (3)

$$pH = 4.4133 + 0.1525X_1$$

โดยมีค่า Adjusted R² ที่สูงถึง 0.9611 แสดงว่า แบบจำลองมีความแม่นยำสูง โดยใช้เพียงปัจจัยเดียว คือปริมาณถ่านกัมมันต์ (X₁) ขณะที่อุณหภูมิ (X₂) และ เวลา (X₃) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณถ่านกัม มันต์ (X₁) มีผลเชิงเส้นต่อค่า pH โดยสัมประสิทธิ์เป็น บวก +0.1525 บ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จะ ค่อย ๆ ปรับค่า pH ให้สูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับ สารประกอบที่มีฤทธิ์เป็นกรดบางชนิดหรือการ ปลดปล่อยองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติเป็นด่างเล็กน้อย จากพื้นผิวถ่านกัมมันต์ แต่เมื่อค่า pH เข้าใกล้ช่วง

เหมาะสม ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงอาจเริ่มคงที่ หรือลดลงตามแนวคิดกฎผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง

เมื่อพิจารณาจาก Figure 6a และ 6b เมื่อ เปรียบเทียบกับค่า pH เริ่มต้นที่ 4.79±0.01 ที่อุณหภูมิ 85°C และเวลา 60 นาที ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 4.26 เป็น 4.57 เมื่อเพิ่ม dosage จาก 10% เป็น 30% w/w แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ pH นี้สามารถอธิบายได้จาก สองปัจจัยที่มีผลในทิศทางตรงข้าม ระหว่างการดูดซับ น้ำอิสระทำให้ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นทำ ให้ pH ลดลง แต่คุณสมบัติความเป็นต่างของถ่านกัม มันต์(pH ประมาณ 9) มีผลมากกว่า ส่งผลให้ pH ของ กากน้ำตาลโดยรวมเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ เพิ่มขึ้น ใน Figure 6c แสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิและ เวลา พบว่าไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH อย่างมี นัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนผ่านค่าคงที่ของ pH ที่ 4.41 ในทุก สภาวะของอุณหภูมิ (75–95°C) และเวลา (40–80 นาที) ที่ปริมาณถ่าน 20% w/w แสดงถึงการเข้าสู่สมดุลที่ รวดเร็วและไม่พึ่งพาการกระตุ้นจากภายนอก ปฏิกิริยาการนี้มีความสำคัญต่อการควบคุมคุณภาพ เนื่องจากค่า pH ส่งผลต่อความเสถียรในการเก็บรักษา และมาตรฐานการซื้อขาย จึงจำเป็นต้องพิจารณาควบคู่ กับปัจจัยอื่นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

3.4 ความสัมพันธ์ของ TSAI ค่า TSAI มี แนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ดังแสดงใน Figure 7 โดยค่า TSAI ของกากน้ำตาลขึ้นกับ dosage และ time ซึ่งสามารถ อธิบายได้ด้วยสมการ (4)

$$TSAI = 52.4767 - 0.8613X_1 - 0.5900X_1X_3 - 0.8696X_1^2$$

โดยมีค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.7707 ซึ่งบ่งชี้ ถึงความแม่นยำในระดับปานกลาง และแสดงว่าสมการมี ความสัมพันธ์แบบกำลังสองกับปริมาณถ่านกัมมันต์ (X₁²) และมีปฏิสัมพันธ์ร่วมกับเวลา (X₁X₃) ขณะที่ อุณหภูมิ (X₂) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า TSAI

แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณถ่านกัม มันต์ (X₁) มีผลเชิงลบต่อค่า TSAI โดยสัมประสิทธิ์ –

0.8613 บ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จะทำให้ค่า TSI ลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับน้ำตาลบางส่วน ขณะเดียวกัน สัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ -0.5900 ของ X_1X_3 สะท้อนว่าการเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ร่วมกับเวลาที่นานขึ้นอาจยังลดค่า TSI ลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงผลเสริมกันของปัจจัยทั้งสองในทิศทางลบ นอกจากนี้ สัมประสิทธิ์กำลังสอง -0.8696 ของ X_1^2 บ่งบอกถึงแนวโน้มโค้งตามกฎผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เกินค่าที่เหมาะสม ผลกระทบต่อ TSI จะรุนแรงขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณถ่านกัมมันต์และเวลาเพื่อรักษาคุณภาพของกากน้ำตาล

เมื่อพิจารณาจาก Figure 7a และ Figure 7b ที่อุณหภูมิ 85°C และเวลา 60 นาที พบว่า TSI เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปริมาณถ่านกัมมันต์ต่ำ (10–15% w/w) จาก 52.47% เป็น 52.69% แต่ลดลงต่อเนื่องเมื่อเพิ่มถ่านเป็น 25–30% w/w เหลือเพียง 50.75% ซึ่งอาจเกิดจากถ่านกัมมันต์ดูดซับน้ำอิสระและสารอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาลในช่วงแรก ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำตาลสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น ก่อนที่จะเริ่มดูดซับน้ำตาลบางส่วนเอง เมื่อปริมาณถ่านเพิ่มขึ้น แนวโน้มนี้สะท้อนผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านและเวลา ดังแสดงใน Figure 7c โดยที่ปริมาณถ่าน 10% w/w ค่า TSI เพิ่มขึ้นจาก 51.88% ที่เวลา 40 นาที เป็น 53.06% ที่ 80 นาที แสดงว่าเวลาส่งผลต่อการดูดซับน้ำอิสระอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม ที่ปริมาณถ่าน 30% w/w ค่า TSI กลับลดลงจาก 51.34% เป็น 50.16% เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งอาจเกิดจากการดูดซับน้ำตาลเข้าสู่โครงสร้างของถ่านในระยะยาว

3.5 ความสัมพันธ์ Turbidity ค่า Turbidity แสดงแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนดังแสดงใน Figure 8 โดยขึ้นกับ dosage เพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (5)

$$\text{Turbidity} = 26.2700 - 2.2050X_1 + 0.7438X_1^2$$

ค่า Adjusted R^2 ที่สูงถึง 0.9625 บ่งชี้ถึงความแม่นยำสูงของแบบจำลอง โดยแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบพาราโบลา ($aX_1^2 + bX_1 + c$) ซึ่งมีจุดต่ำสุดของค่าความขุ่นในช่วงปริมาณถ่านที่เหมาะสม ทั้งนี้ ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิ (X_2) หรือเวลา (X_3)

แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณถ่านกัมมันต์ (X_1) มีผลสำคัญต่อความขุ่น (Turbidity) โดยสัมประสิทธิ์เชิงเส้น -2.2050 ชี้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ ความขุ่นจะลดลงอย่างมีประสิทธิภาพในช่วงแรกเนื่องจากการดูดซับและกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากกากน้ำตาลได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์กำลังสอง $+0.7438$ ของ X_1^2 บ่งบอกถึงลักษณะโค้งและกฎผลตอบแทนที่ลดน้อยถอยลง กล่าวคือเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์มากเกินไป ประสิทธิภาพในการลดความขุ่นจะเพิ่มขึ้นน้อยลง

เมื่อพิจารณาจาก จาก Figure 8a และ Figure 8b ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 85°C และเวลา 60 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 10% เป็น 30% w/w ค่าความขุ่นลดลงจาก 29.22 เป็น 24.81 ICU เทียบกับค่าตั้งต้นที่ 33.66 ± 1.31 ICU แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับอนุภาคแขวนลอยซึ่งเป็นสาเหตุหลักของความขุ่นแม้กราฟยังไม่แสดงจุดกลับตัวของพาราโบลาอย่างชัดเจน แต่แนวโน้มการลดลงของค่าความขุ่นเริ่มชะลอตัวในช่วงปริมาณถ่านกัมมันต์สูง ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการอิ่มตัวของพื้นผิวดูดซับ

4. การปรับปรุงคุณสมบัติกากน้ำตาลด้วยถ่านกัมมันต์ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 394-2524

4.1 ค่าสี แม้มอก. 394-2524 ไม่กำหนดค่าสี แต่ค่าสีของกากน้ำตาลก่อนการทดลองอยู่ที่ $208,139 \pm 2,335$ ICU หลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในทุกการทดลองค่าสีกากน้ำตาลที่ได้จะลดลง โดยค่าสีลดลงเหลือต่ำสุดที่ 125,896 ICU แม้ว่าค่าสีไม่ได้ถูกระบุในมาตรฐาน มอก.394-2524 แต่การลดลงของค่าสีนี้ถือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติที่สำคัญ เนื่องจาก

กากน้ำตาลที่มีสีอ่อนลงเป็นที่ต้องการในหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การลดลงของสีบ่งชี้ถึงการกำจัดสารประกอบฟีนอลิกและสารให้สีอื่นๆ ซึ่งอาจมีผลต่อกลิ่นรสและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ กากน้ำตาลที่มีสีอ่อนลงอาจช่วยเพิ่มความน่าสนใจของผลิตภัณฑ์และอาจเพิ่มมูลค่าทางการค้าได้ ดังนั้น การลดลงของค่าสีนี้ถือเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์และอาจเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ในตลาดได้

4.2 ค่า %Brix กากน้ำตาลก่อนการเจือจางมีค่า %Brix อยู่ที่ 80-82 %Brix ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.394-2524 ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 79% ในการทดลอง ตัวอย่างได้ผ่านการเจือจางเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา ทำให้ค่า %Brix เริ่มต้นลดลงเหลือ $70.81 \pm 0.15\%$ หลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ค่า %Brix เพิ่มขึ้นในทุกการทดลอง อยู่ในช่วง 72.35-82.60% แสดงถึงการเพิ่ม %Brix อันเนื่องมาจากการดูดซับน้ำ ส่งผลดีต่อคุณภาพและต้นทุนการขนส่ง

4.3 ค่า pH pH ก่อนทดลองอยู่ที่ 4.79 ± 0.01 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐาน (5-6) และลดลงเหลือ 4.26-4.57 หลังการดูดซับ แต่การเปลี่ยนแปลงนี้อาจไม่ส่งผลกระทบรุนแรงต่อคุณภาพของกากน้ำตาลในการใช้งาน เนื่องจากไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรวม ในสภาวะ pH ต่ำอาจเกิดการแตกตัวของซูโครส (น้ำตาลโมเลกุลคู่) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (กลูโคสและฟรุกโตส) มากขึ้น ซึ่งน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวนี้นี้ไม่สามารถตกผลึกได้ แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ซื้อ เนื่องจากกระบวนการแปรรูปกากน้ำตาล เช่น การกลั่นเอทานอลหรือการทำซอส ไม่ต้องการกระบวนการตกผลึกน้ำตาล ในทางตรงกันข้าม pH ที่ต่ำลงและการแตกตัวของซูโครสอาจเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการหมัก เนื่องจากยีสต์สามารถใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ การปรับ pH สามารถทำได้ในขั้นตอนต่อไปหากจำเป็นหรือ เลือกใช้กากน้ำตาลที่มีค่า pH สูงกว่า 5.6 เพื่อให้เป็นไปตาม

เกณฑ์มาตรฐาน โดยผลการทดลองพบว่าการลดลงของค่า pH ในทุกสภาวะอยู่ในช่วง ไม่เกิน 0.55 หน่วย ซึ่งถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ทั้งนี้กากน้ำตาลจากโรงงานน้ำตาลทั่วไปมี pH ไม่เกิน 6 และอาจแตกต่างกันตามประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การลดลงของ pH หลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จึงถือเป็นการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติและไม่กระทบต่อคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์

4.4 ค่า TSAI (Total Sugar as Invert) ค่า TSAI ก่อนดูดซับอยู่ที่ $50.72 \pm 0.48\%$ ซึ่งผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำ ($\geq 50\%$) และยังคงอยู่ในช่วง 50.16-53.06% หลังการดูดซับ แสดงว่ากระบวนการไม่ลดปริมาณน้ำตาลรวม บางสภาวะยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการดูดซับน้ำอิสระ ส่งผลให้คุณสมบัตินี้คงไว้ซึ่งความน่าสนใจในเชิงการค้า

4.5 ค่าความชื้น ค่าความชื้นก่อนทดลองอยู่ที่ 33.66 ± 1.31 ICU และลดลงอยู่ในช่วง 24.81-29.22 ICU หลังการดูดซับ แม้มาตรฐานไม่ได้ระบุไว้ แต่การลดความชื้นแสดงถึงการกำจัดสารแขวนลอยและอนุภาคต่างๆ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการลดลงของเถ้าซิลเฟตที่มอก. กำหนดไม่เกิน 11% โดยการลดความชื้นนี้ส่งผลดีต่อความคงตัวและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และอาจเพิ่มมูลค่าเชิงพาณิชย์ แม้ต้องทดสอบเพิ่มเติมเพื่อยืนยันผลต่อค่าเถ้าซิลเฟตโดยตรง

สรุปผล

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยด้วยการกระตุ้นทางความร้อน และศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าสีของกากน้ำตาล ซึ่งพบว่า

1. อุณหภูมิและเวลา มีผลต่อการลดน้ำหนักของเถ้าลอยอย่างชัดเจน โดยที่ 900°C น้ำหนักลดลงเร็วกว่าที่ 700°C และเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วกว่า ตามหลักอุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนพัฒนาได้มากขึ้น

2.ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน เพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อใช้ความร้อนสูง โดยที่ 900°C เป็นเวลา 80 นาที ให้ค่าการดูดซับสูงสุดถึง $328.94 \pm 6.55 \text{ mg/g}$ ซึ่งสูงกว่าการเผาที่ 700°C แม้ใช้เวลานานกว่า

3.พื้นที่ผิว การเผาที่ 900°C ทำให้พื้นที่ผิวเพิ่มจาก 16.27 เป็น $80.20 \text{ m}^2/\text{g}$ แม้ขนาดรูพรุนลดลงจาก 16.72 nm เหลือ 7.46 nm ขณะที่ ปริมาตรรูพรุน ก็เพิ่มจาก 0.0352 เป็น $0.0549 \text{ cm}^3/\text{g}$ สะท้อนการสร้าง mesopores และ micropores จำนวนมาก

4.ประสิทธิภาพการลดค่าสีกากน้ำตาล ขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ และเวลา โดยพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ $30\% \text{ w/w}$ สามารถลดค่าสีได้อย่างมีนัยสำคัญภายในเวลาเพียง 40 นาที ขณะที่ปริมาณที่ต่ำกว่าต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปัจจัยอุณหภูมิและเวลามีผลร่วมกันในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับอย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Surface Methodology (RSM) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือการใช้ถ่านกัมมันต์ $25\% \text{ w/w}$ ที่อุณหภูมิ 83°C เป็นเวลา 68 นาที ซึ่งสามารถลดค่าสีได้ร้อยละ 40 (จาก $208,139 \pm 2335$ เหลือ $125,896 \text{ ICU}$) พร้อมทั้งให้คุณสมบัติอื่นที่ดี ได้แก่ ค่า Brix = 80.24% , pH = 4.49 , TSI = 51.71% และความชุ่ม = 25.35 ICU

5.เปรียบเทียบมาตรฐาน มอก. 394-2524 พบว่า กากน้ำตาลก่อนการดูดซับมีค่าสี $208,139 \pm 2,335 \text{ ICU}$ และลดลงต่ำสุดเหลือ $125,896 \text{ ICU}$ หลังการดูดซับ แสดงถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสารที่ให้สี สำหรับคุณสมบัติอื่นๆ ค่า %Brix กากน้ำตาลก่อนการเจือจางอยู่ที่ $80-82\%$ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ ($\geq 79\%$) แต่เพื่อความสะดวกในการศึกษาได้มีการเจือจางจนเหลือ $70.81 \pm 0.15\%$ และภายหลังการดูดซับค่า %Brix เพิ่มขึ้นเป็น $72.35-82.60\%$ แสดงถึงการคงคุณภาพตามมาตรฐาน ขณะที่ค่า pH ก่อนการทดลองอยู่ที่ 4.79 ± 0.01 ต่ำกว่ามาตรฐาน (5-6) และลดลงเหลือ $4.26-4.57$ หลังการดูดซับ จึงควรเลือกใช้กากน้ำตาลที่มีค่า pH เริ่มต้นสูงกว่า

5.4 เพื่อให้เหมาะสมต่อการผลิต ค่า TSI (Total Sugar as Invert) ก่อนการดูดซับอยู่ที่ $50.72 \pm 0.48\%$ ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำ ($\geq 50\%$) และยังคงอยู่ในช่วง $50.16-53.06\%$ หลังการดูดซับ สะท้อนว่ากระบวนการไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำตาลรวม นอกจากนี้ ค่าความชุ่มลดลงจาก $33.66 \pm 1.31 \text{ ICU}$ เหลือ $24.81-29.22 \text{ ICU}$ แม้มาตรฐานไม่ได้กำหนด แต่การลดความชุ่มบ่งชี้ถึงการทำจิตสารแขวนลอยและอนุภาคต่าง ๆ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการลดลงของเถ้าซัลเฟตที่ มอก. กำหนดไม่เกิน 11%

วิจารณ์

1.อุณหภูมิและเวลาในการเผา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดน้ำหนักของเถ้าลอย โดยพบว่าอุณหภูมิ 900°C ทำให้น้ำหนักลดลงได้รวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงที่เร็วกว่าที่ 700°C ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางอุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิสูงอัตราการสลายตัวของสารอินทรีย์และการระเหยของสารระเหย (volatile matter) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการพัฒนารูพรุนและการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า ขณะที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ ปริมาณสารอินทรีย์และองค์ประกอบที่สามารถสลายตัวได้หมดไป การเผาต่อเนื่องเกินเวลานี้ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างเพิ่มเติมอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และจึงไม่คุ้มค่าทางพลังงาน

2.ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน เพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อใช้ความร้อนสูง โดยที่ 900°C เป็นเวลา 80 นาทีให้ค่าการดูดซับสูงสุดถึง $328.94 \pm 6.55 \text{ mg/g}$ ซึ่งสูงกว่าการเผาที่ 700°C แม้ใช้เวลานานกว่า อธิบายได้จากทฤษฎีการพัฒนาพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน ที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน จะเกิดขึ้นรวดเร็วทำให้สารระเหยและองค์ประกอบอินทรีย์สลายตัว เกิดเป็นช่องว่างและรูพรุนขนาดต่าง ๆ ส่งผลให้พื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเผากระตุ้นที่ 900°C สามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้เร็วและมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าน้ำหนักที่

ลดลงในช่วงเวลาเดียวกัน สามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการหยุดการเผากระตุ้นเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงสุด โดยประหยัดเวลาและพลังงานจากการอธิบายผลในข้อ 1 และ 2 นั้นแนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียน้ำหนักสัมพันธ์โดยตรงกับการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับ โดยอุณหภูมิสูงเร่งกระบวนการนี้ให้เกิดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภาพร และคณะ (2557) ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคงเหลือและความสามารถในการดูดซับไอโอดีน โดยค่าการดูดซับสูงสุดสอดคล้องกับช่วงเวลาที่น้ำหนักเริ่มคงที่ ซึ่งแสดงจุดที่เหมาะสมในการเผากระตุ้นถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด

3. พื้นที่ผิว เพิ่มขึ้นจาก 16.27 เป็น 80.20 m^2/g เมื่อเผาที่ 900°C ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ (thermal decomposition) ความร้อนสูงเร่งการเปิดรูพรุนที่เคยอุดตันและส่งเสริมการจัดเรียงตัวใหม่ของซิลิกาและอลูมิโนซิลิเกต ส่งผลให้เกิดโครงข่ายรูพรุนขนาดเล็ก และการเชื่อมโยงรูพรุนเดิมเข้าด้วยกัน ส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มแม้ขนาดรูพรุนลดลงจาก 16.72 nm เหลือ 7.46 nm ขณะที่ ปริมาตรรูพรุน ก็เพิ่มจาก 0.0352 เป็น 0.0549 cm^3/g สะท้อนถึงการสร้าง mesopores และ micropores จำนวนมากแม้ขนาดเฉลี่ยเล็กลง กลไกดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อน เช่น การเกิดผลึก (crystallization) การหลอมรวมบางส่วน (sintering) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี BET ที่ระบุว่าการเพิ่มจำนวนรูพรุนขนาดเล็กมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวและประสิทธิภาพในการดูดซับ ทั้งนี้ งานวิจัยของ ชินธัญย์ และคณะ (2561) รายงานว่าถั่วลอยจากการเผาขานอ้อยและถั่วลอยสามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะเมื่อกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ 900°C ซึ่งให้ค่าพื้นที่ผิวสูงสุดถึง 390 m^2/g แต่การกระตุ้นที่สูงกว่า 900°C ทำให้พื้นที่ผิวลดลงจากการพังทลายของรูพรุนบางส่วน ผลลัพธ์ดังกล่าวชี้ถึง

ศักยภาพของถั่วลอยขานอ้อยในการใช้ทดแทนถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ โดยสามารถประเมินคุณภาพได้จากค่าพื้นที่ผิว BET และการดูดซับไอโอดีน

งานวิจัยนี้เลือกใช้การกระตุ้นทางกายภาพเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ที่ปราศจากสารเคมี เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แม้ว่าวิธีนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงและให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี แต่มีข้อดีที่ไม่ทิ้งสารตกค้าง ขณะที่การกระตุ้นทางเคมี เช่น กรดฟอสฟอริกหรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ร่วมกับความร้อนที่ $600\text{--}700^\circ\text{C}$ สามารถผลิตถ่านกัมมันต์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่มีความเสี่ยงต่อการตกค้างของสารเคมี (นภารัตน์, 2545) ทั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sinyoung *et al.*, (2021) ที่ใช้กระบวนการ microwave-assisted phosphoric acid activation กับขานอ้อย โดยได้ค่า BET สูงถึง 781 m^2/g และค่าการดูดซับไอโอดีน 852 mg/g อย่างไรก็ตาม การทดลองในงานนี้ที่ใช้การกระตุ้นทางกายภาพด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวให้ค่า BET เพียง 80.20 m^2/g ซึ่งยังด้อยกว่างานของ ชินธัญย์ และคณะ (2561) ที่ใช้การกระตุ้นร่วมกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (ค่า BET 390 m^2/g) แต่เมื่อพิจารณาโดยรวม วัสดุที่เตรียมได้จัดเป็น mesoporous adsorbent แม้ค่าพื้นที่ผิวจะไม่สูงเท่างานวิจัยอื่น แต่โครงสร้าง mesopores เหล่านี้ถือว่าเหมาะสมต่อวัตถุประสงค์ (fit-for-purpose) สำหรับการดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ในกากน้ำตาลมากกว่าวัสดุที่มีเฉพาะโครงสร้างไมโครพอร์ซึ่งมีช่องว่างเล็กเกินไป

4. ประสิทธิภาพในการลดค่าสีกากน้ำตาล ขึ้นกับปริมาณ อุณหภูมิ และเวลา โดยพบว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ 30% w/w ใช้เวลาเพียง 40 นาทีในการลดค่าสีได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ 20% และ 10% ต้องใช้เวลานานขึ้นก่อนเข้าสู่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir (1918) และ Freundlich (1906) ที่อธิบายว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและจุดดูดซับ ทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพ

สูงขึ้น สำหรับอุณหภูมิ การเพิ่มความร้อนช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล ทำให้การชนและการดูดซับเกิดได้รวดเร็วขึ้น แต่เนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจลดประสิทธิภาพการดูดซับและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารให้สี เช่น ปฏิกริยาเมลลาร์ด ส่วนปัจจัยเวลา สอดคล้องกับหลักการจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยการเพิ่มเวลาจะเพิ่มโอกาสที่โมเลกุลของสารให้สีสัมผัสและยึดเกาะกับผิวถ่านกัมมันต์มากขึ้นจนถึงจุดสมดุล ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์ อุณหภูมิ และเวลา พบว่าการเพิ่มทั้งสามปัจจัยพร้อมกันส่งผลเสริมกัน (synergistic effect) ต่อประสิทธิภาพในการลดค่าสีของกากน้ำตาลสอดคล้องกับรายงานของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร (2553) ที่ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในคอลัมน์ดูดซับน้ำอ้อยใส พบว่าช่วง 10–20 นาทีแรก ค่าสีลดลงจาก 6,903 ICU เหลือเพียง 2,909–2,953 ICU (ลดลงกว่า 57%) ซึ่งเป็นค่าลดสูงสุด ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลงเหลือประมาณ 50% ที่ 30–50 นาที และ 34.35% ที่ 60 นาที เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์อิมตัวไม่สามารถดูดซับได้ต่อไป ขณะเดียวกันงานวิจัยของชินธันย์ และคณะ (2561) รายงานว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่า BET 390 m²/g สามารถลดค่าสีในน้ำเชื่อมได้สูงสุดถึง 88%

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากงานวิจัยนี้จะมีค่า BET ต่ำกว่างานอื่นกว่า 5 เท่า แต่ยังสามารถลดค่าสีได้ถึง 40% ซึ่งแตกต่างจากผลของชินธันย์ และคณะเพียง 2 เท่า และใกล้เคียงกับรายงานของสถาบันฯ ที่ 57% ความแตกต่างดังกล่าวมีสาเหตุจากสภาวะการทดลองที่ไม่เหมือนกัน โดยงานวิจัยอื่นใช้น้ำเชื่อมซึ่งมีความหนืดต่ำ ทำให้โมเลกุลสีสามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้รวดเร็วและทั่วถึง ขณะที่กากน้ำตาลมีความหนืดสูง ส่งผลให้การเคลื่อนที่และการแพร่ของโมเลกุลสีภายในของเหลวถูกจำกัด

เกิดการต้านทานการแพร่ (diffusion resistance) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ยังสะท้อนว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นมีโครงสร้างแบบ mesoporous adsorbent ซึ่งเหมาะสมต่อการดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ในกากน้ำตาลมากกว่าวัสดุที่มีเพียงโครงสร้างไมโครพอร์ซที่มีช่องว่างเล็กเกินไป ทั้งนี้การเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับก๊าซจะมีรูพรุนเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับของเหลว เนื่องจากโมเลกุลของสารมลพิษในอากาศมีขนาดเล็กกว่า (ปรียาพา และ พุทธิธิดา, 2556)

ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์โดยใช้ทรัพยากรภายในกระบวนการผลิตของโรงงานน้ำตาล เช่น การใช้ไอน้ำจากหม้อไอน้ำ (boiler) ร่วมกับการเผาระตุ้นด้วยความร้อน เพื่อพัฒนากระบวนการคาร์บอนในเซชันให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งเป็นแนวทางที่สามารถประหยัดต้นทุนและประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม

5. การวิเคราะห์และทำนายผล ใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) ศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ (X_1), อุณหภูมิ (X_2) และเวลา (X_3) ต่อคุณสมบัติกากน้ำตาล ได้แก่ ค่าสี, pH, %Brix, T_{SAI} และความขุ่น โดยสร้างสมการพหุนามลำดับสองในรูปแบบ coded (-1 ถึง +1) ผ่านโปรแกรม R เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมิน ผลการวิเคราะห์เลือกเฉพาะตัวแปรที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เพื่อลดความซับซ้อนและป้องกัน overfitting แบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง เพื่อแสดงผลกระทบเชิงเดี่ยวและเชิงปฏิสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมพบว่า ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 25% w/w อุณหภูมิ 83°C และเวลา 68 นาที มีประสิทธิภาพการลดสีสูงสุดสามารถลดค่าสีได้ 40% (จาก 208,139±2335 เหลือ 125,896 ICU) พร้อมได้คุณสมบัติอื่นที่ดี ได้แก่ %Brix = 80.24, pH = 4.49,

TSAI = 51.71% และความชื้น = 25.35 ICU ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพ พลังงาน และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

6.เปรียบเทียบมาตรฐาน มอก. 394-2524 พบว่า แม้ค่าสีและความชื้นไม่ได้กำหนดไว้ แต่การลดลงของสองค่าดังกล่าวไม่เพียงช่วยเพิ่มคุณภาพและศักยภาพเชิงพาณิชย์ของกากน้ำตาล แต่ยังส่งผลเชิงบวกต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่า %Brix เพิ่มขึ้นจาก $70.81 \pm 0.15\%$ เป็น 80.24% ซึ่งช่วยลดต้นทุนการขนส่งและเพิ่มมูลค่า ขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 4.79 ± 0.01 เป็น 4.49 แม้จะต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ไม่กระทบต่อปริมาณน้ำตาลรวม อีกทั้งสภาวะ pH ต่ำยังเอื้อต่อการแตกตัวของซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโตสที่ไม่ตกผลึก ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการหมักของยีสต์ในการผลิตเอทานอล ทั้งนี้ pH ยังสามารถปรับแก้ได้ในกระบวนการถัดไป ปริมาณน้ำตาลรวมยังคงสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน โดยเพิ่มจาก $50.72 \pm 0.48\%$ เป็น 51.71% เนื่องจากการเข้มข้นที่สูงขึ้น ส่วนค่าความชื้นลดลงจาก 33.66 ± 1.31 ICU เป็น 25.35 ICU ซึ่งอาจสัมพันธ์กับการลดลงของเถ้าซัลเฟต (ไม่เกิน 11% ตามมาตรฐาน มอก.394-2524) ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพและเสถียรภาพของกากน้ำตาลดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

ชินธันย์ อารีประเสริฐ และคณะ. (2561). การผลิตถ่านกัมมันต์จากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเข้ชั้นและการกระตุ้นทางกายภาพ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นภารัตน์ จิวาลักษณ์. (2545). การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/1321>

ปรียาพา พาณิश्य, และพุทธิดา ภูโอบ. (2556). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากปาล์ม. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พรศุภรัตน์ แสนสุนนท์, ภัทราภรณ์ เอนอ่อน และ โกวิทภัยะมิงคา. (2556). จลนศาสตร์และกลไกการดูดซับสีย้อมไดเรกต์เรด 80 โดยซันอ้อยดัดแปร. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51. (หน้า 189-196). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. (2553). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลในโรงงาน “การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวขั้นตอนเดียว. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาพร รัตนพันธ์, เพ็ญภา เพ็งแจ่ม, และพนิดา กังซุ่น. (2557). การเตรียมและลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกมังคุด. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 7(3), 13-21.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. (2567). กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบ น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย.

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2524). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกากน้ำตาลชนิดผลพลอยได้ (มอก. 394-2524). กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อลิสรา นิติวัดนะ. (2553). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลาแมคาเดเมียโดยการกระตุ้นทางกายภาพ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chula Digital Collection. <https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2010.981>
- Arrhenius, S. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 4U(1), 226–248. <https://doi.org/10.1515/zpch-1889-0416>
- ASTM International. (2011). *ASTM D4607-94(2011): Standard test method for determination of iodine number of activated carbon*. West Conshohocken, ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4607-94R11>
- Belouafa, S., Habti, F., Digua, K., & Chaair, H. (2022). Optimization of a process for discoloration of low-grade syrup. *Maghrebien Journal of Pure and Applied Science*, 8(1), 10–32. <https://doi.org/10.48383/IMIST.PRSM/mjpas-v8i1.32411>
- Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., dos Reis, P. S., Souza, A. S., & dos Santos, W. N. L. (2007). Box–Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica Acta*, 597(2), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the Adsorption in Solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385–471.
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 9277:2010 – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption (BET method)*. International Organization for Standardization.
- Jagtoyen, M., & Derbyshire, F. (1998). Activated carbons from yellow poplar and white oak by H₃PO₄ activation. *Carbon*, 36(7–8), 1085–1097. [https://doi.org/10.1016/S00086223\(98\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S00086223(98)00082-8)
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Li, F., Yuasa, A., Ebie, K., Azuma, Y., Hagishita, T., & Matsui, Y. (2002). Factors affecting the adsorption capacity of dissolved organic matter onto activated carbon: Modified isotherm analysis. *Water Research*, 36(18), 4592–4604. [https://doi.org/10.1016/S00431354\(02\)00174-4](https://doi.org/10.1016/S00431354(02)00174-4)
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., Jiang, J. P., & Li, N. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>
- Lua, A. C., & Guo, J. (1998). Preparation and characterization of chars from oil palm waste. *Carbon*, 37(4), 633–642. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00161-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00161-4)

- Madaeni, S. S., & Zeresghi, S. (2010). Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1270–1276. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.002>
- Nachat, N., Tobaramseekul, P., & Worathanakul, P. (2014). Activated carbon from bagasse for syrup decolorization as an alternative for waste management and the assessment of carbon footprint. *Environment and Natural Resources Journal*, 12(2), 66–73. <https://doi.org/10.14456/ENNRJ.2014.9>
- Ogando, F. I. B., Xastre, T., Simões, E., & Aguiar, C. L. (2021). Removal of color and turbidity in sugarcane juice treated by electrocoagulation with aluminum electrodes. *Brazilian Journal of Food Technology*, 24(7), e2020236. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.23620>
- Phothong, K. (2021). *Pore development and surface functional groups formation during CO₂ activation of bamboo-based activated carbon and the simulation study for wetting behavior of fluids on a planar carbon substrate* [Master's thesis, Suranaree University of Technology]. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/9257>
- Rosenblum, J. S., Sitterley, K. A., Thurman, E. M., Ferrer, I., & Linden, K. G. (2016). Hydraulic fracturing wastewater treatment by coagulation–adsorption for removal of organic compounds and turbidity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 1978–1984. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.013>
- Sekirifa, M. L., Pallier, S., Hadj-Mahammed, M., Richard, D., Baameur, L., & Al-Dujaili, A. H. (2013). Measurement of the performance of an agricultural residue-based activated carbon aiming at the removal of 4-chlorophenol from aqueous solutions. *Energy Procedia*, 36, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.012>
- Sinyoung, S., Chaiwat, W., & Kunchariyakun, K. (2021). Preparation of activated carbon from bagasse by microwave-assisted phosphoric acid activation. *Walailak Journal of Science and Technology*, 18(16), 22796. <https://doi.org/10.48048/wjst.2021.22796>
- Sutthasupa, S., Koo-Amornpattana, W., Worasuwannarak, N., Prachakittikul, P., Teachawachirasiri, P., Wanthong, W., Thungthong, T., Inthapat, P., Chanamarn, W., Thawonbudit, C., Srifa, A., Ratchahat, S., & Chaiwat, W. (2023). Sugarcane bagasse-derived granular activated carbon hybridized with ash in bio-based alginate/gelatin polymer matrix for methylene blue adsorption. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127464. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127464>

- Yalçın, N., & Sevinç, V. (2000). Studies of the surface area and porosity of activated carbons prepared from rice husks. *Carbon*, 38(14), 1943–1945.
[https://doi.org/10.1016/S00086223\(00\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S00086223(00)00029-4)
- Yang, X., & Al-Duri, B. (2005). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 287(1), 25–34.
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.093>