



ถ่านกัมมันต์จากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษและ การศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้ง

Activated Carbon from Solid Waste of Pulp and Paper Industry and the Study of Color Removal of Wastewater

จิตาพร คำภู (Thitaporn Khumphu)^{1*} ดร.ยุวรัตน์ เงินเย็น (Dr.Yuvarat Ngernyen)**

(Received: June 6, 2018; Revised: July 20, 2018; Accepted: July 25, 2018)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาวซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกและวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 408–728 m²/g ที่อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและกรด 1:2–1:4 โดยน้ำหนัก เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400–600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นทางกายภาพ มีพื้นที่ผิวเพียง 14–57 m²/g เมื่อใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการกระตุ้น 600–800°C เป็นเวลา 0.5–3 ชั่วโมง เมื่อตรวจสอบปริมาณการดูดซับสีที่สมดุลจากน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า การกำจัดสีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ โดยการใช้อถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมีปริมาณ 1.5 กรัม สามารถกำจัดสีได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 97 เมื่อต้องการกำจัดสีให้ได้ตามค่าเป้าหมายของทางโรงงาน นั่นคือ ร้อยละ 58 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ใช้เวลาในการกำจัดสี (40 นาที) น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าประมาณ 3 เท่า เมื่อทำการตรวจสอบค่าสีในหน่วย ADMI และค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้งภายหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการกระตุ้นทางเคมี พบว่า มีค่าอยู่ในช่วงตามที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้น การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เนื่องจากมีปริมาณการดูดซับและอัตราการดูดซับที่สูง และยังเป็นการนำของเสียมาทำให้เกิดประโยชน์

ABSTRACT

This research aimed to study the preparation of activated carbon from pulp residue, solid wastes from pulp and paper industry, by chemical activation with phosphoric acid (H₃PO₄) and physical activation with carbon dioxide (CO₂). For H₃PO₄ activation, the calculated BET surface area of chemical activated carbon is 408–728 m²/g at the weight ratio of raw material to chemical 1:2–1:4, activation time 1 hr and carbonization temperatures of 400–600°C for 1 hr, while that of physical activated carbon drastically reduced to 14–57 m²/g at carbonization temperature of 400°C for 1 hr and activation temperature ranging from 600–800°C for 0.5–3 hrs. By investigating the equilibrium

¹Correspondent author: Thitaporn.yung@gmail.com

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

color adsorption capacity from bio-treated wastewater of pulp and paper industry by loading chemical and commercial activated carbon, as expected, it is found that the performance of color removal becomes higher as increasing the adsorbent loading. A 1.5 g of chemical activated carbon provided the highest color removal about 97%. In order to meet the industry-specific requirement for color removal of 58%, we found that our prepared activated carbon spent less time consuming (40 minutes) to remove color than the commercial one about 3 times, approximately. For further investigations of ADMI color and pH of wastewater after treatment with our chemical activated carbon, those measured values are acceptable. Therefore, we recommend that the activated carbon prepared by chemical activation be appropriate to be applied in the pulp and paper industry because of high adsorption rate and capacity, and recycling waste into useful products.

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ กากขาว อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ น้ำทิ้ง

Keywords: Activated carbon, Pulp residue, Pulp and paper industry, Wastewater

บทนำ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษของโรงงานอุตสาหกรรมจะมีกากของเสียที่เกิดขึ้นมากมายหลายชนิด เช่น เปลือกไม้ ฝุ่นไม้ กากขาว กากปูนขาว และกากตะกอนน้ำทิ้ง โดยเปลือกไม้และฝุ่นไม้ ทางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ กากปูนขาวนำกลับเข้าสู่เตาเผาเพื่อนำกลับนำไปใช้ใหม่ กากตะกอนน้ำทิ้งนำไปทำปุ๋ย และใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ ส่วนกากขาวซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการต้มเยื่อที่ต้มไม่สุก ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ อีกทั้งยังต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำกากขาวนี้มาใช้ประโยชน์ และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพกับทางโรงงานมากที่สุด จึงจะนำไปใช้ในโรงงานเอง โดยผู้วิจัยพบว่า ปัญหาหนึ่งของทางโรงงาน คือน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพของทางโรงงานแล้ว มีค่าต่าง ๆ เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง เช่น ค่า COD หรือ ค่า BOD เป็นต้น แต่ค่าสียังไม่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมได้กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมไว้ โดยน้ำทิ้งที่สามารถปล่อยสู่ธรรมชาติได้ต้องมีค่าสีที่วัดในหน่วย ADMI ไม่เกิน 300 [1] ซึ่งน้ำทิ้งของทางโรงงานมีค่าสีอยู่ที่ประมาณ 600 ADMI โดยทางโรงงานมีเป้าหมายในการลดค่าสีของน้ำทิ้งให้เหลือประมาณ 250 ADMI หรือต้องการกำจัดสีร้อยละ 58

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การบำบัดสีของน้ำทิ้งมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การบำบัดโดยวิธีการโฟโตแคตาไลซิส โดยใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [2] หรือ การบำบัดโดยใช้กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง [3] ซึ่งแต่ละกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้น มีต้นทุนค่อนข้างสูง อีกทั้งกระบวนการยังมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และใช้ต้นทุนต่ำ นั่นคือ กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลหรือไอออนของสารที่เราไม่ต้องการ เข้ามายึดเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคของแข็งด้วยแรงทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ โดยสมบัติของตัวดูดซับต้องเป็นวัสดุที่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เช่น ซีโอไลต์ อะลูมินา ซิลิกาเจล และถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับมาตรฐานรูปแบบหนึ่งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก สามารถผลิตได้จากวัสดุทุกชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น วัสดุชีวมวลต่าง ๆ ได้แก่ กะลามะพร้าว ฟางข้าว เปลือกไม้ หรือ กะลาปาล์ม เป็นต้น หรือวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ชีวมวล เช่น ถ่านหิน หรือ ยางรถยนต์ เป็นต้น

กระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ เป็นการนำวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการกระตุ้น (activation) เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนขึ้นเป็นจำนวนมาก เกิดพื้นที่ผิวภายในเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง โดยการ



กระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) ซึ่งการกระตุ้นทางกายภาพแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) เป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในสภาวะไร้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ ขั้นตอนนี้เป็นการทำให้เกิดรูพรุนเบื้องต้น ยังนำถ่านชาร์ไปดูดซับไม่ได้เนื่องจากถ่านชาร์มีส่วนผสมของน้ำมันดิบ (tar) อยู่บางส่วน จึงต้องนำไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้น ซึ่งเป็นการทำให้ถ่านชาร์มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยใช้แก๊สชนิดต่าง ๆ เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน หรือ อากาศ เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นจะอยู่ระหว่าง 800–1000°C ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ ส่วนการกระตุ้นทางเคมี เป็นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว คือ ผสมวัตถุดิบกับสารเคมี โดยสารเคมีจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400–600°C โดยสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น [4]

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำกากขาวมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปดูดซับสีของน้ำทิ้ง เพื่อแก้ไขปัญหของทางโรงงาน นอกจากนั้น ยังนำถ่านกัมมันต์ทางการค้ามาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาว ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษ ที่ทำการผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส ทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ นอกจากนั้น เทคนิคนี้ยังสามารถบอกความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบได้อีกด้วย ซึ่งหากวัตถุดิบมีความชื้นสูง ต้องทำการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบก่อนนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงจากบริษัทผลิตและจำหน่ายแห่งหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

วิธีการวิจัย

1. วัตถุดิบและการวิเคราะห์

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง คือ กากขาว (pulp residue) ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษ ที่ทำการผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส ทำการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาออกแบบอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ นอกจากนั้น เทคนิคนี้ยังสามารถบอกความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบได้อีกด้วย ซึ่งหากวัตถุดิบมีความชื้นสูง ต้องทำการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบก่อนนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่ใช้ศึกษาเปรียบเทียบเป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงจากบริษัทผลิตและจำหน่ายแห่งหนึ่งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จะใช้ 2 วิธี คือ การกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้กรดฟอสฟอริก โดยมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

2.1 การกระตุ้นทางกายภาพ

นำวัตถุดิบจำนวน 30 กรัม บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร) จากนั้นนำเตาปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง ทำการคาร์บอนไนเซชันภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยใช้อุณหภูมิที่ทำได้จากเทคนิค TGA เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการปิดสวิตซ์เตาเผาปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนจนถึงอุณหภูมิห้อง จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ถ่านชาร์ จากนั้นนำถ่านชาร์มากระตุ้น โดยทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เตาเผาจนถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ทำการปิดแก๊สไนโตรเจนและเปิด

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เตาปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล $200 \text{ cm}^3/\text{min}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาในการกระตุ้น ปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวลงภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

2.2 การกระตุ้นทางเคมี

นำวัตถุดิบจำนวน 30 กรัม มาแช่กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น 1:2 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 1.5 และ 2 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างบรรจุใส่เตาปฏิกรณ์เพื่อทำการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยอุณหภูมิที่ใช้ได้จากเทคนิค TGA เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการปิดสวิชต์เตาเผา ปล่อยให้ตัวอย่างเย็นตัวลงภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำเปล่าจนน้ำล้างกับน้ำที่ผ่านการล้างมีค่า pH ใกล้เคียงกัน

3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

ทำการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยใช้การวัดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C หรือ 77 K ด้วยเครื่อง ASAP2020 (Micromeritics) ซึ่งก่อนทำการวิเคราะห์ นำตัวอย่างไป outgas ที่อุณหภูมิ 250°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($< 50 \text{ } \mu\text{mHg}$) เพื่อกำจัดไอน้ำและสารระเหยอื่น ๆ จากนั้นนำตัวอย่างมาทำการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P°) ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.05–0.99 ซึ่งจะทำให้ได้ไอโซเทอมการดูดซับ โดยจากไอโซเทอมการดูดซับที่ได้นี้ สามารถนำมาคำนวณหาสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดังนี้ พื้นที่จำเพาะ (S_{BET}) ใช้สมการของ Brunauer–Emmett–Teller ที่ความดันสัมพัทธ์ 0.05–0.3 ปริมาตรรูพรุนรวม (V_T) คำนวณจากการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ $P/P^\circ = 0.99$ ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (V_{mic}) ใช้สมการของ t-plot ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ ($V_{\text{meso+mac}}$) หาได้จากการนำปริมาตรรูพรุนรวมลบด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (D_p) หาได้จากสมการ $(4 \times \text{ปริมาตรรูพรุนรวม}) / \text{พื้นที่ผิว}$

4. การศึกษาการดูดซับสีของน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งที่ใช้คือ น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เป็นตัวดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ 1 และ 1.5 กรัม แช่ในน้ำทิ้งปริมาตร 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1–48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาในการดูดซับ นำตัวอย่างมาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกน้ำทิ้งและถ่านกัมมันต์ออกจากกัน จากนั้นนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer (G11034 Agilent) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 400 นาโนเมตร [5] คำนวณร้อยละการกำจัดสี (%removal) ได้จากสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการกำจัดสี} = \left(\frac{\text{abs}_0 - \text{abs}_t}{\text{abs}_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ abs_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งก่อนการดูดซับ และ abs_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งหลังการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ

ภายหลังการดูดซับสีของน้ำทิ้งด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้แล้ว ทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างโดยวิเคราะห์ค่าสีตามมาตรฐาน ADMI และวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพื่อตรวจสอบว่าหลังจากใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับแล้ว น้ำทิ้งที่ได้เป็นไปตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมหรือไม่ โดยการวิเคราะห์ค่าสีของน้ำตัวอย่างต้องทำการกำจัดสารแขวนลอยโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ก่อน จากนั้นปรับค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) ของน้ำตัวอย่างให้มีค่าประมาณ 7.6 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M

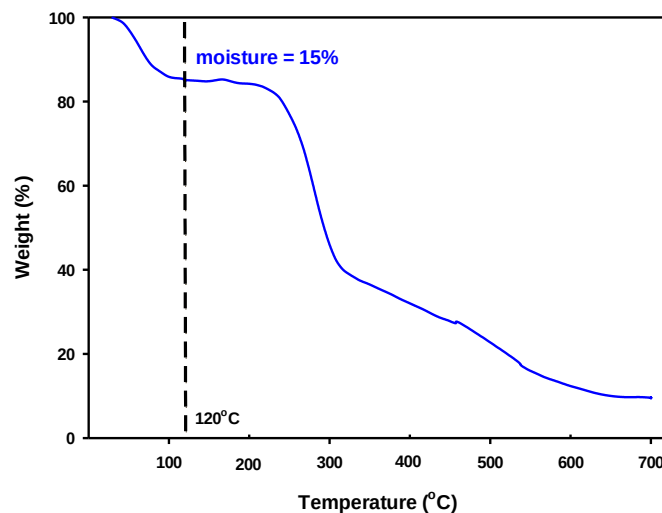


แล้วนำน้ำตัวอย่างที่ปรับค่า pH แล้ว มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในหน่วย ADMI ส่วนการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างวัดโดยใช้เครื่อง pH meter

ผลการวิจัย

1. สมบัติของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ของกากขาว ดังแสดงในภาพที่ 1 พบว่า กราฟการสลายตัวของกากขาวเหมือนกับการสลายตัวของวัสดุชีวมวลชนิดอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน โดยน้ำหนักของตัวอย่างลดลง 2 ช่วง ช่วงแรกที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งน้ำหนักที่หายไปในช่วงอุณหภูมินี้ คือ ความชื้นที่อยู่ในตัวอย่าง โดยกากขาวมีค่าความชื้นอยู่ที่ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัตถุดิบมีค่าความชื้นอยู่ในปริมาณพอสมควร ดังนั้น ก่อนนำตัวอย่างไปใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ควรนำตัวอย่างไปไล่ความชื้นก่อน ส่วนการลดลงของน้ำหนักในช่วงที่ 2 คือที่อุณหภูมิระหว่าง $250-650^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักของตัวอย่างลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่สารระเหยต่าง ๆ เกิดการสลายตัว โดยระเหยออกไปจากโครงสร้างเหลือเพียงแค่องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอน ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือช่วงอุณหภูมินี้ โดยในงานวิจัยของ Heidari และคณะ [6] ได้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเมื่อนำไม้ยูคาลิปตัสไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA พบว่า ช่วงอุณหภูมิแรกที่น้ำหนักตัวอย่างลดลง คือ ที่อุณหภูมิ 110°C ซึ่งคือความชื้นของตัวอย่าง ช่วงอุณหภูมิ $250-340^{\circ}\text{C}$ เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ในชีวมวล และช่วงอุณหภูมิ $380-520^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600°C และใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400°C ในการเตรียมถ่านชาร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป



ภาพที่ 1 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากขาวโดยใช้เทคนิค TGA

2. สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

2.1 การเตรียมโดยการกระตุ้นทางเคมี

ในการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมี ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารกระตุ้น โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น และอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสาร

กระตุ้น 1:2 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก เวลาในการแช่ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 400 500 และ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีผลการวิเคราะห์สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์เดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น จาก 1:2 ไปจนถึง 1:4 โดยน้ำหนัก จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากขึ้น เนื่องจากกรดฟอสฟอริกจะเข้าไปทำปฏิกิริยาการสลายตัว (pyrolytic decomposition) กับวัตถุดิบ และเกิดโครงสร้างที่เชื่อมโยงกัน (cross-linked structure) ดังนั้น ยังมีสารกระตุ้นมากจะทำให้เกิดปฏิกิริยามากขึ้น [7] โดยถ่านกัมมันต์จากกากขาวมีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 408–728 m²/g

ที่อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400°C ไปเป็น 500°C จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 600°C จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวลดลง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Teng และคณะ [8] ซึ่งได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 400°C ไปเป็น 500°C จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 600°C พบว่า ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวลดลง ซึ่งการที่พื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 400°C ไปเป็น 500°C เนื่องจากเกิดการกำจัดน้ำมันที่ออกไปจากโครงสร้างโดยกรดฟอสฟอริก ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500°C แต่เมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์สูงกว่า 500°C จะทำให้พันธะระหว่างคาร์บอนที่ไม่แข็งแรงบริเวณจุดชำรุด (defect) เกิดการสลายหรือพังลงมา (collapse) ทำให้รูพรุนน้อยลง พื้นที่ผิวจึงลดลง

สำหรับปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่า ปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีแนวโน้มผลการทดลองเช่นเดียวกันกับพื้นที่ผิว โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มากกว่าปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.8–5.0 nm ซึ่งเป็นขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่เป็นรูพรุนขนาดกลาง (รูพรุนขนาดเล็ก น้อยกว่า 2 nm ส่วนรูพรุนขนาดกลางอยู่ระหว่าง 2–50 nm และรูพรุนขนาดใหญ่ มากกว่า 50 nm)

ตารางที่ 1 ผลของอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (เวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 ชั่วโมง และเวลาในการคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง)

อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ กรดฟอสฟอริก (โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิในการ คาร์บอนไนซ์ (°C)	S _{BET} (m ² /g)	V _{mic} (cm ³ /g)	V _{meso+mac} (cm ³ /g)	V _T (cm ³ /g)	D _p (nm)
1:2	400	408	0.10 (34%)	0.19 (66%)	0.29	2.8
	500	613	0.14 (27%)	0.37 (78%)	0.51	3.3
	600	427	0.17 (40%)	0.25 (60%)	0.42	3.5
1:3	400	476	0.12 (31%)	0.27 (69%)	0.39	3.3
	500	700	0.17 (27%)	0.46 (73%)	0.63	3.6
	600	504	0.14 (34%)	0.27 (66%)	0.41	3.2



ตารางที่ 1 ผลของอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (เวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 ชั่วโมง และเวลาในการคาร์บอนไนซ์ 1 ชั่วโมง) (ต่อ)

อัตราส่วนวัตถุดิบต่อ กรดฟอสฟอริก (โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิในการ คาร์บอนไนซ์ (°C)	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	$V_{meso+mac}$ (cm^3/g)	V_T (cm^3/g)	D_p (nm)
1:4	400	543	0.13 (28%)	0.33 (72%)	0.46	3.4
	500	728	0.16 (18%)	0.74 (82%)	0.90	5.0
	600	508	0.07 (17%)	0.45 (83%)	0.54	4.2

ในการศึกษาผลของเวลาในการแช่สารกระตุ้นต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ทำการทดลองโดยการเพิ่มเวลาในการแช่สารกระตุ้นจาก 1 ชั่วโมง เป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการแช่สารกระตุ้น พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าลดลง โดยถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 604–700 m^2/g มีปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์อยู่ระหว่าง 0.54–0.63 cm^3/g โดยมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ สูงถึงร้อยละ 70–73 มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กร้อยละ 27–30 ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo และ Rockstraw [9] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกถั่วพีแคนโดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ซึ่งเมื่อเพิ่มเวลาในการกระตุ้นจาก 10 นาทีไปเป็น 60 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวลดลง

ตารางที่ 2 ผลของเวลาในการแช่สารกระตุ้นต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก (อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง)

เวลาในการแช่สารกระตุ้น (ชั่วโมง)	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	$V_{meso+mac}$ (cm^3/g)	V_T (cm^3/g)	D_p (nm)
1	700	0.17 (27%)	0.46 (73%)	0.63	3.6
1.5	630	0.17 (30%)	0.39 (70%)	0.56	3.6
2	604	0.15 (28%)	0.39 (72%)	0.54	3.6

2.2 การเตรียมโดยการกระตุ้นทางกายภาพ

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพ ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 600 700 และ 800°C โดยใช้เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะไป

ทำลายเนื้อของวัตถุดิบทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของรูพรุน นอกจากนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้น ยังไปช่วยกำจัดน้ำมันที่ติดขึ้นแล้วหลุดนอกระบบรูพรุนให้หลุดตัวไป ทำให้เกิดการเปิดของรูพรุน [10] โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yun และคณะ [10] ที่ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากฟางข้าวโดยการกระตุ้นด้วย CO_2 แล้วพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกระตุ้นจาก 700 ไปเป็น 800°C จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวมีค่าเพียง 14–57 m^2/g นั้นแสดงให้เห็นว่า กากขาวไม่เหมาะสมในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางกายภาพโดยใช้ CO_2

สำหรับปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วย CO_2 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากขาว มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.02–0.04 cm^3/g โดยถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กและปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ใกล้เคียงกัน โดยแนวโน้มของปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้สอดคล้องกับพื้นที่ผิว กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นสูงขึ้น จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นนั้นไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ผลของอุณหภูมิในการกระตุ้นต่อสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวโดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพด้วย CO_2 (เวลาในการกระตุ้น 1 ชั่วโมง)

อุณหภูมิในการกระตุ้น (°C)	S_{BET} (m^2/g)	V_{mic} (cm^3/g)	$V_{\text{meso+mac}}$ (cm^3/g)	V_{T} (cm^3/g)	D_p (nm)
600	14	0.01 (50%)	0.01 (50%)	0.02	4.4
700	53	0.02 (67%)	0.01 (33%)	0.03	2.4
800	57	0.02 (50%)	0.02 (50%)	0.04	3.2

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาวโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริกของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลชนิดต่าง ๆ โดยการกระตุ้นทางเคมีเช่นเดียวกัน พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาวมีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยที่กระตุ้นด้วย KOH [11] ผลของต้นศรีตรังและเมล็ดลูกพลัมที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก [12] เส้นใยปอแก้วที่กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกเช่นกัน [13] รวมถึงเนื้อชั้นในของปาล์ม macauba เปลือกลูกสน และใบปาล์ม carnauba กระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก และ CaCl_2 [14] หนุ่ทะเลกระตุ้นด้วย ZnCl_2 [15] และกากกาแฟกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก [16] โดยมีพื้นที่ผิวใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากต้น *Euphorbia rigida* ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก [17]



ตารางที่ 4 สมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

วัตถุดิบ	สารกระตุ้น	S_{BET} (m^2/g)	V_T (cm^3/g)	อ้างอิง
กากขาว	H_3PO_4	728	0.90	งานวิจัยนี้
ชานอ้อย	KOH	100	—	Azmi และคณะ [11]
ผลของต้นศรีตรัง (jacaranda)	H_3PO_4	235	0.11	Treviño-Cordero และคณะ
เมล็ดลูกพลัม		417	0.204	[12]
เส้นใยปอแก้ว (kenaf core fiber)	H_3PO_4	299	—	Shamsuddina และคณะ [13]
เนื้อชั้นในของปาล์ม macauba	$CaCl_2$	265	0.121	
(macauba palm endocarp)	H_3PO_4	371	0.160	
เปลือกลูกสน	$CaCl_2$	290	0.137	Lacerda และคณะ [14]
	H_3PO_4	296	0.132	
ใบปาล์ม carnauba	$CaCl_2$	431	0.249	
	H_3PO_4	402	0.200	
หญ้าทะเล (Posidonia oceanica)	$ZnCl_2$	503	0.058	Ncibi และคณะ [15]
กากกาแฟ	H_3PO_4	696	0.59	Tehrani และคณะ [16]
ต้น <i>Euphorbia rigida</i>	H_2SO_4	741	0.30	Gerçel และคณะ [17]

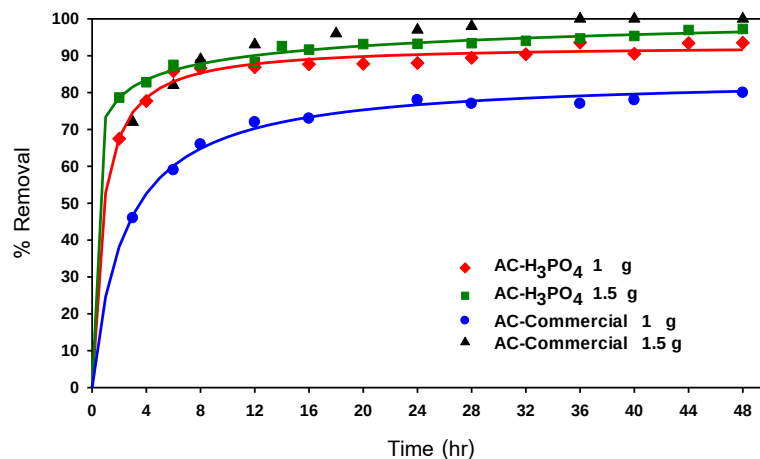
3. การศึกษาการดูดซับสีของน้ำทิ้ง

ในการศึกษาการดูดซับสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ทำการเลือกถ่านกัมมันต์จากกากขาวที่มีสถานะการเตรียม ดังนี้ กระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:3 โดยน้ำหนัก เวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 ชั่วโมง อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ $500^\circ C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง ($700 m^2/g$) อย่างไรก็ตาม ที่การใช้ อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:4 โดยน้ำหนัก ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่า แต่สูงกว่าเพียงเล็กน้อย (สูงกว่าเพียง $28 m^2/g$) ซึ่งการใช้สารเคมีที่มากทำให้เป็นการสิ้นเปลือง

ภาพที่ 2 แสดงร้อยละการกำจัดสีของน้ำทิ้งโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และถ่านกัมมันต์ทางการค้าเปรียบเทียบกับ โดยใช้ปริมาณของถ่านกัมมันต์ 1 และ 1.5 กรัม พบว่า การกำจัดสีมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยในช่วง 4 ชั่วโมงแรก การดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่เป็น ตัวอย่างเดียวกัน พบว่า ที่เวลาในการดูดซับเท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 1 กรัม เป็น 1.5 กรัม ค่าการกำจัดสีจะ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาว ($AC-H_3PO_4$) มีร้อยละการกำจัดสีอยู่ที่ 93 และ 97 เมื่อใช้ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม และ 1.5 กรัม ตามลำดับ สำหรับถ่านกัมมันต์ทางการค้า ($AC-Commercial$) มีร้อยละการกำจัดสีสูงสุด ร้อยละ 75 และ 100 เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้กับ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีร้อยละการกำจัดสีที่น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เมื่อใช้ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม ที่ทุกเวลาการดูดซับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์เป็น 1.5 กรัม พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ากำจัดสี ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้เพียงร้อยละ 3 ซึ่งถือว่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า (ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิว $1,129 m^2/g$ และมีปริมาตรรู

พูนรวม $1.05 \text{ cm}^3/\text{g}$) แต่การกำจัดสีกลับมากกว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 กรัม และมีร้อยละการกำจัดสีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.5 กรัม

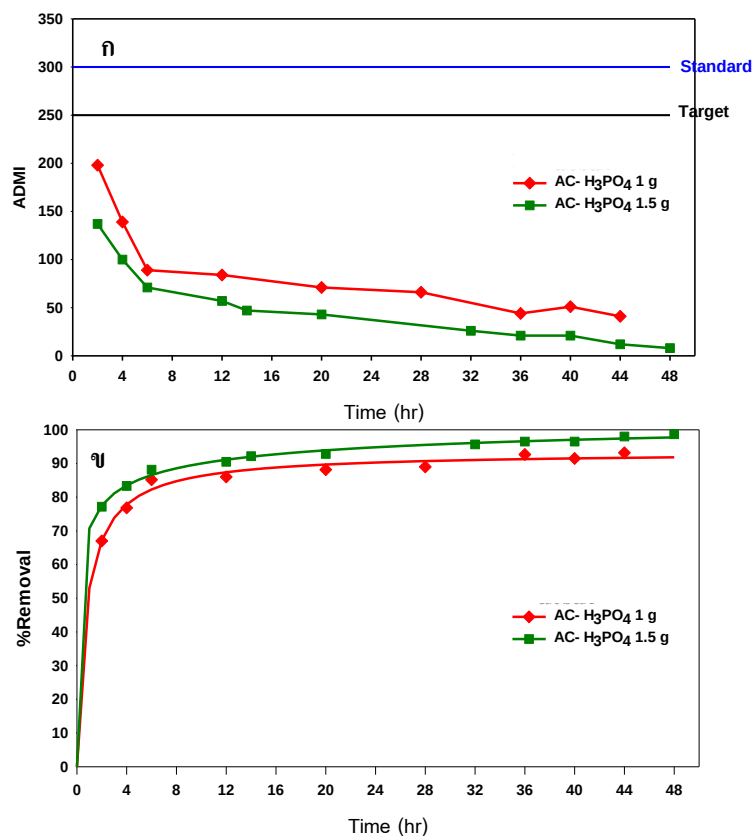
เมื่อพิจารณาเป้าหมายของทางโรงงานที่ตั้งไว้ว่าต้องการกำจัดสีร้อยละ 58 พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวปริมาณ 1 และ 1.5 กรัม ใช้เวลาในการดูดซับเพียง 1.4 และ 0.7 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการกำจัดสีเพื่อให้ได้ค่าเป้าหมาย ส่วนถ่านกัมมันต์ทางการค้าใช้เวลาในการดูดซับ 5.5 และ 2 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ นั่นคือ ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากกากของเสียของโรงงานสามารถดูดซับได้ดีและรวดเร็วกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า



ภาพที่ 2 ร้อยละการกำจัดสีของน้ำทิ้งโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาว (AC-H₃PO₄) เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (AC-Commercial)

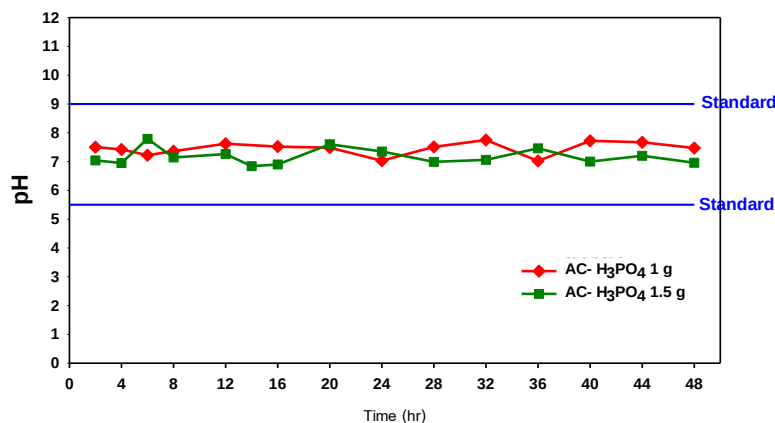
สำหรับการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เมื่อทำการวัดค่าสีในหน่วย ADMI ได้ผลการทดลองในภาพที่ 3 (ก) พบว่าภายหลังการดูดซับ น้ำทิ้งมีค่าสีไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด (standard) และมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมายของทางโรงงาน (target) ซึ่งตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ. 2559 กำหนดไว้ว่า ค่าสีสำหรับน้ำทิ้งต้องมีค่าไม่เกิน 300 ADMI ส่วนค่าเป้าหมายของทางโรงงาน ต้องการลดค่าสีให้อยู่ที่ 250 ADMI โดยน้ำทิ้งเริ่มต้นก่อนการดูดซับ มีค่าสีอยู่ที่ 600 ADMI

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสีภายหลังการดูดซับกับค่าสีของน้ำทิ้งเริ่มต้นให้อยู่ในรูปแบบของร้อยละการกำจัดสี (% removal) ดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) พบว่า ร้อยละการกำจัดสีมีค่าใกล้เคียงกันกับร้อยละการกำจัดสีเมื่อทดสอบด้วยเทคนิค UV-Spectroscopy ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับทุก ๆ ตัวอย่าง โดยสำหรับตัวอย่างที่มีค่าร้อยละการกำจัดสีที่แตกต่างกัน จะแตกต่างกันเพียงร้อยละ 1-3 เท่านั้น ดังนั้น การวัดร้อยละการกำจัดสีจากทั้ง 2 เทคนิค ให้ข้อมูลที่ตรงกัน



ภาพที่ 3 (ก) ค่าในหน่วย ADM และ (ข) ร้อยละการกำจัดสีของน้ำทิ้งหลังการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากข้าว (AC-H₃PO₄)

ตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม พ.ศ.2559 กำหนดไว้ว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มีค่ามาตรฐานควบคุมอยู่ที่ 5.5-9.0 [1] ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้ว มีค่า pH เท่ากับ 8.99 และเมื่อทำการดูดซับสีของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำตัวอย่างภายหลังการดูดซับยังคงมีค่าตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำตัวอย่างภายหลังการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากข้าว เทียบกับค่ามาตรฐานจากกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากากขาวซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษสามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนอยู่ในโครงสร้าง โดยการกระตุ้นกากขาวด้วยกรดฟอสฟอริกที่อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและสารกระตุ้น 1:4 โดยน้ำหนัก เวลาในการแช่สารกระตุ้น 1 ชั่วโมง อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดถึง 728 m²/g ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุชีวมวลหลาย ๆ ชนิด อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นกากขาวด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สามารถเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนสูงได้ และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาทำการกำจัดสีของน้ำทิ้งของทางโรงงานเอง พบว่า สามารถกำจัดสีได้สูงถึงร้อยละ 97 ในเวลา 20 ชั่วโมง แต่ถ้าต้องการกำจัดสีให้ได้ค่าตามเป้าหมายของทางโรงงาน คือ ร้อยละ 58 ใช้เวลาดูดซับเพียง 0.7 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้า นอกจากนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างภายหลังการดูดซับ พบว่า มีค่าสีในหน่วย ADMI ต่ำกว่ามาตรฐาน ตามประกาศของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ภายในช่วงที่มาตรฐานกำหนด ดังนั้น กากขาวจึงมีศักยภาพที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

1. Pollution Control Department. Industrial wastewater discharge control standard [Internet]. 2016 [updated 2016 June 6; cited 2017 September 10]. Available from: www.ieat.go.th
2. Mungkarndee P, Bantao C, Srisutikamol C. Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater Colour of The 1st National Conference 2015 on Innovative Education for Sustainable Development; 2008 July 15–16; Khon Kaen; Thailand.
3. Apiwatanapawat W, Kreetachat T, Vaithanomsat P. Decolorization of effluent from pulp and paper mill by ozone oxidation. Proceedings of 45th Kasetsart University Annual Conference: Architecture and Engineering and Natural Resources and Environment; 2007 January 30–February 2; Bangkok; Thailand.
4. Do D D. Adsorption analysis: Equilibria and kinetics. Singapore: Imperial College Press; 1998.
5. Ngernyen Y, Kamwilaisak K, Chano S, Eamdamrong P. Color removal of wastewater from pulp and paper industry by activated carbon. Engineering Journal Siam University. 2014; 15(2), 37–46. Thai.
6. Heidari A, Younesi H, Rashidi A, Ghoreyshi A. Adsorptive removal of CO₂ on highly microporous activated carbons prepared from *Eucalyptus camaldulensis* wood: Effect of chemical activation. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2014; 45: 579–588.
7. Yorgun S, Yildiz D. Preparation and characterization of activated carbons from *Paulownia* wood by chemical activation with H₃PO₄. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 2015; 53: 122–131.
8. Teng H, Yeh TS, Hsu LY. Preparation of activated carbon from bituminous coal with phosphoric acid activation. Carbon 1998; 36(9): 1387–1395.



9. Guo Y, Rockstraw DA. Physicochemical properties of carbons prepared from pecan shell by phosphoric acid activation. *Bioresource Technology* 2007; 98(8): 1513–1521.
10. Yun CH, Park YH, Park CR. Effects of pre-carbonization on porosity development of activated carbons from rice straw. *Carbon* 2001; 39(4): 559–567.
11. Azmi NB, Bashir MJK, Sethupathi S, Wei LJ, Aun NC. Stabilized landfill leachate treatment by sugarcane bagasse derived activated carbon for removal of color, COD and $\text{NH}_3\text{-N}$ – Optimization of preparation conditions by RSM. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2015, 3(2): 1287–1294.
12. Treviño-Cordero H, Juárez-Aguilar LG, Mendoza-Castillo DI, Hernández-Montoya V, Bonilla-Petriciolet A, Montes-Morán MA. Synthesis and adsorption properties of activated carbons from biomass of *Prunus domestica* and *Jacaranda mimosifolia* for the removal of heavy metals and dyes from water. *Industrial Crops and Products* 2013, 42(3): 315–323.
13. Shamsuddin MS, Yusoff NRN, Sulaiman MA. Synthesis and Characterization of Activated Carbon Produced from Kenaf Core Fiber Using H_3PO_4 Activation. *Procedia Chemistry* 2016, 19(1): 558–565.
14. Da Silva Lacerda V, López-Sotelo JB, Correa-Guimarães A, Hernández-Navarro S, Sánchez-Báscones M, Navas-Gracia LM, Martín-Gil J. Rhodamine B removal with activated carbons obtained from lignocellulosic waste. *Journal of Environmental Management* 2015, 155(5): 67–76
15. Ncibi MC, Ranguin R, Pintor MJ, Jeanne-Rose V, Sillanpää M, Gaspard S. Preparation and characterization of chemically activated carbons derived from Mediterranean *Posidonia oceanica* (L.) fibres. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2014, 109(9): 205–214.
16. Tehrani NF, Aznar JS, Kiros Y. Coffee extract residue for production of ethanol and activated carbons. *Journal of Cleaner Production* 2015, 91(3): 64–70.
17. Gerçel Ö, Özcan A, Özcan AS, Gerçel HF. Preparation of activated carbon from a renewable bio-plant of *Euphorbia rigida* by H_2SO_4 activation and its adsorption behavior in aqueous solutions. *Applied Surface Science* 2007; 253(11): 4843–4852.