

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ  
และการศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้ง

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

ฐิตาพร คำภู (Thitaporn Khumphu)\* ธนวรรธก์ ไพรพงษ์ (Thanawat Praiphong)\*  
ธนาริป์ สีละพัฒน์ (Thanathip Seelapath)\* ดร.ยัวร์ตัน เงินเย็น (Dr. Yuvarat Ngernyen) \*\*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาวโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยกรด  $H_3PO_4$  และฝุ่นไม้โดยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊ส  $CO_2$  ผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ (73%) โดยมีพื้นที่ผิว  $700 m^2/g$  และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย  $3.6 nm$  ส่วนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากฝุ่นไม้มีพื้นที่ผิว  $357 m^2/g$  โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย  $2.1 nm$  จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ทั้งสองมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว พบว่าร้อยละการกำจัดสีมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ โดยการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 20 ชั่วโมง เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 และ 1.5 กรัม โดยมีร้อยละการกำจัดสูงสุด 93 และ 97 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการกำจัดสีตามค่าเป้าหมายของทางโรงงาน (ร้อยละ 58) การดูดซับจะใช้เวลาเพียง 1.4 และ 0.7 ชั่วโมง ตามลำดับ

ABSTRACT

This work focused on the preparation of activated carbon from pulp residue by chemical activation with  $H_3PO_4$  and wood dust by physical activation with  $CO_2$ . The results showed that the activated carbon prepared from pulp residue was dominated with meso and macropore structure (73%) with the surface area of  $700 m^2/g$  and average pore width of  $3.6 nm$ . The prepared activated carbon from wood dust had surface area of  $357 m^2/g$  with average pore size of  $2.1 nm$ . The prepared activated carbons were then used as adsorbent for color removal of biological treated wastewater from pulp and paper industry. It was found that the percentage of color removal increased with the increasing of amount. The adsorption reaches equilibrium at 20 hr for the using of activated carbons of 1 and 1.5 g with the maximum percentage of 93% and 97% , respectively, for both raw materials. However, the times to reach target value of the industry (58% color removal) were very fast at 1.4 and 0.7 hr for amount of prepared activated carbons of 1 and 1.5 g, respectively.

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ ของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ น้ำทิ้ง

**Keywords:** Activated carbon, Waste from pulp and paper industry, Wastewater

\* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

กระบวนการผลิตเชื้อและกระดาษของโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง มีกากของเสียที่เกิดขึ้นหลายชนิด เช่น เปลือกไม้ ฟ่อนไม้ กากขาว กากปูนขาว และกากตะกอนน้ำทิ้ง โดยเปลือกไม้และฟ่อนไม้ทางโรงงานนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ กากปูนขาวนำกลับเข้าสู่เตาเผาเพื่อนำกลับ ไปใช้ใหม่ กากตะกอนน้ำทิ้งนำไปทำปุ๋ยและใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ ส่วนกากขาวยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ และต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการกำจัด ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำกากขาวนี้มาใช้ประโยชน์ โดยเพื่อให้เกิดประสิทธิผลกับทางโรงงานมากที่สุด จึงมุ่งไปที่การใช้ประโยชน์ภายในโรงงานเอง

ผู้วิจัยจึงได้ค้นหาปัญหาของทางโรงงานที่ยังต้องการแก้ไข พบว่า น้ำทิ้งของโรงงานซึ่งผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว ยังคงมีสีน้ำตาลเข้ม ดังนั้น จึงต้องหาวิธีการบำบัดสี ก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งผ่านกระบวนการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ต่อไป เนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสีน้ำตาลเข้มอาจเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป

การบำบัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษมีอยู่หลายวิธี เช่น การบำบัดโดยวิธีการโฟโตแคตาไลซิส โดยใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ภิญญชิตาและคณะ, 2551) หรือ การบำบัดโดยใช้กระบวนการโอโซน ออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (วรารักษ์และคณะ, 2550) แต่กระบวนการเหล่านี้มีราคาแพง และค่อนข้างซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ยังมีกระบวนการที่เข้าใจได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และไม่ซับซ้อน เรียกว่า กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลหรือไอออนของสารที่เราไม่ต้องการ เข้ามายึดเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคของแข็งด้วยแรงทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ โดยสมบัติของตัวดูดซับต้องเป็นวัสดุที่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เช่น ซีโอไลต์ อะลูมินา ซิลิกาเจล และถ่านกัมมันต์ ซึ่งยูวรัตน์ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้งของโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1.5 กรัม สามารถกำจัดสีของน้ำทิ้งปริมาณ 50 มิลลิลิตร ในกระบวนการดูดซับแบบกะ (batch) ได้ 100% โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายจากการซื้อตัวดูดซับนี้

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐานรูปแบบหนึ่ง ที่ผลิตได้จากการนำวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านหิน ไม้ แกลบ ชังข้าวโพด ฟางข้าว หรือ ขากรถยนต์ มาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์หรือกระบวนการกระตุ้น (activation) ทำให้ได้โครงสร้างที่มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เกิดพื้นผิวภายในเพิ่มขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูง การผลิตถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) และการกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) โดยการกระตุ้นทางกายภาพ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบในสภาวะไร้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ ขั้นตอนนี้เป็นทำให้เกิดรูพรุนเบื้องต้น ยังนำถ่านชาร์ไปดูดซับไม่ได้เนื่องจากถ่านชาร์มีส่วนผสมของน้ำมันดิบ (tar) อยู่บางส่วนจึงต้องนำไปผ่านขั้นตอนการกระตุ้น (activation) ซึ่งเป็นการทำให้ถ่านชาร์มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยใช้แก๊สเป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจน หรือ อากาศ เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 800–1000°C ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ ส่วนการกระตุ้นทางเคมี เป็นวิธีผลิตถ่านกัมมันต์แบบขั้นตอนเดียว คือ ผสมวัตถุดิบกับสารเคมี โดยสารเคมีจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 400–600°C สารเคมีที่ใช้ส่วนมาก ได้แก่ กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น (ยูวรัตน์, ขนิษฐา, 2556)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาวซึ่งเป็นกากของเสียที่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ และฟ่อนไม้ที่อาจมีการนำไปใช้ประโยชน์โดยการเป็นเชื้อเพลิง แต่การนำมาเตรียมเป็นถ่านกัมมันต์จะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่า

จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาทำการกำจัดสีของน้ำทิ้ง โดยทางโรงงานมีเป้าหมายในการกำจัดสีอยู่ที่ร้อยละ 58

### วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาวและฝุ่นไม้ ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ และศึกษาการดูดซับสีของน้ำทิ้ง โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

### วิธีการวิจัย

#### 1. วัตถุดิบและการวิเคราะห์

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ กากขาว (pulp residue) และฝุ่นไม้ (wood dust) ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษแห่งหนึ่ง นำวัตถุดิบที่ได้มาวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มากำหนดอุณหภูมิในการเตรียมถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังสามารถหาค่าความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ซึ่งหากวัตถุดิบมีค่าความชื้นสูง ต้องทำการลดความชื้นก่อนนำวัตถุดิบนั้นมาใช้

#### 2. การเตรียมถ่านกัมมันต์

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากขาวใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก ส่วนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากฝุ่นไม้ใช้การกระตุ้นทางกายภาพด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการกระตุ้นทางเคมีจะนำกากขาวปริมาณ 30 กรัม มาแช่ในกรดฟอสฟอริก ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบและกรด 1:3 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา นำตัวอย่างบรรจุใส่เตาปฏิกรณ์ที่ทำจากเหล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร) แล้วจึงนำเตาปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเผาไฟฟ้า ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ที่อัตราการไหล 200 cm<sup>3</sup>/min ให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์ที่ได้จากข้อที่ 1 ด้วยอัตราการให้ความร้อน 30°C/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการปิดสวิตช์เตาเผาไฟฟ้า ปล่อยให้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำเปล่า เพื่อกำจัดกรดส่วนเกินที่ติดอยู่ที่ตัวอย่าง โดยทำการล้างซ้ำหลายๆ ครั้ง ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่า pH ของน้ำที่ผ่านการล้างมีค่าเท่ากับ pH ของน้ำที่ใช้ล้างเริ่มต้น จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ (AC-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ไปอบที่อุณหภูมิ 120°C จนแห้งแล้วจึงนำตัวอย่าง ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ดังสมการที่ (1) โดย

$$\text{ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น (30 g)}} \times 100\% \quad (1)$$

สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์จากฝุ่นไม้โดยการกระตุ้นทางกายภาพ นำวัตถุดิบบรรจุในเตาปฏิกรณ์ และเตาเผาไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับการกระตุ้นทางเคมี โดยทำการคาร์บอนไนซ์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิการสลายตัวจากข้อ 1 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาในการคาร์บอนไนซ์ ทำการปิดสวิตช์เตาเผา ปล่อยให้เตาเผาเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน จะได้ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ จากนั้นนำถ่านชาร์มากระตุ้น โดยทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ เปิดสวิตช์เตาเผาไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ต้องการกระตุ้น นั่นคือ 800°C เมื่อถึงอุณหภูมิดังกล่าว ทำการปิดแก๊สไนโตรเจนแล้วเปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่เตาปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 200 cm<sup>3</sup>/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาในการกระตุ้น ทำการปิดแก๊ส CO<sub>2</sub> และปิดสวิตช์เตาเผา ปล่อยให้

เตาเผาชิ้นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน คำนวณร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ โดยให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีสัญลักษณ์เป็น AC-CO<sub>2</sub>

### 3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ สมบัติรูพรุน และหมู่ฟังก์ชันพื้นผิว โดยการวิเคราะห์สมบัติรูพรุน ใช้การวัดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C หรือ 77 K ด้วยเครื่อง ASAP2010 (Micromeritic) ซึ่งก่อนทำการวิเคราะห์ต้องนำตัวอย่างไป outgas ที่อุณหภูมิ 300°C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ (< 50 μmHg) เพื่อกำจัดไอน้ำและสารระเหยอื่น ๆ จากนั้น นำตัวอย่างมาทำการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ (P/P<sup>0</sup>) ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 0.05–0.99 ซึ่งจะทำได้ไอโซเทอมการดูดซับ โดยจากไอโซเทอมการดูดซับที่ได้นี้ สามารถนำมาคำนวณสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ดังนี้ พื้นที่จำเพาะ (S<sub>BET</sub>) ใช้สมการของ Brunaver–Emmett–Teller ที่ความดันสัมพัทธ์ 0.05–0.3 ปริมาตรรูพรุนรวม (V<sub>T</sub>) คำนวณจากการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ P/P<sup>0</sup> = 0.99 ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (V<sub>mic</sub>) ใช้สมการของ t-plot ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (V<sub>meso+mac</sub>) หาได้จากการนำปริมาตรรูพรุนรวมลบด้วยปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (D<sub>p</sub>) หาได้จากสมการ (4×ปริมาตรรูพรุนรวม)/พื้นที่ผิว ส่วนการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นผิว ใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared spectroscopy หรือ FTIR (Tensor27 bruker) โดยนำถ่านกัมมันต์มาบดเป็นผง แล้วผสมกับผง KBr จากนั้นทำการอัดด้วยแรงดัน เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่น แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ โดยทำการวิเคราะห์ที่เลขคลื่น 4000–600 cm<sup>-1</sup>

### 4. การศึกษาการดูดซับสีของน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ น้ำทิ้งหลังการบำบัดทางชีวภาพของโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษแห่งหนึ่ง โดยใช้ในการดูดซับแบบกะด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากทั้งกากขาวและฝุ่นไม้ ทำการทดลองโดยนำถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1 และ 1.5 กรัม มาแช่ในน้ำทิ้งปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลาตั้งแต่ 1–48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาในการดูดซับ นำตัวอย่างมาทำการกรองแยกน้ำทิ้งและถ่านกัมมันต์ออกจากกันโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 นำน้ำตัวอย่างที่ทำการกรองแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV–spectrophotometer (G11034 Agilent) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ<sub>max</sub>) เท่ากับ 400 นาโนเมตร (ยูวีเรตินและคณะ, 2557) โดยคำนวณร้อยละการกำจัดสี (%removal) ได้จากสมการที่ (2)

$$\text{ร้อยละการกำจัดสี} = \left( \frac{\text{abs}_0 - \text{abs}_t}{\text{abs}_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

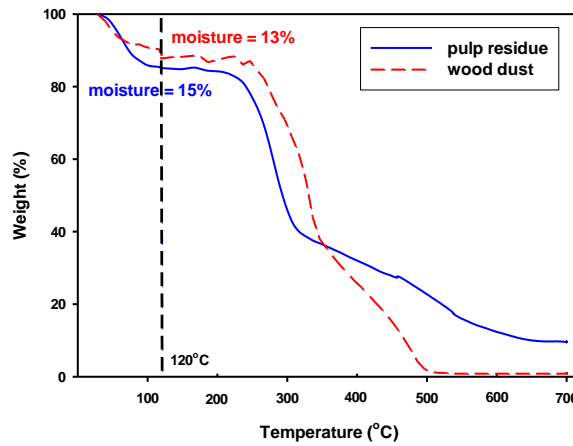
เมื่อ *abs*<sub>0</sub> คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งหลังการบำบัดทางชีวภาพ และ *abs*<sub>t</sub> คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งหลังการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ

## ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 1. สมบัติของวัสดุดิบ

การวิเคราะห์การสลายตัวของกากขาวและฝุ่นไม้แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า น้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 120°C ซึ่งน้ำหนักที่หายไปนี้คือ ความชื้นที่อยู่ภายในตัวอย่าง โดยกากขาวมีค่าความชื้น 15% ส่วนฝุ่นไม้มีความชื้น 13% ซึ่งจะเห็นได้ว่า วัสดุดิบทั้งสองชนิดมีความชื้นสูงพอสมควร ดังนั้น ต้องทำการอบตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นก่อนนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ น้ำหนักของตัวอย่างทั้งสองจะลดลงเป็นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 250–550°C ซึ่งเป็นการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยเมื่อสารต่างๆ ระเหยออกไปจากโครงสร้างแล้ว องค์ประกอบที่เหลืออยู่จึงเป็นคาร์บอน ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์คือช่วงอุณหภูมินี้ งานวิจัยนี้จึงทำการ

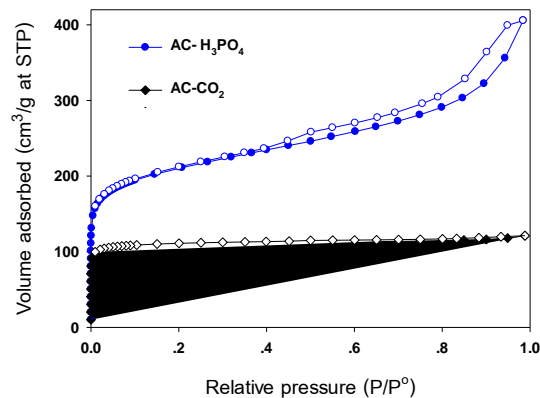
เตรียมถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่อุณหภูมิ 500°C และใช้อุณหภูมิในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400°C เมื่อเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 1 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของกากขาวและฝุ่นไม้

## 2. สมบัติของถ่านกัมมันต์

รูปที่ 2 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยถ่านกัมมันต์จากกากขาวที่เตรียมด้วยกรด  $H_3PO_4$  มีลักษณะของไอโซเทอมเป็นชนิดที่ 4 ตามการแบ่งของ IUPAC ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอมของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุน 2–50 nm) ส่วนถ่านกัมมันต์จากฝุ่นไม้ที่เตรียมด้วยแก๊ส  $CO_2$  มีลักษณะของไอโซเทอมเป็นชนิดที่ 1 ซึ่งเป็นลักษณะไอโซเทอมของตัวดูดซับที่มีรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุน < 2 nm) โดยข้อมูลที่ได้จากไอโซเทอมการดูดซับนี้นำไปคำนวณสมบัติรูพรุนต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้  
(สัญลักษณ์ทึบแทนการดูดซับ สัญลักษณ์โปร่งแทนการคายซับ)

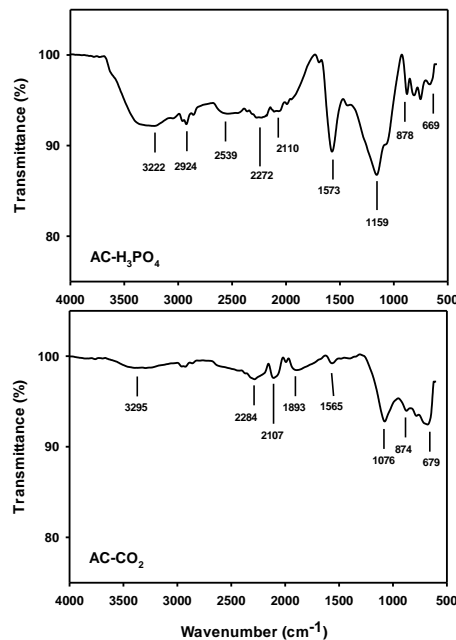
ตารางที่ 1 ร้อยละผลได้และสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

ตัวอย่าง	ร้อยละผลได้	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (cm <sup>3</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและใหญ่ (cm <sup>3</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนรวม (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
AC-H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	39	700	0.17 (27%)	0.46 (73%)	0.63	3.6
AC-CO <sub>2</sub>	38	357	0.14 (77%)	0.05 (23%)	0.19	2.1

จากผลการทดลองในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงสมบัติรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากขาว (AC-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) มีพื้นที่ผิวสูงถึง 700 m<sup>2</sup>/g มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.63 cm<sup>3</sup>/g โดยมีรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ 73% มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 3.6 nm ส่วนถ่านกัมมันต์จากฝุ่นไม้ (AC-CO<sub>2</sub>) มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมต่ำกว่า คือ 357 m<sup>2</sup>/g และ 0.19 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ โดยมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ถึง 77% และมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าคือ 2.1 nm

นอกจากนี้ ตารางที่ 1 ยังแสดงร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาวโดยใช้กรดฟอสฟอริกและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากฝุ่นไม้โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า วัตถุดิบทั้งสองชนิด ให้ร้อยละผลได้ของถ่านกัมมันต์ที่ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 39 และ 38 ตามลำดับ

รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัม FTIR ของหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของตัวอย่างถ่านกัมมันต์ทั้งสอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ทั้งสองชนิดมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกันแต่แตกต่างกันที่ปริมาณ โดยที่เลขคลื่น 1565 และ 1573 cm<sup>-1</sup> เป็นการสั่นแบบยืดไม่อ้อมตัวของพันธะ C=C และการสั่นของอโรมาติก C=C (Yorgan, Yildiz, 2015).

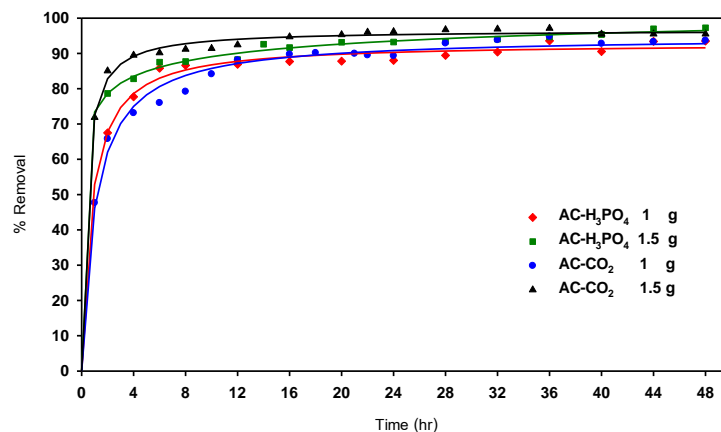


รูปที่ 3 กราฟ FTIR ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

### 3. การดูดซับสีของน้ำทิ้ง

รูปที่ 4 แสดงร้อยละการกำจัดสีจากน้ำทิ้ง พบว่า การกำจัดสีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 4 ชั่วโมงแรก และเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง สำหรับทุกตัวอย่าง และเมื่อพิจารณาที่ตัวอย่างถ่านกัมมันต์เดียวกัน พบว่า ที่เวลาในการดูดซับเท่ากัน เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์จาก 1 กรัม เป็น 1.5 กรัม การกำจัดสีมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สมดุล ถ่านกัมมันต์จากการขาวและฝุ่นไม้ มีร้อยละการกำจัดสี 93 และ 97 เมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1 และ 1.5 กรัม ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ร้อยละการกำจัดสีของถ่านกัมมันต์จากวัตถุดิบทั้งสองชนิดมีค่าเท่ากัน ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกากขาวจะมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวมมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากฝุ่นไม้ นั่นคือ การดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ไม้ได้ขึ้นอยู่กับสมบัติรูพรุนแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังคงขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของถ่านกัมมันต์อีกด้วย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ถ่านกัมมันต์ทั้งสองมีขนาดของหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวที่เหมือนกัน

เมื่อพิจารณาค่าเป้าหมายของทางโรงงานที่ต้องการกำจัดสีร้อยละ 58 พบว่า การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขาวด้วยกรดฟอสฟอริก ปริมาณ 1 และ 1.5 กรัม ใช้เวลาในการดูดซับเพียง 1.4 และ 0.7 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนการใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากฝุ่นไม้ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณ 1 และ 1.5 กรัม ใช้เวลาในการดูดซับเพียง 1.6 และ 0.7 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 4 ร้อยละการกำจัดสีจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนสามารถเตรียมได้จากกากขาวและฝุ่นไม้ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ การกระตุ้นกากขาวด้วยกรดฟอสฟอริกได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 700 m<sup>2</sup>/g มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.63 cm<sup>3</sup>/g โดยมีรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ 73% ส่วนการกระตุ้นฝุ่นไม้ด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 357 m<sup>2</sup>/g มีปริมาตรรูพรุนรวม 0.19 cm<sup>3</sup>/g โดยมีรูพรุนขนาดเล็ก 77% โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัตถุดิบทั้งสองชนิด สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้วได้สูงถึงร้อยละ 97 โดยถ้าต้องการกำจัดสีตามค่าเป้าหมายของโรงงาน คือ ร้อยละ 58 จะใช้เวลาในการดูดซับเพียง 0.7 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากากขาวและฝุ่นไม้ซึ่งเป็นกากของเสีย มีศักยภาพที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีของน้ำทิ้ง





### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### เอกสารอ้างอิง

- กาญจนาทิศา มุ่งการดี, ฉลาด บรรเทา, ชูสิทธิ์ ศรีสุทธกมล. การบำบัดสีน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2551
- ยูรัตน์ เงินเย็น, ขนิษฐา คำวิไลศักดิ์. ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลของประเทศไทย: การทบทวนวรรณกรรม. วิศวกรรมสาร มข; 2556. 267-284
- ยูรัตน์ เงินเย็น และคณะ. การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม; 2557. 37-46
- วรารณ อภิวัฒน์ภิวัด, ต่อพงศ์ ภิรัชชาติ, พิลาณี ไวกนอมสตัย. การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45; 2550
- Yorgun S, Yildiz D. Preparation and characterization of activated carbons from Paulownia wood by chemical activation with  $H_3PO_4$ . Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers; 2015. 122–131.