

การใช้เถ้าลอย ในการบำบัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วย  
กระบวนการดูดซับ

The Use of Fly Ash to Remove Color of Wastewater from Pulp and Paper Industry by  
Adsorption

ศุพัตรา บุตรเสรีชัย (Supattra Budsareechai)\* จุติมา นิกรสังขพันธ์ (Thitima Nikronsangkaphinit)\*\*  
ศิลป์สุภา แก้วเกตุคำ (Sinsupa Kaewketkam)\*\* ดร.อชิป เหลืองไฟโรจน์ (Dr. Atip Lanugphairojana)\*\*\*  
ดร.ยุวรัตน์ เงินเย็น (Dr. Yuvarat Ngernyen)\*\*\*\*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษซึ่งผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพมาก่อนแล้ว ผลการทดลองพบว่า การกำจัดสีของเถ้าลอยมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.5 1 1.5 และ 2 กรัม โดยมีค่าการกำจัดสีสูงสุดคือ 76 86 90 และ 94% ตามลำดับ โดยการดูดซับในกระบวนการดูดซับแบบกะนี้ เข้าสู่สมดุลในเวลา 60 ชั่วโมง เมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการดูดซับแล้วมาทำการดูดซับซ้ำ พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีมีค่าลดลงเมื่อใช้ตัวดูดซับซ้ำ และตัวดูดซับสามารถใช้ซ้ำได้เพียง 2 ครั้ง หลังจากนั้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีจะมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่ต้องการ (58%) สำหรับการศึกษการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและตัวถูดูดซับจาก 2 ถึง 7 เท่า พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีมีค่าเท่าเดิมกับเมื่อใช้ตัวดูดซับและตัวถูดูดซับในปริมาณ 1 เท่า

ABSTRACT

This research used coal fly ash as adsorbent for color removal of wastewater from pulp and paper industry after activated sludge treatment. The results shows that the color removal of fly ash increased with adsorbent dosage, having maximum value of 76, 86, 90 and 94% for adsorbent dosage of 0.5, 1, 1.5 and 2 g, respectively. These batch adsorption experiments reached equilibrium in 60 hr. When repeated adsorption by used fly ash, it was found that the %removal decrease when reuse the sample and the sample can only use for 2 times after that the %removal less than the target value (58%). For the study of increasing adsorbent and adsorbate from 2 to 7 times, the %removal remain constant as the usage of adsorbent and adsorbate in 1 time.

คำสำคัญ: เถ้าลอย การดูดซับ น้ำทิ้ง

Keywords: Fly ash, Adsorption, Wastewater

\* นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*\* อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\*\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

เถ้าลอย (fly ash) เป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษแห้งหนึ่ง ซึ่งมีอยู่ในปริมาณที่มาก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเถ้าลอยนี้มาใช้ประโยชน์ โดยเพื่อให้เกิดประสิทธิผลกับทางโรงงานมากที่สุด จึงมองไปที่การใช้ประโยชน์ภายในโรงงาน ซึ่งจากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของเถ้าลอยถ่านหิน โดย Yao et al. (2015) พบว่า เถ้าลอยถ่านหินสามารถใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดิน (soil amelioration) ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง (construction industry) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ (zeolite synthesis) และใช้ในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม (environmental protection) ซึ่งใช้เถ้าลอยเป็นตัวดูดซับ โดยนำไปใช้กับตัวดูดซับที่เป็น ทั้งแก๊สและสารละลาย

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่างานวิจัยนี้จะนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ภายในโรงงาน โดยให้เกิดประสิทธิผลกับทางโรงงานมากที่สุด ผู้วิจัยจึงมองต่อไปถึงปัญหาของทางโรงงานที่ยังต้องการการแก้ไข พบว่า น้ำทิ้งของโรงงานซึ่งผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (activated sludge) แล้ว ยังมีสีน้ำตาลเข้ม และมีกลิ่นเหม็น ดังนั้น จึงต้องหาวิธีการบำบัดความเข้มของสีและกลิ่นนี้ก่อนที่จะปล่อยน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำทิ้งที่มีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นเหม็นเป็นที่น่ารังเกียจของคนทั่วไป

การบำบัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษมีอยู่หลายวิธี เช่น การบำบัดโดยวิธีการโฟโตแคตาไลซิส โดยใช้สารไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ภิญญ์ชิต, 2551) หรือ การบำบัดโดยใช้กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (วรารักษ์, 2550) แต่กระบวนการเหล่านี้มีราคาแพง อย่างไรก็ตาม ยังมีกระบวนการที่เข้าใจได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และไม่ซับซ้อน

เรียกว่า กระบวนการดูดซับ (adsorption process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อะตอมหรือโมเลกุลหรือไอออนของสารที่เราไม่ต้องการ (เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate)) เข้ามายึดเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคของแข็ง (เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)) ด้วยแรงทางเคมีหรือทางฟิสิกส์ (พูนศิริ, 2550) โดยสมบัติของตัวดูดซับต้องเป็นวัสดุที่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) อะลูมินา (alumina) ซิลิกาเจล (silica gel) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) โดย ชูวรรณ์ และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีของน้ำทิ้งของโรงงานผลิตเชื้อกระดาษและกระดาษแห้งหนึ่งด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า พบว่า ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 1.5 กรัม สามารถกำจัดสีของน้ำทิ้งปริมาตร 50 มิลลิลิตร ได้ 100% โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง ในกระบวนการดูดซับแบบกะ (batch) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าก็จะทำให้ทางโรงงานเกิดค่าใช้จ่ายจากการซื้อตัวดูดซับนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการใช้เถ้าลอยซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานในการบำบัดสีและกลิ่นน้ำทิ้งซึ่งผ่านกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้วด้วยกระบวนการดูดซับ โดยทำการศึกษาในกระบวนการดูดซับแบบกะ

## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### อุปกรณ์การทดลอง

ตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นกากของเสียของโรงงาน โดยเป็นผลพลอยได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่เป็นเชื้อเพลิงในการต้มน้ำของหม้อต้มไอน้ำในโรงงาน โดยถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกกันว่า เถ้าก้นเตา (bottom ash) ส่วนเถ้าที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนจนถึงประมาณ 200 ไมครอน จะลอยไปกับอากาศร้อน จึงเรียก เถ้าลอย (fly ash) ซึ่งจะถูกดักจับโดยที่ดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อนและเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบ

บริเวณโรงงาน สำหรับน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง เป็น น้ำที่หลังการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียของทางโรงงาน

### วิธีการทดลองและการวิเคราะห์

การทดลองแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ตอน ดังนี้

#### ตอนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 2 อย่าง ได้แก่ การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน และการหาสมบัติรูพรุน

##### (1) การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน

ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิในการสลายตัวของถ่าน โดย การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง อุณหภูมิ 700°C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน เพื่อไม่ให้เกิดการเผาไหม้ จากนั้น จึงเปลี่ยนบรรยากาศ ในการให้ความร้อนเป็นอากาศ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้หาค่าความชื้นของ ตัวอย่างถ่านได้

##### (2) การหาสมบัติรูพรุน ทำการวิเคราะห์ด้วย

เครื่อง ASAP2010 (Micromeritic) เพื่อหาไอโซเทอม การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196°C และจาก ไอโซเทอมการดูดซับที่ได้นี้ สามารถนำไปคำนวณหา พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area,  $S_{BET}$ ) ปริมาตรรูพรุนขนาดเล็ก (micropore volume,  $V_{mic}$ ) ปริมาตรรูพรุน ขนาดกลางและขนาดใหญ่ (meso and macropore volume,  $V_{meso+macro}$ ) ปริมาตรรูพรุนรวม (total pore volume,  $V_T$ ) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter,  $D_p$ ) ของถ่านได้

#### ตอนที่ 2 การศึกษาการดูดซับและกลั่นของ

##### น้ำทิ้งในกระบวนการดูดซับแบบกะ (batch)

การศึกษาในตอน 2 นี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

##### (1) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ซึ่ง

ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

ทำการทดลองโดยนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 120°C เพื่อไล่ความชื้น จากนั้น นำถ่านอบปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 0.5 1 1.5 และ 2 กรัม มาแช่ในน้ำทิ้งปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 4 – 96 ชั่วโมง โดยทำการ เก็บตัวอย่างทุก ๆ 4 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อครบกำหนดเวลา ทำ การกรองน้ำทิ้งและถ่านออกจากกันด้วยกระดาษ กรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นนำตัวอย่างไปหา เเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี (%removal) เทียบกับน้ำทิ้ง เริ่มต้น โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของ ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer (G11034, Agilent) ที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) 400 นาโน เมตร (ยูวีเรด และคณะ, 2557) โดยเปอร์เซ็นต์การ กำจัดสี (%removal) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\%removal = \left[ \frac{Abs_0 - Abs_t}{Abs_0} \right] \times 100$$

เมื่อ  $Abs_0$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำทิ้งเริ่มต้น และ  $Abs_t$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำหลังการดูดซับที่เวลา ใด ๆ โดยสำหรับการกำจัดกลิ่นนั้น ใช้ผู้ทดลองจำนวน 10 คน ในการดมกลิ่นของตัวอย่าง

##### (2) การศึกษาการใช้ตัวดูดซับซ้ำ เมื่อทราบ

ปริมาณของตัวดูดซับและเวลาในการดูดซับที่เหมาะสม จากการทดลอง (1) แล้ว จะทำการนำตัวดูดซับนั้นมาทำ การดูดซับซ้ำอีกครั้ง โดยใช้สภาวะการทดลองเดิม นั่น คือ แช่ในน้ำทิ้งปริมาตร 50 มิลลิลิตร และทำซ้ำไป เรื่อย ๆ จนค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี (%removal) มีค่า น้อยกว่า 58% ซึ่งเป็นค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานต้องการ

#### ตอนที่ 3 การศึกษาการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ

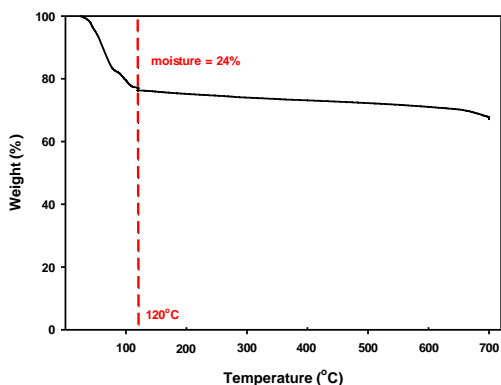
##### และตัวถูดูดซับ

การทดลองในตอน 3 นี้ ทำขึ้นเพื่อศึกษาว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ (ถ่าน) และตัวถูดูดซับ (น้ำทิ้ง) จะส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการขยายขนาดจาก lab scale ไปเป็นโรงงานนำร่อง หรือ pilot plant ซึ่งทำการ ทดลองโดยเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและตัวถูดูดซับขึ้นไป 2 3 4 5 6 และ 7 เท่า

## ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### ตอนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

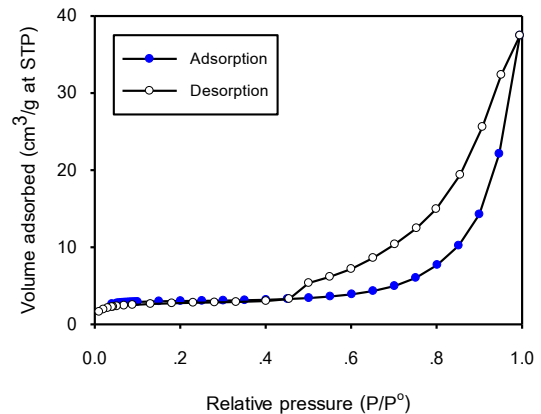
การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ ประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ 2 อย่าง ได้แก่ การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน และการหาสมบัติรูพรุน โดยภาพที่ 1 แสดงกราฟการสลายตัวทางความร้อนของถ้ำลอยถ่านหินตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 24°C) จนถึงอุณหภูมิ 700°C พบว่า น้ำหนักของถ้ำลอยถ่านหินลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำหนักลดลงเป็นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิประมาณ 120°C ซึ่งคือ ปริมาณความชื้นนั่นเอง โดยพบว่า ถ้ำลอยถ่านหินมีปริมาณความชื้นถึง 24% ดังนั้น ก่อนนำตัวอย่างถ้ำลอยไปใช้ในการดูดซับ ต้องทำการไล่ความชื้นออกจากตัวอย่างก่อน เพราะความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่ตรงรูพรุนของถ้ำลอยนี้ จะทำให้ถ้ำลอยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอื่นๆ เข้ามาในรูพรุนได้น้อยลง



ภาพที่ 1 กราฟการสลายตัวทางความร้อนของถ้ำลอยถ่านหิน

ภาพที่ 2 แสดงไอโซเทอมการดูดซับแก๊สในโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ -196°C ของถ้ำลอยถ่านหินพบว่า ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับที่ได้เป็นไอโซเทอมการดูดซับชนิดที่ 4 เมื่อแบ่งตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ซึ่งแสดงลักษณะการดูดซับของตัวดูดซับที่ประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดกลาง หรือ ตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุน 2

- 50 nm (Do, 1998) และจากไอโซเทอมการดูดซับที่ได้นี้ เมื่อนำไปคำนวณหาสมบัติรูพรุนของถ้ำลอยถ่านหินได้ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ไอโซเทอมการดูดซับแก๊สในโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ -196°C ของถ้ำลอยถ่านหิน

ตารางที่ 1 สมบัติรูพรุนของถ้ำลอยถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับถ้ำลอยจากงานวิจัยอื่นๆ

ตัวอย่าง	$S_{BET}$ ( $m^2/g$ )	$V_{mic}$ ( $cm^3/g$ )	$V_{meso+macro}$ ( $cm^3/g$ )	$V_T$ ( $cm^3/g$ )	$D_p$ (nm)
ถ้ำลอยถ่านหิน (งานวิจัยนี้)	9.45	0.0036 (6.22%)	0.0543 (93.78%)	0.0579	24.53
ถ้ำลอยขานอ้อย (Noonpui et al., 2010)	31.89	0.0113 (31.56%)	0.0245 (68.44%)	0.0358	4.486
ถ้ำลอยขี้เลื่อยไม้ (Noonpui et al., 2010)	15.77	0.0056 (40.58%)	0.0082 (59.42%)	0.0138	3.242

จากตารางที่ 1 พบว่า ถ้ำลอยถ่านหินที่ใช้เป็นตัวดูดซับในงานวิจัยนี้ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 9.45  $m^2/g$  ปริมาตรรูพรุนรวม 0.0579  $cm^3/g$  โดยเป็นปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ถึง 93.78% และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 24.53 nm ซึ่งเป็นรูพรุนขนาดกลาง (ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง จะมีขนาดรูพรุน 2 – 50 nm)

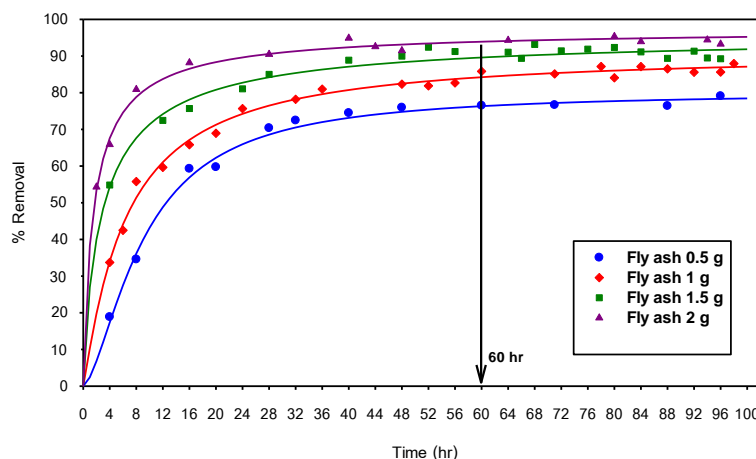
ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสมบัติของเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับเถ้าลอยจากงานวิจัยของ Noonpui et al. (2010) ที่ใช้เถ้าลอยเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมหมักพิมพ์ พบว่า เถ้าลอยถ่านหินมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่มากกว่าเถ้าลอยจากขานอ้อย และเถ้าลอยจากขี้เลื่อยไม้ ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า ซึ่งการที่ตัวดูดซับมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่ และมีปริมาตรรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่จำนวนมากนี้ จึงส่งผลให้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการกำจัดสีจากน้ำเสีย เพราะโมเลกุลของสีจะมีขนาดโมเลกุลค่อนข้างใหญ่

**ตอนที่ 2 การศึกษาการดูดซับสีและกลิ่นของน้ำทิ้งในกระบวนการดูดซับแบบกะ (batch)**

ผลการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และการศึกษาการใช้ตัวดูดซับซ้ำ ซึ่งในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับสีของน้ำทิ้งโดยใช้เถ้าลอยถ่านหิน ได้ทำการหาปริมาณของตัวดูดซับและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ โดยผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ที่เวลาในการดูดซับเท่ากัน การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับให้สูงขึ้นจาก 0.5 กรัม เป็น 1.5 และ 2 กรัม ตามลำดับ ทำให้เปอร์เซ็นต์การ

กำจัดสี (%removal) มีค่าสูงขึ้น โดยการดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ เข้าสู่สมดุล ที่เวลาประมาณ 60 ชั่วโมง โดยการดูดซับภายหลังจากเวลานี้ มีค่าคงที่ ซึ่งที่สมดุลนี้ มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี 76% 86% 90% และ 94% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงรูปภาพเปรียบเทียบระหว่างน้ำทิ้งเริ่มต้น (รูปด้านซ้ายมือ) และน้ำที่ผ่านการดูดซับด้วยเถ้าลอยถ่านหินปริมาณต่างๆ เป็นเวลา 60 ชั่วโมง หรือ ที่สภาวะสมดุล (รูปด้านขวามือ) พบว่า ภายหลังจากการดูดซับแล้ว สีของน้ำทิ้งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมองด้วยสายตา โดยเมื่อปริมาณเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้มีปริมาณสูงขึ้น สีของน้ำทิ้งก็จะลดลงมากขึ้น จนกระทั่งสีของน้ำทิ้งใส ที่การใช้เถ้าลอยถ่านหิน 1.5 และ 2 กรัม ซึ่งนอกจากเถ้าลอยถ่านหินจะสามารถลดสีของน้ำทิ้งได้แล้ว ยังสามารถลดกลิ่นของน้ำทิ้งได้อีกด้วย โดยน้ำทิ้งเริ่มต้นมีกลิ่นเหม็นฉุน แต่เมื่อน้ำทิ้งผ่านการดูดซับแล้ว น้ำทิ้งนั้นจะไม่มีกลิ่น อย่งไรก็ตาม น้ำทิ้งที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสี (%removal) ระหว่าง 20 – 30% จะมึกลิ่นเล็กน้อย







ภาพที่ 3 การกำจัดสีของน้ำทิ้งที่ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 – 2 กรัม เวลาในการดูดซับ 4 – 96 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง 50 มิลลิลิตร

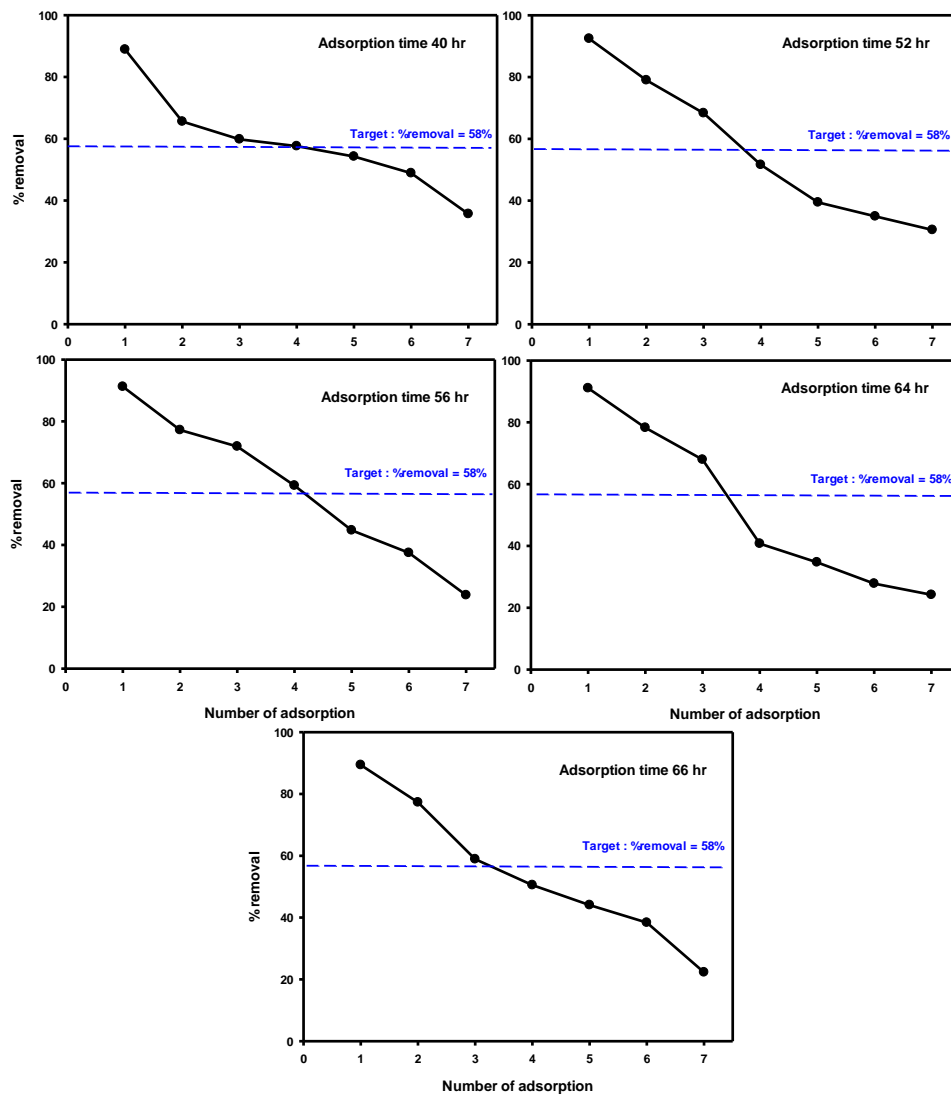
สำหรับการศึกษาการใช้ตัวดูดซับซ้ำ ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างปริมาณแฉะลอยถ่านหิน 1.5 กรัม ที่เวลาการดูดซับทั้งก่อนและหลังสมดุล ได้แก่ 40 52 56 64 และ 66 ชั่วโมง โดยทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 7 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดดี (%removal) มีค่าลดลง เมื่อใช้ตัวอย่างเดิมทำการทดลองดูดซับซ้ำ โดยที่ตัวอย่างสามารถดูดซับซ้ำได้ 2 ครั้ง ก่อนที่การดูดซับซ้ำในครั้งที่ 3 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดดีต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานต้องการ นั่นคือ 58%

**ตอนที่ 3 การศึกษาการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ**

การทดลองในตอนนี้นี้ ใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.5 3 4.5 6 7.5 9 และ 10.5 กรัม โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง 50 100 150 200 250 300 และ 350 มิลลิลิตร ตามลำดับ นั่นคือ เพิ่มปริมาณตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ 2 3 4 5 6 และ 7 เท่า ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการดูดซับ 16 และ 48 ชั่วโมง นอกจากนั้น ยังทำการทดลองใช้ตัวดูดซับซ้ำอีก 3 ครั้ง โดยผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5 พบว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจนถึง 7 เท่า มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดดี (%removal) เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำ ทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดดีลดลง โดยลดลงต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานต้องการ (58%) ตั้งแต่การใช้งานซ้ำครั้งที่ 2

**ตารางที่ 2** รูปเปรียบเทียบระหว่างน้ำทิ้งเริ่มต้นและน้ำที่ผ่านการดูดซับด้วยแฉะลอยถ่านหินปริมาณต่างๆ เป็นเวลา 60 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง 50 มิลลิลิตร และผลการทดลองกลั่นของน้ำตัวอย่าง

ปริมาณแฉะลอยถ่านหิน (g)	รูปเปรียบเทียบระหว่างน้ำทิ้งเริ่มต้นและน้ำที่ผ่านการดูดซับเป็นเวลา 60 ชั่วโมง	กลิ่น
น้ำทิ้งเริ่มต้น	–	มีกลิ่นเหม็นฉุน
0.5	 %removal = 76%	ไม่มีกลิ่น
1.0	 %removal = 86%	ไม่มีกลิ่น
1.5	 %removal = 90%	ไม่มีกลิ่น
2.0	 %removal = 94%	ไม่มีกลิ่น

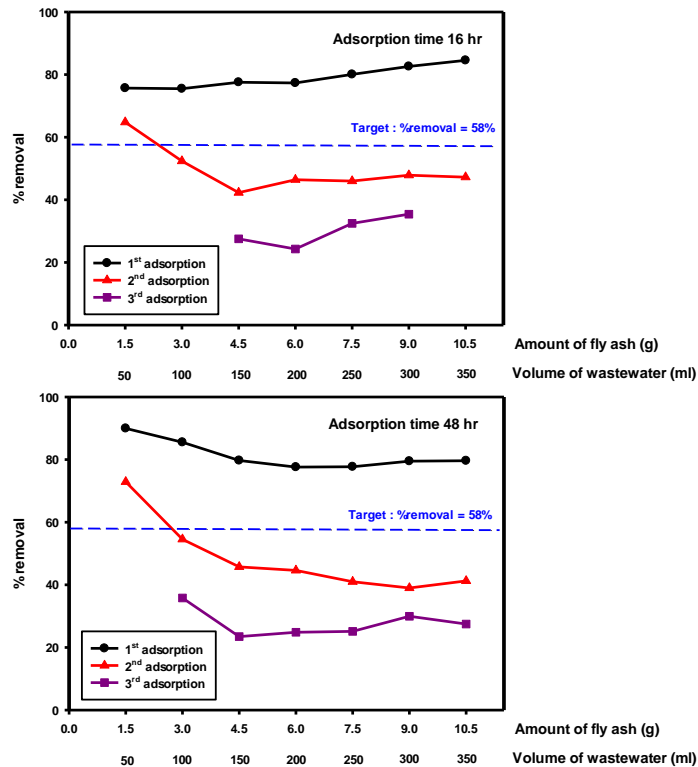


ภาพที่ 4 การศึกษาการใช้ตัวดูดซับซ้ำ เมื่อใช้ปริมาณถ้ำลอยถ้ำนหิน 1.5 กรัม เวลาในการดูดซับ 40 52 56 64 และ 66 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง 50 มิลลิลิตร

**สรุปผลการวิจัย**

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษซึ่งผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้ว แต่ยังมีสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นเหม็นฉุน สามารถใช้ถ้ำลอยถ้ำนหินซึ่งเป็นกากของเสียของทางโรงงานนี้ ในการกำจัดสีและกลิ่น โดยการกำจัดสีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณถ้ำลอยมากขึ้น ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีสูงสุดมีค่าเท่ากับ 76 86 90 และ 94% เมื่อใช้ถ้ำลอยถ้ำนหินในปริมาณ 0.5 1 1.5 และ 2 กรัม ตามลำดับ โดยใช้ปริมาตรน้ำทิ้ง 50

มิลลิลิตร เวลาในการดูดซับ 60 ชั่วโมง เมื่อนำตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแล้วมาใช้ซ้ำ พบว่า สามารถใช้ตัวดูดซับซ้ำได้ 2 ครั้ง หลังจากนั้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีจะต่ำกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ นั่นคือ 58% และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและน้ำทิ้งตั้งแต่ 2 ถึง 7 เท่า พบว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและน้ำทิ้งมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเพียงเล็กน้อย โดย เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีที่ได้มีค่ามากกว่าค่าเป้าหมายที่ทางโรงงานตั้งไว้



ภาพที่ 5 การศึกษาการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ตั้งแต่ 2 – 7 เท่า ที่เวลาในการดูดซับ 16 และ 48 ชั่วโมง โดยใช้ตัวดูดซับซ้ำ 3 ครั้ง

**ข้อเสนอแนะ**

งานวิจัยต่อไป ควรทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพตัวดูดซับโดยใช้กรดหรือเบส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนให้กับถ่านลอยถ่านหิน ซึ่งเมื่อถ่านลอยมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น นั่นคือลดปริมาณการใช้ตัวดูดซับ หรือ ลดเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

**กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บมจ. ฟีนิกซ์ พัลพ แอนด์ เพเพอร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

พูนศิริ หอมจันทร์. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกสบู่ดำโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. รายงานการศึกษาดุษฎีปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2550

**วิทยุณีพิท มุ่งการดี ฉลาด บรรเทา และชูสิทธิ์ ศรีสุทธี**

กมล. การบำบัดสีน้ำเสียโรงงานกระดาษด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2551

ยุวรัตน์ และคณะ. การกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, 15, 37-46. 2557

วารกรณ์ อภิวัฒน์ภิวัด ต่อพงศ์ กฤษาชาติ และพิลาณี ไวดอนมสตัย. การลดสีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยโอโซนออกซิเดชัน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. 2550





Noonpui et al. Color removal from water-based ink wastewater by bagasse fly ash, sawdust fly ash and activated carbon. Chemical Engineering Journal, 162, 503-508. 2010.

Do DD. Adsorption analysis: equilibrium and kinetics. Uto – Print, Singapore. 1998.

Yao et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Review, 141, 105-121. 2015.