



## การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ

### Dyes treatment in wastewater using adsorption processes

รวินิภา ศรีมูล

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี อำเภอเขาฉกรรจ์ จันทบุรี 22210

E-mail: rawinipa.srimoon@gmail.com

#### บทคัดย่อ

สีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียมักมีที่มาจากหลายแหล่ง ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยาก เป็นสารก่อมะเร็ง ปิดกั้นแสงที่ลงสู่แหล่งน้ำและทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง รวมทั้งทำให้เสียทัศนียภาพ น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจึงควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ดี บทความนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการดูดซับ เนื้อหาครอบคลุมชนิดของสีย้อม การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ การดูดซับด้วยคอลัมน์ และไอโซเทอมของการดูดซับ

#### ABSTRACT

Dyes contaminated in wastewater come from many sources. These dyes are difficult to decompose and also carcinogenic. Contamination of dyes in water reduces primary production due to decrease in light penetration. Moreover, it is not desirable and causes scenery impact. Therefore, it is very important to treat the wastewater before disposal. Adsorption has been preferred because of its effectiveness. This review describes the treatment of dyes in wastewater using adsorption processes on various types of dyes, the use of activated carbon and agricultural and industrial solid wastes as adsorbent to remove dyes, adsorption factors, column adsorption and adsorption isotherms.

**คำสำคัญ:** สีย้อม กระบวนการดูดซับ ถ่านกัมมันต์ น้ำเสีย

**Keywords:** Dyes, Adsorption processes, Activated carbon, Wastewater

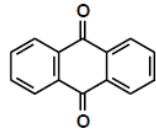
## 1. บทนำ

ในปัจจุบัน สีย้อม (dyes) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ฟอกหนัง ผลิตกระดาษ ผลิตเครื่องสำอาง อาหาร และการพิมพ์ (Mittal et al., 2010) สีย้อมที่ปนเปื้อนมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากเป็นสารเคมีสังเคราะห์ทำให้เกิดการระคายเคือง เป็นสารก่อมะเร็งหรือทำให้เกิดการกลายพันธุ์ได้ เนื่องจากในโครงสร้างของสีย้อมส่วนใหญ่มีวงแหวนแอโรมาติกอยู่ในโมเลกุล นอกจากนี้ สีย้อมยังปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องลงไปใต้น้ำ ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และทำให้เสียทัศนียภาพ (Weisburger, 2002; Yanan et al., 2011) สีย้อมส่วนใหญ่ละลายน้ำได้ดี แต่ย่อยสลายยากเนื่องจากทนทานต่อแสงและความเป็นกรดต่าง ทำให้ยากต่อการบำบัด (Han et al., 2008) ปัจจุบันการบำบัดสีย้อมมีเทคนิคที่หลากหลาย เช่น การใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมย่อยสลายโมเลกุลสี หรือการใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูง (ultrasonic) สลายโมเลกุล แต่วิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการบำบัดสีย้อมในน้ำ นั่นคือ การดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เนื่องจากสามารถดูดซับสีย้อมได้ดี ตัวดูดซับสามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง ทำได้ง่ายและใช้เงินลงทุนต่ำ ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมใช้กันมาก คือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) แต่ก็มีตัวดูดซับอื่นๆ ที่ใช้งานได้ดีไม่ต่างจากถ่านกัมมันต์ เช่น เพอร์ไลต์ (perlite) เบนโตไนท์ (bentonite) ซิลิกา (silica) ซีโอไลต์ (zeolite) และแร่ดินเหนียว (clay minerals) เป็นต้น (Krysztafkiwicz

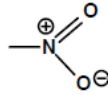
et al., 2002; Woolard et al., 2002; Wang et al., 2004) บทความนี้จึงนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการดูดซับ ประเภทของสีย้อม การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ การดูดซับด้วยคอลัมน์ และไอโซเทอมของการดูดซับ เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย

## 2. องค์ประกอบและประเภทของสีย้อม

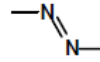
โครงสร้างของสีย้อมมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ โครโมฟอร์ (chromophore) และออกโซโครม (auxochrome) โครโมฟอร์ คือ หมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400–700 นาโนเมตร เช่น หมูไนโตรโซ (nitroso group) หมูไนโตร (nitro group) และหมู่อะโซ (azo group) เป็นต้น สีย้อมจะต้องมีหมู่โครโมฟอร์อย่างน้อย 1 หมู่ภายในโมเลกุล (รูปที่ 1a) นอกจากนี้ ในโครงสร้างโมเลกุลจะต้องมีลักษณะพันธะคู่แบบคอนจูเกต (conjugated) เช่น วงแหวนแอโรมาติก และเกิดเรโซแนนซ์ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลได้ (Abrahart, 1977) ส่วนออกโซโครมเป็นหมู่ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อมที่มีผลต่อการเกิดสี ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสง และความสามารถในการละลายของสีย้อม ตัวอย่างเช่น หมูคาร์บอกซิล (carboxyl group) หมูไฮดรอกซิล (hydroxyl group) และหมู่อะมิโน (amino group) เป็นต้น (รูปที่ 1b)



anthraquinone

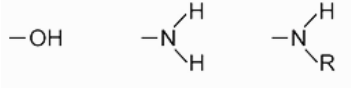


nitro



azo

(1a) หมู่โครโมฟอร์



hydroxyl

amino

(1b) หมู่ออกโซโครม

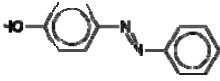
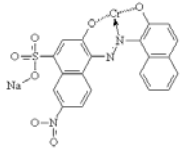
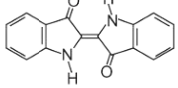
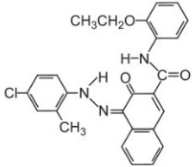
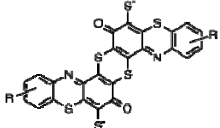
**รูปที่ 1** ตัวอย่างหมู่ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในโมเลกุลของสีย้อม (ดัดแปลงจาก Abrahart, 1977)

สีย้อมที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมสิ่งทอแบ่งตามโครงสร้างและลักษณะของการนำไปใช้งาน ได้เป็น 9 ประเภท ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ประเภทของสีย้อมแบ่งตามโครงสร้างและลักษณะของการนำไปใช้งาน

ชนิดของสีย้อม	ลักษณะโครงสร้าง	การนำไปใช้	ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อม
สีเบสิก (basic dye)	เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (-NR <sub>3</sub> <sup>+</sup> หรือ =NR <sub>2</sub> <sup>+</sup> ) อาจมีหมู่เอมิไซยานิน แอนทราควิโนน หรือ ไตรอาร์ลิมีเทน ละลายน้ำได้ มีประจุบวก	นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และเส้นใยอะคริลิก	<p>Basic yellow</p>
สีแอซิด (acid dye)	เป็นเกลือโซเดียมของกรดกำมะถัน อาจมีหมู่แอนทราควิโนน แซนทีน อะโซ หรือ ไนโตร ละลายน้ำได้ มีประจุลบ	ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเซลลูโลส	<p>Acid blue 45</p>
สีไดเรกต์ (direct dye)	ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ พทาโลไซยานิน หรือ ออกซาซิน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิก ละลายน้ำให้ประจุลบ เกาะติดเส้นใยได้ดี	นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส	<p>Direct orange 25</p>
สีรีแอคทีฟ (reactive dye)	ละลายน้ำให้ประจุลบ โมเลกุลของสีจะจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่เป็นต่าง โครงสร้างของสีรีแอคทีฟจะมีหมู่อะมิโน (reactive group) เช่น หมู่ คลอริเนตเตดไทรอะซีน และหมู่วินิลซัลโฟน	เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลส	<p>Reactive blue 109</p>

**ตารางที่ 1** ประเภทของสีย้อมแบ่งตามโครงสร้างและลักษณะของการนำไปใช้งาน (ต่อ)

ชนิดของสีย้อม	ลักษณะโครงสร้าง	การนำไปใช้	ตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อม
สีอะโซ (azo dye)	มีหมู่อะโซ โครงสร้างทั่วไป คือ R-N=N-R' ไม่ละลายน้ำ ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลก่อนแล้วจึงย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์	ใช้ย้อมเส้นใย ได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน และ แอซีเตต	 Yellow azo dye
สีมอร์ดนต์ (mordant dye)	เป็นสีย้อมที่ต้องใช้สารประกอบออกไซด์ของโลหะช่วยยึดติดบนเส้นใย เช่น โครเมียม ดิบุก เหล็ก ทำให้มีโมเลกุลใหญ่ ละลายน้ำได้	ใช้ย้อมเส้นใย โปรตีนและ โพลีเอไมด์	 Mordant Black 1 (with chromium (III) ion)
สีวัต (vat dye)	ไม่ละลายน้ำ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีนินดิก และสีแอนทราควินอยด์ ละลายน้ำโดยทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ถูกรีดิวซ์กลายเป็นเกลือ ซึมเข้าไปในเส้นใย เมื่อสัมผัสกับอากาศจะถูกออกซิไดส์เป็นสีวัต	ย้อมเส้นใยได้ ทุกชนิดทั้งเส้น ใยธรรมชาติ และเส้นใย สังเคราะห์	 Indigo pigment blue 66
สีดีสเพอร์ส (disperse dye)	ไม่ละลายน้ำ อนุภาคของสีอยู่ที่ประมาณ 1-3 ไมโครเมตร แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สีย้อมอะโซ และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน ซึ่งทั้งสองกลุ่มประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH)	ใช้ย้อมเส้นใย แอซีเตต โพลี เอสเตอร์ ไนลอน และ อะคริลิก	 Disperse red 220
สีซัลเฟอร์ (sulfur dye)	ไม่ละลายน้ำ ได้จากการนำสารอินทรีย์ที่มีหมู่ไนโตรและหมู่อะมิโนมาทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์หรือโซเดียมซัลไฟด์ที่อุณหภูมิสูง ต้องรีดิวซ์ให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้	นิยมนำมาย้อม ฝ้าย	 Sulfur black 1

(ที่มา : Demirbas, 2009; Salleh et al., 2011; Yagub et al., 2014)

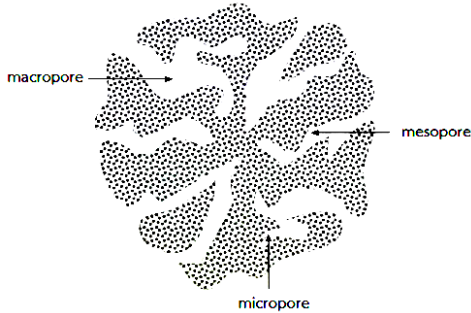
### 3. วัสดุดูดซับสีย้อม

#### 3.1 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ ถ่านที่ได้จากการนำไม้หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงและมีปริมาณเถ้าต่ำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) โดยการเผาภายใต้ความดันและอุณหภูมิระหว่าง 200–1,600 องศาเซลเซียส ควบคุมปริมาณแก๊สออกซิเจนและ

คาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อให้ได้ถ่านที่มีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวอาจสูงถึง 3,000 ตารางเมตรต่อกรัม (Marsh et al., 1997) สามารถจำแนกชนิดของถ่านกัมมันต์ได้เป็น 3 กลุ่ม ตามขนาดของรูพรุน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (micropore) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร (mesopore) และถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า

50 นาโนเมตร (macropores) (Lemley et al., 1995; Dias et al., 2007) ดังรูปที่ 2



**รูปที่ 2** ลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์  
(ดัดแปลงจาก Lemley et al., 1995)

ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์ ขึ้นกับปริมาณและขนาดรูพรุน ยิ่งมีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวก็จะมาก ทำให้ดูดซับสารต่างๆ ได้ดี จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์มีค่าสูงถึง 400–980.3 มิลลิกรัมต่อกรัม (Rafatullah et al., 2010) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาด micropore และ mesopore มีพื้นที่ผิวมากเหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสารต่างๆ แต่ว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ขนาด micropore เล็กเกินไป ที่จะดูดซับสีย้อม ซึ่งส่วนมากมีโมเลกุลขนาดใหญ่จึงไม่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนขนาด micropore ได้ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ขนาด macropore มีรูพรุนขนาดใหญ่พอที่จะแพร่เข้าได้ แต่ก็ยังมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อยเกินไป จากการศึกษา พบว่า ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ ขนาด mesopore ยิ่งรูพรุนขนาด mesopore มีจำนวนมากเท่าใด จะทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้นเท่านั้นและใช้เวลาเข้าสู่สมดุลลดลง (De Souza-Macedo et al., 2006; Lorenc-Grabowska and Gryglewicz, 2007)

นอกจากประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จะสูงมากแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องกำจัดความชื้นออกก่อน อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของถ่านกัมมันต์ คือ มีราคาแพง และการคืนสภาพถ่านกัมมันต์ (regeneration) ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำลง (Srivastava et al., 2007) ด้วยเหตุผลที่กล่าวมา ทำให้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่สามารถดูดซับสีย้อมได้ดี นั่นคือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและหาได้ง่าย เพื่อทดแทนการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย

### 3.2 การดูดซับด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

การดูดซับสีย้อมโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมมีข้อดีหลายประการ นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนการบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งได้เป็นอย่างดี วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับมีหลายชนิด (ตารางที่ 2) ตัวอย่างเช่น ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว ทะลายปาล์ม ชี้อ้อย ชานอ้อย ไม้ยางพารา ถ่านไม้เงาะ เป็นต้น (กิติโรจน์ และคณะ, 2550; ปรีชญา, 2551; รวีนิภา และวิทยา, 2557; Valix et al., 2004; Ponnusami et al., 2007; Tan et al., 2007; Singh et al., 2008; Ahmad and Hameed, 2009; Zhuannian et al., 2009) ส่วนวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม เช่น กากโบรอน และเถ้าลอย เป็นต้น (Rao and Rao, 2006; Olgun and Atar, 2009) อย่างไรก็ตาม ธรรมชาติของตัวดูดซับเหล่านี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ ดังนั้น อาจต้องนำไปปรับสภาพหรือกระตุ้นด้วยวิธีการต่างๆ ก่อน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เช่น นำไปกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) โดยการทำให้เกิดกระบวนการ

คาร์บอนในเซชันแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 800–900 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ได้รูพรุนมากขึ้นและกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป อีกวิธีหนึ่ง คือ การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) โดยการใช้สารเคมีเข้าไปสลายสารปนเปื้อนในรูพรุน จากนั้นนำไปเผาในถังที่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 400–1,000 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้กระตุ้น เช่น ซิงค์ (II) คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียม

ไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น (Ichcho et al., 2005; Mohanty et al., 2005; Rahman et al., 2005; Zhuannian et al., 2009; Wu et al., 2010) การกระตุ้นด้วยสารเคมีสามารถลดขนาดรูพรุน เพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) และเพิ่มปริมาตรรูพรุน (pore volume) ได้ดีมาก ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้เหล่านี้สูงขึ้น แต่ก็มีข้อเสีย คือ จะมีสารเคมีตกค้างจากขั้นตอนของการล้าง สารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์

**ตารางที่ 2** ตัวดูดซับสีย้อมที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทดแทนถ่านกัมมันต์

วัสดุที่ใช้	สีย้อมที่ ถูกดูดซับ	วิธีการเตรียมวัสดุ/การปรับสภาพ	ผลการทดลอง	อ้างอิง
ถ่านหิน และ กะลามะพร้าว	สีเดเรคท์	ไม่มี	Adsorption capacity ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและ กะลามะพร้าว มีค่า = 222.22 และ 158.73 mg/g ตามลำดับ	กิติโรจน์ และคณะ (2550)
กากถั่วเหลือง	สีรีแอกทีฟ และสีเบสิก	ล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งที่ 90 °C, 2 ชั่วโมง ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 30–40 mesh ปรับสภาพด้วย 0.5 M NaOH, 1 ชั่วโมง ล้างด้วย น้ำกลั่น อบแห้งที่ 60 °C, 24 ชั่วโมง	กากถั่วเหลืองชนิดผงปรับสภาพแล้ว ดูดซับสีรีแอกทีฟ และสีเบสิก ได้ 100 และ 67.5% ตามลำดับ	ณัฐวรินทร์ และคณะ (2554)
ชานอ้อย	สีแอสิด	อบที่ 160 °C แล้วผ่านแก๊ส $CO_2$ ที่ 600 °C	เมื่อผ่านกระบวนการต่างๆแล้วมี พื้นที่ผิวสูง 614–1433 $m^2 g^{-1}$	Valix et al. (2004)
ขี้เลื่อย	คองโกเรด	ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้ง แล้วนำไปแช่ใน $H_2O_2$ 1:100, 24 ชั่วโมง อบแห้งที่ 110 °C, 1 ชั่วโมง บดแล้วร้อนผ่านตะแกรง	การดูดซับเกิดได้ดีเมื่อขนาดอนุภาค ไม่เกินกว่า 106 BSS mesh ลด COD ได้ 73.5 mg/L	Jain and Sikarwar (2008)
ไม้ไผ่	สีย้อมในน้ำ เสียจาก โรงงานสิ่ง ทอ	ล้าง อบแห้ง และร้อนผ่านตะแกรงขนาด 200–300 $\mu m$ กระตุ้นด้วย 85% $H_3PO_4$ นำไปเผาที่ 500 °C, 2 ชั่วโมง แล้วผ่านแก๊ส $N_2$	ถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถกำจัดสีย้อมได้ 91.84% และลดค่า COD ได้ 75.21%	Ahmad and Hameed (2009)
กากโบรอน	สีเบสิก	ไม่มี	กากโบรอนมีองค์ประกอบหลักเป็น ulexite มีค่า adsorption capacity สูง	Olgun and Atar (2009)

**ตารางที่ 2** ตัวดูดซับสีย้อมที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมทดแทนถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

วัสดุที่ใช้	สีย้อมที่ ถูกดูดซับ	วิธีการเตรียมวัสดุ/การปรับสภาพ	ผลการทดลอง	อ้างอิง
เปลือกเมล็ด มะม่วงหิม พานต์	คองโกเรด	ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้ง บดแล้วร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 200 – 300 mesh	ดูดซับได้ดีที่ pH = 3 ร้อยละของการ ดูดซับเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสีย้อม	Kumar et al. (2010)
ถั่วลลียง	สีรีแอคทีฟ และสีแอซิด	ทำให้แห้งที่ 378 °C, 24 ชั่วโมง ร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 160 μm แล้วเผาที่ อุณหภูมิ 350 °C, 30 นาที	การดูดซับเกิดได้ดีที่ pH ต่ำ สีแอซิดมี ค่า adsorption capacity สูงกว่า สีรีแอคทีฟ	Sun et al. (2010)

#### 4. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย  
ด้วยวัสดุดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

##### 4.1 สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับ  
ขึ้นอยู่กับประจุบนผิวของตัวดูดซับและประจุของสีย้อม  
เมื่อละลายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดูดซับทางเคมี สีย้อมที่มีประจุลบในโมเลกุลจะถูกดูดซับได้ดีที่ pH ต่ำ  
เพราะผิวของตัวดูดซับจะมีไอออนบวกจากไฮโดรเจน  
ไอออน ( $H^+$ ) ปริมาณมากมาเกาะที่ผิว ซึ่งสภาพประจุ  
บนผิวของตัวดูดซับขึ้นกับความเป็นกรดต่างของ  
สารละลายในขณะนั้น (Moreno-Castilla, 2004;  
Attia et al., 2006; Kumar et al., 2010; Sun et  
al., 2010) ที่ pH ต่างกันจะมีปริมาณประจุบวกและ  
ประจุลบในสารละลายแตกต่างกันด้วย โดยพิจารณา  
จาก  $pH_{zpc}$  (point of zero charge) หรือ pH ที่ทำให้  
ประจุบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า pH ของ  
สารละลายต่ำกว่า  $pH_{zpc}$  ประจุรวมบนตัวดูดซับจะเป็น  
บวกเนื่องจากไฮโดรเจนไอออน ที่สภาวะนี้ตัวดูดซับจะ  
สามารถดูดซับสีย้อมที่เป็นประจุลบได้ดี แต่ถ้า pH สูง  
กว่า  $pH_{zpc}$  ประจุรวมบนผิวตัวดูดซับจะเป็นลบ  
เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ทำให้สามารถดูด  
ซับสีย้อมที่เป็นประจุบวกได้ดีกว่า ตัวอย่างเช่น คองโก  
เรด เมื่อละลายน้ำได้ประจุลบ มี  $pH_{zpc}$  เท่ากับ 10.0

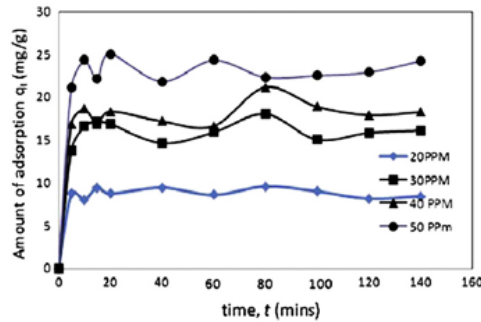
จะถูกดูดซับได้ดีที่ pH 7.8–8.3 ในทางตรงกันข้าม  
สีเบสิก เมื่อละลายน้ำได้ประจุบวก การดูดซับจะเกิดขึ้น  
ได้ดีที่ pH สูงกว่า  $pH_{zpc}$  (Lorenc-Grabowska and  
Gryglewicz, 2007) ดังนั้น การปรับสภาพ pH ของ  
สารละลายให้เหมาะสมกับโครงสร้างของสีย้อมจึงเป็น  
การช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย

##### 4.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้  
การดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเท  
มวล ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นสารบน  
ตัวดูดซับกับสารละลาย (concentration gradient)  
(Yanan et al., 2011) กระบวนการถ่ายเทมวลระหว่าง  
สารละลายกับตัวดูดซับมี 3 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการ  
แพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ (film diffusion) ซึ่ง  
เกิดได้เร็ว เป็นสาเหตุที่ทำให้ร้อยละของการดูดซับ  
ในช่วงต้นของเกือบทุกการดูดซับมีค่าสูง แต่เมื่อเวลา  
ผ่านไป เกิดการถ่ายเทมวลขั้นที่สองซึ่งเป็นการแพร่ของ  
โมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (particle diffusion) และขั้นที่สาม  
ซึ่งเป็นการดูดซับโมเลกุลสารบนผิวภายในรูพรุน  
(adsorption) สองขั้นตอนหลังเกิดได้ช้ากว่า (Mittal  
et al., 2008; Fu et al., 2012) ทำให้ร้อยละของการ  
ดูดซับในช่วงหลังเริ่มลดลงจนคงที่ (รูปที่ 3) อย่างไรก็ตาม  
แม้จะมีกระบวนการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน  
แต่ขนาดของรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดชนิดของสารที่จะ

แพร่เข้าสู่รูพรุนได้ นั่นคือ สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ารูพรุนก็จะไม่สามารถแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ แม้ว่าตัวดูดซับจะมีรูพรุนมากก็ตาม นอกจากนี้ ความแรงไอออน

ของอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายซึ่งมีผลลดแรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับผิวของตัวดูดซับ จะทำให้การดูดซับลดลง (Lorenz-Grabowska and Gryglewicz, 2007)

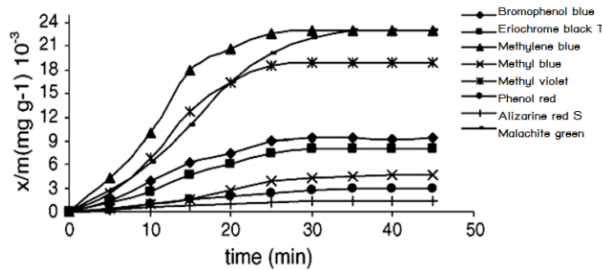


รูปที่ 3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (ที่มา: Chowdhury and Saha , 2010)

### 4.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกการดูดซับเกิดเร็วมาก เนื่องจาก concentration gradient ในสารละลาย และที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับยังคงมีมากทำให้ดูดซับสีย้อมได้มาก หลังจากนั้นการดูดซับจะลดลงจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เพราะที่ว่างเหล่านั้นดูดซับสีย้อมไว้เต็มที

แล้ว การศึกษาการดูดซับสีย้อมหลายประเภท ได้แก่ โบโรโมฟีนอลบลู อะลิซารินเรดเอส เมทิลบลู เมทิลีนบลู เอริโอโครมแบลคที มาลาไคท์กรีน ฟีนอลเรด และ เมทิลไวโอเลต โดยใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่า การดูดซับเกิดได้ดีมากช่วง 30 นาทีแรก (รูปที่ 4) และแม้จะให้ดูดซับต่อเนื่องไปจนถึง 60 นาที แต่การดูดซับก็เพิ่มขึ้นน้อยมาก (Iqbal and Ashiq, 2007)



รูปที่ 4 ผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (ที่มา: Iqbal and Ashiq, 2007)

### 4.4 ปริมาณของตัวดูดซับ

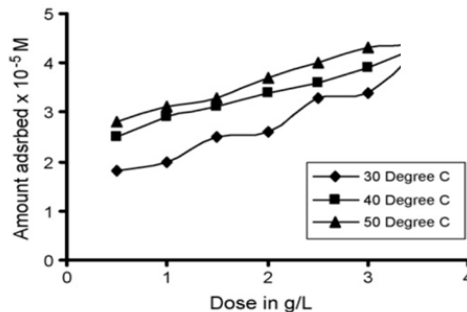
เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัว

ดูดซับกับสารละลาย จากการศึกษาของ Jain and Sikarwar (2008) ซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เลื่อยดูดซับคองโกเรด พบว่า เมื่อใช้ปริมาณถ่านต่อ



สารละลาย 0.5–3.5 กรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับเพิ่มจาก 30.0 เป็น 70.1 แต่อัตราการดูดซับจะเริ่มคงที่ที่อัตราส่วน 2.5 กรัมต่อลิตร (รูปที่ 5) ถ้าตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าอนุภาคใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่า นอกจากนี้ การดูดซับจะลดลงเมื่อมีสีย้อมตัวอื่นปนอยู่ในสารละลาย

เนื่องจากการแข่งขันกันดูดซับบริเวณที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับและสีย้อมบางประเภทก็เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันเอง เช่น การดูดซับเรมาซอลรีแอกทีฟแบล็ค จะลดลงร้อยละ 42 ถ้าในสารละลายมีเรมาซอลรีแอกทีฟเอลโลว์ปนอยู่ (Al-Degs et al., 2007)



รูปที่ 5 ผลของปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิต่อการดูดซับของโคเรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เถ้า (ที่มา: Jain and Sikarwar, 2008)

#### 4.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการดูดซับ ในกระบวนการดูดความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับเกิดได้ดีขึ้น แต่ในกระบวนการคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากการละลายของสีย้อมเกิดขึ้นได้ดี ทำให้แรงดึงดูดระหว่างสีย้อมกับตัวดูดซับลดลง จะเห็นได้ชัดจากรูปที่ 5 ซึ่งแสดงผลอุณหภูมิต่อการดูดซับของโคเรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากขี้เถ้า การดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 50 องศาเซลเซียส ปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นส่วนหนึ่งของการทำให้เกิดกระบวนการคายดูดซับ (desorption) โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (reversible process)

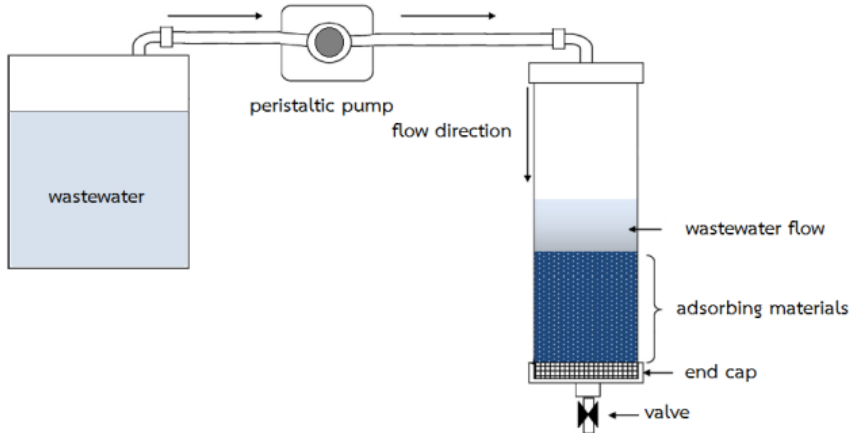
### 5. การดูดซับด้วยคอลัมน์

การดูดซับสีย้อมด้วยคอลัมน์ซึ่งตัวดูดซับอยู่กับที่ (fixed-bed adsorption column) เป็นการ

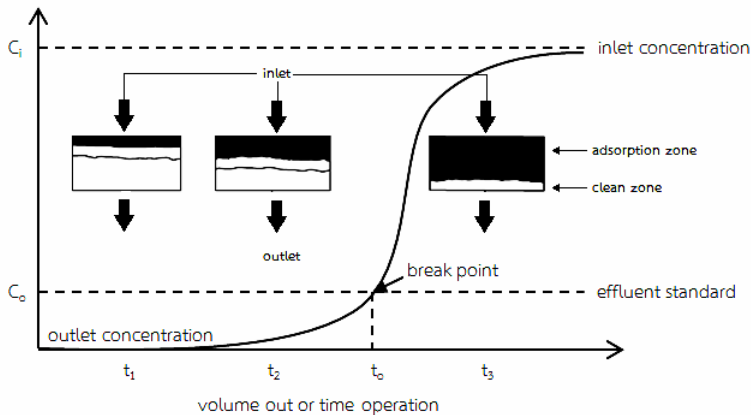
บรรจุตัวดูดซับไว้ในคอลัมน์และให้น้ำเสียไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง (continuous adsorption) ดังรูปที่ 6 การดูดซับแบบนี้เหมาะสำหรับนำไปใช้บำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีการปล่อยน้ำเสียปริมาณมากออกมาตลอดเวลา หากใช้วิธีบำบัดด้วยการเติมตัวดูดซับลงไปนั้นจะต้องใช้ตัวดูดซับปริมาณมาก ซึ่งเป็นการสิ้นเปลือง ไม่สะดวก ทั้งยังใช้ได้เพียงครั้งเดียวก็ต้องนำตัวดูดซับกลับไปผ่านกระบวนการคายดูดซับใหม่หรือหากไม่สามารถคายดูดซับได้ก็จะเหลือกากของเสียปริมาณมาก แตกต่างจากการใช้คอลัมน์ดูดซับที่สามารถบำบัดน้ำเสียแบบไหลวนได้หลายครั้ง จนกว่าปริมาณสีย้อมจะอยู่ในระดับที่น่าพอใจ หรือจนกว่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะหมดไป ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้ดียิ่งขึ้น สามารถบำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้ในเวลาที่น้อยลง ช่วยลดกากของเสียและต้นทุนของการบำบัดได้เป็นอย่างดี

เมื่อให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป เรียกว่า เวลาเบรคทูร์ (breakthrough time) หาได้จากกราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) ดังรูปที่ 7 บริเวณที่มีการถ่ายเทมวล

สาร (mass transfer zone) คือ บริเวณของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นของสารมีการเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปมาก ตั้งแต่ส่วนเริ่มต้นของคอลัมน์ไปยังส่วนท้ายของคอลัมน์ เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวการดูดซับจะเริ่มลดลงจนคงที่ในที่สุด



รูปที่ 6 การดูดซับด้วยคอลัมน์ (ดัดแปลงจาก Lim and Aris, 2014)



รูปที่ 7 กราฟเบรคทูร์และการเปลี่ยนแปลงของชั้นความเข้มข้นของสารในคอลัมน์ดูดซับ (ดัดแปลงจาก จักรกฤษณ์, 2557)

การดูดซับแบบคอลัมน์มีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ชนิดของตัวดูดซับที่เหมาะสม อัตราเร็วการไหลของน้ำเสีย และ ความหนาของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดสีเบสิค 3 ชนิด ได้แก่ เมทิลีนบลู เบสิคเรด และเบสิคเยลโลว์ โดย

ใช้ถ่านกัมมันต์บรรจุลงในคอลัมน์เส้นผ่าศูนย์กลาง 2-4 มิลลิเมตร พบว่า เมื่อลดอัตราการไหลของน้ำเสียให้ช้าลง เพิ่มความสูงของถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับและใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ ทำให้เวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าน้ำเสียจะสัมผัสกับ

ถ่านกัมมันต์ได้นานขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม จึงสูงขึ้นตามไปด้วย (El Qada et al., 2013) การให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์เร็วเกินไปจะทำให้อายุการใช้งานของคอลัมน์ลดลง รวมทั้งทำให้ระยะที่ต้องใช้ในการถ่ายเทมวลของคอลัมน์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาในการสัมผัสระหว่างน้ำเสียและตัวดูดซับน้อยลง ส่งผลให้ต้องเพิ่มความยาวของคอลัมน์ และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมแม้จะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล แต่ที่ว่างบนผิวตัวดูดซับถูกจำกัดด้วยปริมาณตัวดูดซับ จึงไม่ทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด นอกจากนี้ การปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าสู่คอลัมน์ เช่น การปรับ pH ให้เหมาะสม หรือการเติมเกลือ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคอลัมน์ ซึ่งช่วยยืดระยะเวลาการใช้งานของคอลัมน์ได้อีกทางหนึ่ง (Han et al., 2008)

## 6. ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นสมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของกระบวนการดูดซับระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่ภาวะสมดุลกับปริมาณตัวดูดซับ สามารถอธิบายกลไกและประสิทธิภาพการดูดซับในเทอมของความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) สมการที่นิยมใช้คือ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) ซึ่งการดูดซับเป็นแบบพื้นผิวชั้นเดียวไม่มีการซ้อนทับกัน (monolayer adsorbed model) พื้นที่ว่างบนผิวของของตัวดูดซับจับกับโมเลกุลได้เพียง 1 โมเลกุล (Won et al., 2006) และอีกแบบหนึ่งคือ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ซึ่งอธิบายกระบวนการดูดซับแบบพื้นผิวหลายชั้น

(heterogeneous surface) เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น การดูดซับก็เพิ่มขึ้นแบบไม่จำกัด (Voudrias et al., 2002; Hameed and Daud, 2008) แสดงได้ดังสมการที่ 1 และ 2

$$\frac{Ce}{Cs} = \frac{1}{ab} + \frac{Ce}{a} \quad \dots(1)$$

$$\ln Cs = \ln Kf + \frac{1}{n} \ln ce \quad \dots(2)$$

เมื่อ Cs คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับที่ภาวะสมดุล, Ce คือ ปริมาณสารที่ภาวะสมดุล, a คือ ความสามารถในการดูดซับ, b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับของแลงเมียร์, Kf คือ ความสามารถในการดูดซับ และ 1/n คือ ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity) ตามสมการของฟรุนดลิช

การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจะเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับแบบใด พิจารณาจากค่าสหสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression correlation,  $r^2$ ) จากการศึกษาพบว่า สีย้อมแต่ละชนิดเมื่อถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ก็จะมีพฤติกรรมการดูดซับที่แตกต่างกันออกไปด้วย ตัวอย่างเช่น สีย้อมรีแอคทีฟที่ดูดซับด้วยถ่านหินบิบูมินัส เป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช แต่เมื่อใช้ถ่านลอยดูดซับ พฤติกรรมจะเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (เมตตา, 2547; Sun et al., 2010) ทำให้สรุปได้ว่า พฤติกรรมการดูดซับเป็นรูปแบบเฉพาะของสีย้อมและตัวดูดซับคู่ใดๆ ซึ่งได้จากการทดลองการดูดซับที่สภาวะเหมาะสมเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ไอโซโทมการดูดซับของการดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

สีย้อมที่ถูกดูดซับ	วัสดุที่ใช้	ไอโซโทมที่สอดคล้อง	อ้างอิง
ไดเร็กซ์เยลโลว์	ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและ กะลามะพร้าว	แลงเมียร์	กิติโรจน์ และคณะ (2550)
แอสซิดเรดและแอสซิดบลู	ถ่านไม้เงาะที่ปรับสภาพด้วยน้ำส้มควันไม้	พรุนดลิก	รวินภาและวิทยา (2557)
เมทิลีนบลู	โคโคซาน	พรุนดลิก	Chang and Juang (2004)
	ซีลี้อยไม้ซีตาร์	แลงเมียร์	Hamdaoui (2006)
	ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากใบสน (pine leaves)	แลงเมียร์และพรุนดลิก	Yagub et al. (2012)
คองโกเรด	โคโคซาน	แลงเมียร์	Wang and Wang (2007)
	ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากลูกสน (pine cone)	พรุนดลิก	Dawood and Sen (2012)
รีแอคทีฟเรด	ช่อดอกมะพร้าวและปอกระเจา	แลงเมียร์	Senthilkumar et al. (2006)
	ถั่วลันเตา	แลงเมียร์	Sun et al. (2010)

## 7. สรุป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เหมาะสม เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียไม่ว่าจะเป็นการใช้ถ่านกัมมันต์หรือการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ถ่านไม้ชนิดต่างๆ กะลามะพร้าว และ ซีลี้อย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีพฤติกรรมการดูดซับสีย้อมที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้อง เช่น สมบัติของตัวดูดซับ สมบัติของสารที่ถูกดูดซับ ความเป็นกรดต่าง ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ และอุณหภูมิ ถ้าเป็นการดูดซับแบบคอลัมน์ ต้องคำนึงถึงอัตราการไหล และระยะของชั้นดูดซับในคอลัมน์ด้วย ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพและพฤติกรรมการดูดซับทั้งสิ้น การเลือกใช้วัสดุดูดซับควรรู้ไปกับการศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ จะช่วยให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีและช่วยลดปริมาณสี

ย้อมที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 8. เอกสารอ้างอิง

- กิติโรจน์ วัฒนทาหา ขยาภาส ทับทอง และสินศุภา จุ้ยจุลเจิม. (2550). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 10(2): 104–112.
- จักรกฤษณ์ ศิวะเดชาเทพ. (2557). หน่วยที่ 6: อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ, แหล่งข้อมูล: <http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf>. ค้นเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2557.
- ณัฐวรินทร์ สิ้นแสงแก้ว อัจฉราพร ขำโสภา อนวัช สังข์เพชร และปริตตรา ประยูรยงค์. (2554). การกำจัดสีย้อมผ้าโดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัสดุดูดซับ. ใน: การประชุมวิชาการเสนองผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 23–24 ธันวาคม 2554, นครราชสีมา. 235–240.

- ปรัชญา ชัยสาร. (2551). การพัฒนาตัวดูดซับเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยในโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพารา, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 118 หน้า.
- เมตตา เพ็ญผลเจริญ. (2547). ความสามารถในการดูดซับสีย้อมผ้ายีนส์และคุณสมบัติปอซโซลานหลังดูดซับสีย้อมของถ่านกัมมันต์. Songkhla na Karin Journal of Science and Technology 26(1): 85-95.
- รวินภา ศรีมูล และวิทยา คมวาทษ์. (2557). ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของถ่านไม้เงาะที่ปรับสภาพด้วยน้ำส้มควันไม้. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 7(1): 31-37.
- Abrahart, E.N. (1977). Dyes and Their Intermediates. New York: Chemical Publishing. pp 1-12.
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2009). Reduction of COD and color of dyeing effluent from a cotton textile mill by adsorption onto bamboo-based activated carbon. Journal of Hazardous Materials 172: 1538-1543.
- Al-Degs, Khraisheh, M.A.M., Allen, S.J., Ahmad, M.N. and Walker, G.M. (2007). Competitive adsorption of reactive dyes from solution: equilibrium isotherm studies in single and multisolute systems. Chemical Engineering Journal 128: 163-167.
- Attia, A.A., Rashwan, W.E. and Khedr, S.A. (2006). Capacity of activated carbon in the removal of acid dyes subsequent to its thermal treatment. Dyes and Pigments 69: 128-136.
- Chang M.Y. and Juang, R.S. (2004). Adsorption of tannic acid, humic acid and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay. Journal of Colloid Interface Science 278(1): 18-25.
- Chowdhury, S. and Saha, P. (2010). Sea shell powder as a new adsorbent to remove basic green 4, kinetic and thermodynamic studies. Chemical Engineering Journal 164: 168-177.
- Dawood, S. and Sen, T.K. (2012). Removal of anionic dye congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design. Water Research 46(6): 1933-1946.
- Demirbas, A. (2009). Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review. Journal of Hazardous Materials 167: 1-9.
- De Souza-Macedo, J., Da Costa-Júnior, N.B., Almeida, L.E., Da Silva-Vieira, E.F., Cestari, A.R., De Fátima-Gimenez, I., Carreño, N.L.V. and Barreto, L.S. (2006). Kinetic and colorimetric study of the adsorption of dyes on mesoporous activated carbon prepared from coconut coir dust. Journal of Colloid and Interface Science 298: 515-522.
- Dias, J.M., Maria, C.M., Ferraza, A., Almeida, M.F., Rivera-Utrilla, J. and Sanchez-Polo, M. (2007). Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous-phase treatment: a review. Journal of Environmental Management 85: 833-846.
- El Qada, E.N., Abdelghany, E.A. and Magdy, Y.H. (2013). Utilization of activated carbon for the removal of basic dyes in fixed-bed microcolumn. International Journal of Energy and Environment 4(5): 815-824.
- Fu, D., Zhang, Y., Lu, F., Chu, P.H. and Shang, J. (2012). Removal of organic materials from TNT red water by bamboo charcoal adsorption. Chemical Engineering Journal 193-194: 39-49.
- Hamdaoui, O. (2006). Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar

- sawdust and crushed brick. *Journal of Hazardous Materials* 135: 264-273.
- Hameed, B.H. and Daud, F.B.M. (2008). Adsorption studies of basic dye on activated carbon derived from agricultural waste: *Hevea brasiliensis* seed coat. *Chemical Engineering* 139: 48-55.
- Han, R., Ding, D., Xu, Y., Zou, W., Wang, Y., Li, Y. and Zou, L. (2008). Use of rice husk for adsorption of congo red from aqueous solution in column mode. *Bioresources Technology* 99: 2938-2946.
- Ichcho, S., Khouya, E., Fakhi, S., Ezzine, M., Hannache, H., Pallier, R. and Naslain, R. (2005). Influence of the experimental conditions on porosity and structure of adsorbents elaborated from Moroccan oil shale of Timahdit by chemical activation. *Journal of Hazardous Materials* 118: 45-51.
- Iqbal, M.J. and Ashiq, M.N. (2007). Adsorption of dyes from aqueous solutions on activated charcoal. *Journal of Hazardous Materials* 139: 57-66.
- Jain, R. and Sikarwar, S. (2008). Removal of hazardous dye congo red from waste material. *Journal of Hazardous Materials* 152: 942-948.
- Krysztalkiewicz, A., Binkowski, S. and Jesionowski, T. (2002). Adsorption of dyes on a silica surface. *Applied Surface Science* 199: 31-39.
- Kumar, P.S., Ramalingam, S., Senthamarai, C., Niranjana, M., Vijayalakshmi, P. and Sivanesan, S. (2010). Adsorption of dye from aqueous solution by cashew nut shell: studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions. *Desalination* 261(1): 52-60.
- Lemley, A., Wagnet, W. and Kneen, B. (1995). Activated carbon treatment of drinking water. In: *water treatment notes* Cornell Cooperative Extension, College of Human Ecology, Available from: <http://waterquality.cce.cornell.edu/publications/CCEWQ-03-ActivatedCarbonWtrTrt.pdf>. cited 2015 May 12.
- Lim, A.P. and Aris, A.Z. (2014). Continuous fixed-bed column study and adsorption modeling: removal of cadmium (II) and lead (II) ions in aqueous solution by dead calcareous skeletons. *Biochemical Engineering Journal* 87: 50-61.
- Lorenc-Grabowska, E. and Gryglewicz, G.Z. (2007). Adsorption characteristics of congo red on coal-based mesoporous activated carbon. *Dyes and Pigments* 74: 34-40.
- Marsh, H., Heintz, E.A. and Rodrigues-Reinoso, F. (1997). *Introduction to Carbon Technologies*. Spain: Publicaciones de la Universidad de Alicante. pp 669.
- Mittal, A., Gajbe, V. and Mittal, J. (2008). Removal and recovery of hazardous triphenyl methane dye, methyl violet through adsorption over granulated waste materials. *Journal of Hazardous Materials* 150: 364-375.
- Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D. and Gupta, V.K. (2010). Adsorption of hazardous dye crystal violet from wastewater by waste materials. *Journal of Colloid and Interface Science* 343: 463-473.
- Mohanty, K., Jha, M., Meikap, B.C. and Biswas, M.N. (2005). Removal of chromium (VI) from dilute aqueous solutions by activated carbon developed from *Terminalia arjuna* nuts activated with zinc chloride. *Chemical Engineering Science* 60: 3049-3059.

- Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon* 42: 83–94.
- Olgun, A. and Atar, N. (2009). Equilibrium and kinetic adsorption study of basic yellow 28 and basic red 46 by a boron industry waste. *Journal of Hazardous Materials* 161: 148 - 156.
- Ponnusami, V., Kritika, M.V., Madhuram, R. and Srivastava, S.N. (2007). Biosorption of reactive dye using acid-treated rice husk: factorial design analysis. *Journal of Hazardous Materials* 142: 397–403.
- Rafatullah, M., Sulaimana, O., Hashima, R. and Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. *Journal of Hazardous Materials* 177: 70–80.
- Rahman, I.A., Saad, B., Shaidan, S. and Rizal, E.S.S. (2005). Adsorption characteristics of malachite green on activated carbon derived from rice husks produced by chemical–thermal process. *Bioresource Technology* 96: 1578–1583.
- Rao, V.V.B. and Rao, S.R.M. (2006). Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by fly ash. *Chemical Engineering Journal* 116: 77–84.
- Salleh, M.A.M., Mahmoud, D.K., Azlina, W., Karim, W.A. and Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. *Desalination* 280: 1-13.
- Senthilkumar, S., Kaalamani, P., Porkodi, K., Varadarajan, P.R. and Subburaam, C.V. (2006). Adsorption of dissolved reactive red dye from aqueous phase onto activated carbon prepared from agricultural waste. *Bioresource Technology* 9(14): 1618-1625.
- Singh, K.P., Malik, A., Sinha, S. and Ojha, P. (2008). Liquid-phase adsorption of phenols using activated carbons derived from agricultural waste materials. *Journal of Hazardous Materials* 150: 626–641.
- Srivastava, V.C., Mall, I.D. and Mishra, I.M. (2007). Adsorption thermodynamics and isosteric heat of adsorption of toxic metal ions onto bagasse fly ash (BFA) and rice husk ash (RHA). *Chemical Engineering Journal* 132: 267–278.
- Sun, D., Zhang, C., Wub, Y. and Liu, X. (2010). Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 181: 335-342.
- Tan, I.A.W., Hameed, B.H. and Ahmed, A.A. (2007). Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fibre: activated carbon. *Chemical Engineering Journal* 127: 111–119.
- Valix, M., Cheung, W.H. and McKay, G. (2004). Preparation of activated carbon using low temperature carbonisation and physical activation of high ash raw bagasse for acid dye adsorption. *Chemosphere* 56: 493–501.
- Voudrias, E., Fytianos, K. and Bozani, E. (2002). Sorption-desorption isotherms of dyes from aqueous solutions and wastewaters with difference sorbent materials. *Global Nest: the International Journal* 4: 75-83.
- Wang, C.C., Juang, L.C., Hsu, T.C., Lee, C.K., Lee, J.F. and Huang, F.C. (2004). Adsorption of basic dyes onto montmorillonite. *Journal of Colloid Interface Science* 273: 80–86.
- Wang, L. and Wang, A. (2007). Adsorption characteristics of congo red onto the chitosan/montmorillonite nanocompo site.

- Journal of Hazardous Materials 147(3): 979–985.
- Weisburger, J.H. (2002). Comments on the history and importance of aromatic and heterocyclic amines in public health. *Mutation Research-Fundamental of Molecular Mechanics and Mutagenesis* 506-507: 9-20.
- Won, S.W., Wu, G., Ma, H., Liu, Q., Yan, Y., Cui, L. and Yu, Y.S. (2006). Performance and mechanism in adsorption of reactive red 4 by solid waste from coke wastewater treatment plant. *Waste Management Resources* 24: 299–300.
- Woolard, C., Strong, J. and Erasmus, C. (2002). Evaluation of the use of modified coal ash as a potential sorbent for organic waste streams. *Applied Geochemistry* 17: 1159–1164.
- Wu, F.C., Wu, P.H., Tseng, R.L. and Juang, R.S. (2010). Preparation of activated carbons from unburnt coal in bottom ash with KOH activation for liquid-phase adsorption. *Journal of Environmental Management* 91: 1097–1102.
- Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S. and Ang, H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science* 209: 172–184.
- Yagub, M.T., Sen, T.K. and Ang, H. (2012). Equilibrium, kinetics, and thermodynamics of methylene blue adsorption by pine tree leaves. *Water, Air and Soil Pollution* 223(8): 5267–5282.
- Yanan, D., Yanlei, S., Wenjuan, C., Jinming, P., Yan, Z. and Zhongyi, J. (2011). Ultra filtration enhanced with activated carbon adsorption for efficient dye removal from aqueous solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 19(5): 863-869.
- Zhuannian, L., Anning, Z., Guirong, W. and Xiaoguang, Z. (2009). Adsorption behavior of methyl orange onto modified ultrafine coal powder. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 17(6): 942–948.

