

กระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วย*

Adsorption of Reactive Red 31 from synthetic wastewater by using banana peels

ศุภกิจ แซ่เจียม (Suphakit Saechiam)**

กัณฑรีย์ ศรีพงศ์พันธุ์ (Guntharee Sripongpun)***

บทคัดย่อ

กระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 (Reactive red 31, RR31) จากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปลือกกล้วยโดยทำการทดลองแบบที่ละเท (batch experiments) ทำการดูดซับด้วยเปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ กล้วยน้ำว้า และกล้วยหอมทอง (*Musa x paradisiaca*, ABB and *Musa acuminata*, AAA) ที่ 2 ระยะการสุก คือ กล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และกล้วยสุก (ระยะที่ 6) พบว่า ประสิทธิภาพดีที่สุดในการดูดซับสี รีแอคทีฟ เรด 31 คือ ร้อยละ 98.54 เมื่อดูดซับด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบระยะที่ 2 โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 คือ ที่ pH 2 เวลาสมมูล 12 ชั่วโมง ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 25 มก./ล. ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ขนาดตัวดูดซับอยู่ระหว่าง >0.150-0.212 มม. ที่ 30°C. และที่ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบ/นาที กระบวนการดูดซับสีรีแอคทีฟ เรด 31 พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ สำหรับ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม อีกทั้งผลการทดลองเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) แบบสุ่ม ที่เกิดขึ้นได้เอง ภายในช่วง อุณหภูมิที่ทดสอบ

คำสำคัญ: กระบวนการดูดซับ รีแอคทีฟ เรด 31 เปลือกกล้วย ไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ

* เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย

For research publication

** นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Graduate Student, Master of Science Program in Environmental Science, Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University, Tel: 082 075 2129, Email: ssaechiam@gmail.com

*** รศ. ดร. อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Abstract

The adsorption of Reactive Red 31 (RR31) from synthetic wastewater by using banana peel adsorbents was studied in batch experiments. Two species of banana peel adsorbents (*Musa x paradisiaca*, ABB and *Musa acuminata*, AAA) with two maturation stages (2 and 6) were studied. The best efficiency of the RR31 removal (98.54%) was obtained by using the powder of unripe AAA banana peel (stage 2) as adsorbents under the optimal conditions at pH 2, 12 h equilibrium time, initial dye concentration of 25 mg/L, adsorbent particle size of >0.150–0.212 mm at the dose of 1 g/L, 30°C with the agitation speed of 150 rpm. The experimental results of RR31 adsorption were best described by the Langmuir isotherm and pseudo second order model provided satisfactorily description. Thermodynamic results of the adsorption revealed that they were endothermic, random and spontaneous processes under investigated temperature range.

Keywords: adsorption, Reactive Red 31, banana peels, adsorption isotherms, adsorption kinetics, adsorption thermodynamics

บทนำ

สีย้อมถูกปล่อยมาจากอุตสาหกรรมสิ่งทอทั่วโลกลงสู่แหล่งน้ำประมาณ 100 ตัน/ปี (Ferreira et al., 2014; Yagub et al., 2014) กระบวนการย้อมเป็นกระบวนการที่ใช้ปริมาณมาก จึงทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีในปริมาณมากด้วย เมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ อาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เช่น เป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogen) สารที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ (mutagen) ส่งผลกระทบต่อปลาหลายสายพันธุ์ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ นอกจากนี้ สียังทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ชวนมองในแหล่งน้ำ บดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำ ทำให้พืชน้ำสังเคราะห์ด้วยแสงได้น้อยลง อีกทั้งโดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารมลพิษประเภทสารอินทรีย์ จึงทำให้น้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมมีค่า BOD และค่า COD เพิ่มขึ้น และค่า DO ลดลง (Chakravarty et al., 2015)

สีรีแอคทีฟ เรด 31 (Reactive red 31, RR31) เป็นสีในกลุ่ม reactive เมื่อละลายน้ำจะให้ประจุลบ ซึ่งนิยมใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี สำหรับการบำบัดสีจากน้ำเสียมียุทธศาสตร์หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี การแลกเปลี่ยนประจุ และกระบวนการดูดซับ เป็นต้น (Seow and Lim, 2016) กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการบำบัดสีที่สำคัญวิธีหนึ่ง ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสูง ราคาไม่แพง ออกแบบไม่ซับซ้อน และกระบวนการไม่ยุ่งยาก (Seow and Lim, 2016) นอกจากนี้ งานวิจัยในอดีตมีการนำตัวดูดซับที่ราคาไม่แพงมาทดลองดูดซับสี เช่น เปลือกส้ม (Fernandez et al., 2014) กากตะกอน (Devi and Saroha, 2017) และเปลือกไข่ (Abdel-Khalek, Abdel Rahman and Francis, 2017) เป็นต้น

กล้วยจัดเป็นผลไม้ที่มีโภชนาการสูงและย่อยง่าย จากสถิติการผลิตผลไม้ที่สำคัญของโลกเมื่อ พ.ศ. 2550 รายงานว่ากล้วยเป็นผลไม้อันดับที่ 2 ที่นิยมบริโภค คิดเป็น 16% ของผลไม้ทั้งหมดทั่วโลก (Mohapatra, Mishra, and Sutar, 2010) โดยกล้วยแต่ละผลประกอบด้วยเปลือกกล้วยประมาณ 18-20% โดยน้ำหนัก (Palma et al., 2011) จึงทำให้ในแต่ละวันจะมีเปลือกกล้วยที่เหลือจากตลาดและครัวเรือนจำนวนหลายตัน (กรมส่งเสริมการเกษตร 2547; เสริม จันท์ฉาย และบุศรากรณ์ มหาโยธี, 2559) อย่างไรก็ตาม เปลือกกล้วยประกอบด้วย carboxyl, hydroxyl, amide และ lignocellulose ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับ (Mohammed and Chong, 2014) ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงสนใจนำเปลือกกล้วยมาดูดซับสี Reactive red 31 (RR31) ในน้ำเสียสังเคราะห์

วิธีการวิจัย

1. ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

สีย้อม Reactive red 31 (RR31) ได้รับความอนุเคราะห์มาจากโรงงานฟอกย้อมเส้นใยธรรมชาติแห่งหนึ่งในจังหวัดราชบุรี การเตรียม stock solution ของสี RR31 เตรียมโดยละลายสี RR31 น้ก 1.000 ก. ด้วยน้ำกลั่น ปริมาตรให้เท่ากับ 1 ล. จะได้สี RR31 ที่มีความเข้มข้น 1,000 มก./ล. แล้วนำมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่กำหนด

2. ตัวดูดซับ (Adsorbent)

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง คือ เปลือกกล้วย 2 ชนิด คือ กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง แต่ละชนิดแบ่งย่อยเป็นอีก 2 ระยะการสุก คือ เปลือกกล้วยดิบ (ระยะที่ 2) และเปลือกกล้วยสุก (ระยะที่ 6) (Valmayor et al., 2000; Tapre and Jain, 2012) โดยซื้อเปลือกกล้วยมาจากตลาด ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 1-2 มม. นำมาล้างกำจัดสิ่งสกปรก สะเด็ดน้ำ ผึ่งพอมหมาด ๆ แล้วอบที่ $<60^{\circ}\text{C}$. นาน 5 วัน จนแห้ง บด และ ร่อนผ่านตะแกรง เพื่อคัดขนาดให้ได้เท่ากับ $>0.150-0.212$ มม. เก็บในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลอง ต้องอบที่ 103°C . อีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้น

3. การทดลองกระบวนการดูดซับสี RR31

กระบวนการดูดซับสี RR31 ทำการทดลองแบบทีละเท (batch experiments) ดังนี้

3.1 ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

เนื่องจากผงเปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิด (กล้วยน้ำว้า และ กล้วยหอมทอง) และ 2 ระยะการสุก (ดิบ คือ ระยะที่ 2 และ สุก คือ ระยะที่ 6) มีลักษณะทางกายภาพต่างกัน ดังแสดงในผลการทดลองหัวข้อที่ 3 นอกจากนี้ Tartrakoon et al. (1999) รายงานว่าเปลือกกล้วยดิบประกอบด้วยแทนนิน 6.84% ซึ่งมากกว่าในเปลือกกล้วยสุก (ที่มีแทนนิน 4.69%) และ Emaga et al. (2007) รายงานเปลือกกล้วยหอมทองดิบประกอบด้วยแป้ง 11.1% ซึ่งมากกว่าในเปลือกกล้วยหอมทองสุก (ที่มีแป้ง 3.3%) ดังนั้น จึงนำผงเปลือกกล้วยทั้ง 2 ชนิด และ 2 ระยะการสุกมาทดลอง เพื่อหาผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่เหมาะสม รวมทั้ง ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 โดยนำสารละลายสี RR31 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มก./ล. ปริมาตร 30 มล. มาปรับ pH ตามกำหนด (pH 2-9) ด้วย 0.1 M HCl หรือ 0.1 M NaOH แล้วนำสารละลายที่ปรับ pH แล้วมาเติมลงในขวดแก้วฝาเกลียวที่มีผงเปลือกกล้วยอยู่ในอัตราส่วน 1 ก./ล. นำไปเขย่าที่ 150 รอบ/นาที นาน 24 ชม.ที่

30°ซ. แยกส่วนที่เป็นของแข็งออกจากสารละลายด้วยการกรองผ่านผ้าไนลอนที่มีรูขนาด 30 ไมครอน แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Analytical Lab Science Co., Ltd, Thailand, Model V-530) ที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ที่เหมาะสม ด้วยสมการที่ 1 ดังนี้

$$\text{Dye removal (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 (มก./ล.) และ C_e คือ ความเข้มข้นของสี RR31 ที่สมดุล (มก./ล.)

ผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 คือ ผงเปลือกกล้วยที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 สูงสุด และ pH เหมาะสม คือ pH ที่ทำให้ผงเปลือกกล้วยมีประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 สูงสุด แล้วนำผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุก รวมทั้งที่ pH เหมาะสมไปใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 ค่า Point of Zero Charge (pH_{pzc})

การทดลองวิเคราะห์ค่า pH_{pzc} ซึ่งดัดแปลงจากวิธีการของ Yang et al. (2004) โดยนำสารละลาย 0.005 M $CaCl_2$ มาต้มเพื่อไล่ก๊าซ CO_2 รอให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง แล้วปรับ pH เริ่มต้น (pHI) ของสารละลาย 0.005 M $CaCl_2$ ให้อยู่ในช่วง pH 5-9 เติมผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1 มา 1 ก./ล. นำไปแช่อยู่ที่ 150 รอบ/นาที นาน 24 ชม. ที่ 30°ซ. วัดค่า pH หลังการดูดซับ (pHF) บันทึกผล แล้วนำมาสร้างกราฟระหว่าง pHI กับ pHF เพื่อหาค่า pH_{pzc} จากจุดตัดของกราฟระหว่าง pHI กับ pHF

3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงเปลือกกล้วย

นำผงเปลือกกล้วยทั้งสองชนิดและสองระยะเวลาการสุกที่ทดลอง ตลอดจนผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะเวลาการสุกที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ดีที่สุด มาศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

3.4 เวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 3.1 เมื่อทดลองที่เวลาสัมผัสในช่วง 0-24 ชม. และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีในช่วง 5-100 มก./ล. โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด ได้แก่ ที่ pH เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1

3.5 ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 3.1 เมื่อทดลองด้วยปริมาณตัวดูดซับในช่วง 0.25-10 ก./ล. โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด ได้แก่ ที่ pH เวลาสัมผัส และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1 และ 3.4

3.6 ขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 3.1 เมื่อทดลองด้วยขนาดตัวดูดซับในช่วง $<0.063->1$ มม. โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด ได้แก่ ที่ pH เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี และปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1, 3.4-3.5

3.7 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 3.1 เมื่อทดลองที่อุณหภูมิในช่วง $25-40^{\circ}\text{C}$. โดยทำการทดลองภายใต้สภาวะที่กำหนด ได้แก่ ที่ pH เวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี ปริมาณตัวดูดซับ และขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.1, 3.4-3.6

3.8 การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วย

นำผงเปลือกกล้วยชนิดและระยะการสุกที่ดูดซับสี RR 31 ได้ดีที่สุด ปริมาณ 1 ก./ล. เติมน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.1M HCl จนได้สารละลายที่มี pH 2 เขย่าที่ 150 รอบ/นาที ที่ 30°C . ในสภาพการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ (คือ 30 นาที, 2 ชม., 6 ชม., 12 ชม. และ 24 ชม.) จากนั้น กรองผ่านผ้าไนลอนที่มีรูขนาด 30 ไมครอน เพื่อแยกผงเปลือกกล้วยออก แล้วนำสารละลายที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์ค่า COD โดยวิธี closed reflex, titrimetric method ตามวิธีการของ American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation (1985) Standard method 508 B

3.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherms)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจากข้อ 3.4 มาคำนวณตามแบบจำลองการดูดซับ Freundlich และ Langmuir ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการเส้นตรง สมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (Baek et al., 2010; Dada et al., 2012; Hazzaa and Hussien, 2015; Moubarak et al., 2014)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2)$$

เมื่อ q_e (มก./ก.) คือ ปริมาณการดูดซับสีของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล; C_e (มก./ล.) คือ ความเข้มข้นของสารละลายสี ณ สภาวะสมดุล; K_F คือ ค่าคงที่ Freundlich ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความจุในการดูดซับของตัวดูดซับและ n คือ ความแรงของการดูดซับ (adsorption intensity) ซึ่งถ้า n อยู่ระหว่าง 1-10 แสดงถึงกระบวนการดูดซับที่ดี; ถ้า $n = 1$ การแยกชั้นระหว่าง 2 ส่วน ไม่ขึ้นกับความเข้มข้น; ถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงถึงการดูดซับเกิดแบบปกติ ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า $1/n > 1$ แสดงถึงการดูดซับเกิดแบบพร้อมกัน $1/n$ เป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity) ยิ่ง $1/n$ มีค่าน้อย แสดงว่ามีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก โดยค่า K_F และ n สามารถคำนวณได้จากค่าจุดตัดแกน y (y -intercept) และความชัน (slope) ของสมการเส้นตรงระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ (Dada et al., 2012)

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (3)$$

เมื่อ q_m (มก./ก.) คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว และ K_L (ล./มก.) คือ ค่าคงที่ Langmuir โดยค่า q_m และ K_L สามารถคำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e

3.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจากข้อ 3.4 มาใช้ในการคำนวณแบบจำลองการดูดซับแบบ pseudo first order และ pseudo second order ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ (Ho, 2004; Ho and Mckay, 2000; Qiu et al., 2009)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (4)$$

เมื่อ q_e , q_t (มก./ก.) คือ ปริมาณการดูดซับที่เวลาสมดุล และที่เวลาใด ๆ ตามลำดับ; k_1 (ล./นาท) คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ pseudo first order โดยค่า k_1 และ q_e สามารถคำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

เมื่อ k_2 (ก./มก.นาท) คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ pseudo second order โดยค่า k_2 และ q_e สามารถคำนวณได้จากค่าจุดตัดแกน y และความชันจากการสร้างกราฟระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับ t

3.11 เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)

นำผลการทดลองที่สภาวะเหมาะสมจากข้อ 3.7 มาใช้ในการคำนวณเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ (298.15, 303.15, 308.15 และ 313.15 องศาเซลวิน หรือ 25, 30, 35 และ 40^oซ. ตามลำดับ) โดยค่า K_C คำนวณได้จากสมการที่ 6 (Chowdhury et al., 2011)

$$K_C = \frac{C_a}{C_e} \quad (6)$$

เมื่อ K_C คือ ค่าคงที่สมดุลของเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ; C_a (มก./ล.) คือ ค่าความเข้มข้นของสปีที่สมดุลบนตัวดูดซับ; C_e (มก./ล.) คือ ค่าความเข้มข้นของสปีที่สมดุลในสารละลาย

ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) คำนวณได้จากสมการที่ 7 (Setiabudi et al., 2016)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_C \quad (7)$$

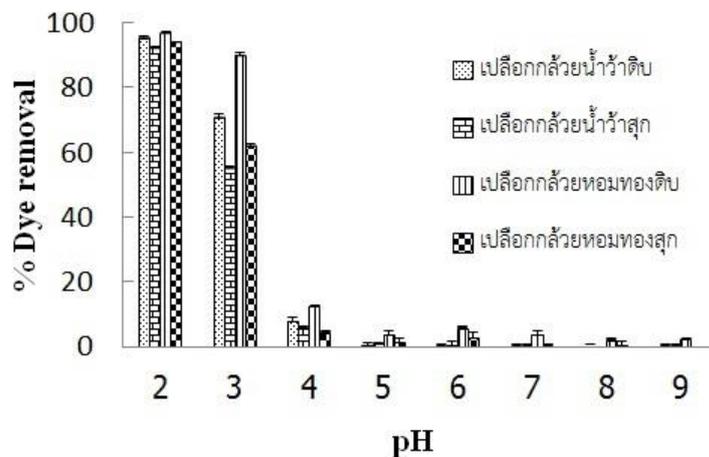
เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล-องศาเซลวิน และ T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ (องศาเซลวิน) ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) คำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y จากการสร้างกราฟระหว่าง $\ln K_C$ กับ $1/T$ ดังแสดงในสมการที่ 8 (Setiabudi et al., 2016)

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (8)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

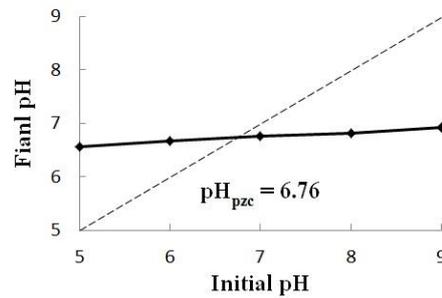
ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วย 2 ชนิด และ 2 ระยะการสุก ที่ pH ในช่วง 2-9 แสดงดังรูปที่ 1 พบว่า ผงเปลือกกล้วยดิบดูดซับสี RR31 ดีกว่าผงเปลือกกล้วยสุกทั้งสองชนิด อีกทั้งพบว่าตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับสี RR31 คือ ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ที่ pH 2 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 สูงสุด คือ 96.89% ดังนั้น จึงเลือกเฉพาะผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ที่ pH 2 มาทำการทดลองต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR31 สูงสุด



รูปที่ 1 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยตัวดูดซับทั้ง 4 แบบจากผงเปลือกกล้วย 2 ชนิด และ 2 ระยะการสุก ที่ pH ต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลอง คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 25 มก./ล. ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 มม. ที่ 30°C. ความเร็วในการเขย่า 150 รอบ/นาที นาน 24 ชม.

2. ค่า Points of Zero Charge (pH_{pzc})

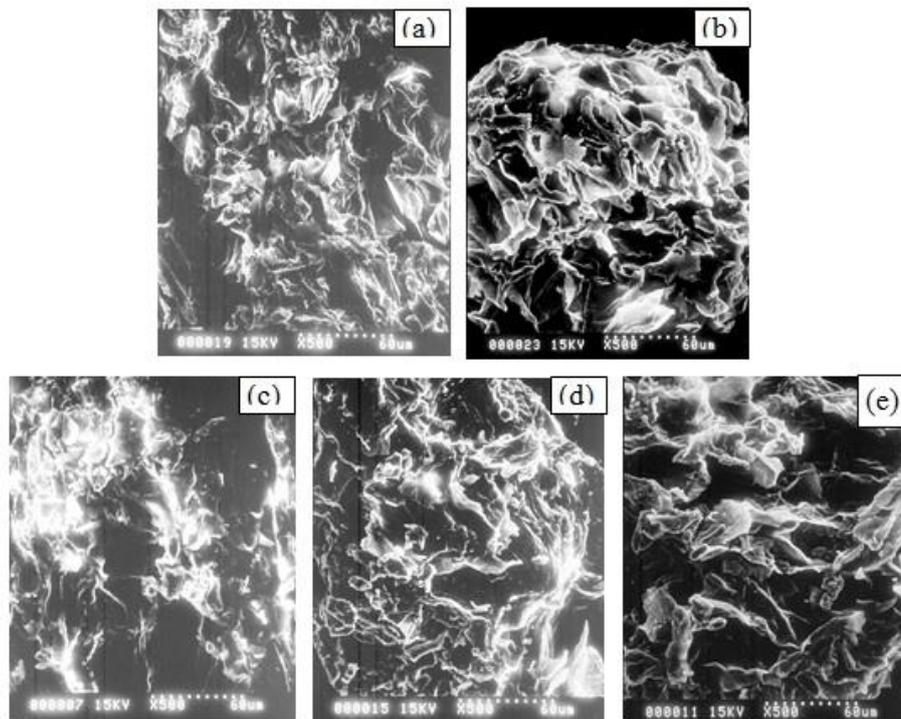
Points of zero charge (pH_{pzc}) คือ pH ที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ โดยเมื่อ $pH < pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุบวก แต่ถ้า $pH > pH_{pzc}$ ประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะเป็นประจุลบ (Yang et al., 2004) ผลการทดลอง พบว่าผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบมีค่า pH_{pzc} เท่ากับ 6.76 (รูปที่ 2) โดยผลการทดลองค่า pH_{pzc} ที่ได้สอดคล้องกับค่า pH ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 1 ที่ได้ว่า pH ที่เหมาะสมที่สุด คือ pH 2 ซึ่ง $pH 2 < pH_{pzc}$ (pH 6.76) ดังนั้นที่ pH 2 สี RR31 เมื่อละลายน้ำจะได้ประจุลบ จึงถูกดูดซับได้ดีด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ผิวจะเป็นประจุบวก



รูปที่ 2 Points of zero charge (pH_{pzc}) ของผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

3. การศึกษาลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพของผิวผงเปลือกกล้วยที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของผงเปลือกกล้วยขนาด $>0.150-0.212$ มม. เมื่อศึกษาด้วย SEM กำลังขยาย 500 เท่า:

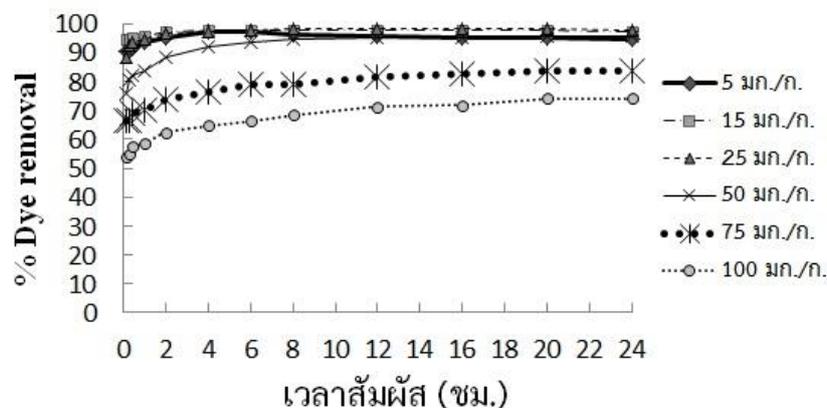
- a = ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าดิบก่อนดูดซับ; b = ผงเปลือกกล้วยน้ำว้าสุกก่อนดูดซับ
c = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบก่อนดูดซับ; d = ผงเปลือกกล้วยหอมทองสุกก่อนดูดซับ
e = ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบหลังดูดซับสี RR31

ที่มา: Saechiam and Sripongpun (2019)

จากรูปที่ 3 พบว่า ผิวของเปลือกกล้วยมีลักษณะหยาบ รูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ด้านในของเปลือกกล้วยบางส่วนมีลักษณะเป็นลอน และบางส่วนมีลักษณะเป็นรูคล้ายปล่องภูเขาไฟ โดยผิวเปลือกกล้วยสุกจะมีลักษณะการเรียงตัวเป็นลอน ๆ อยู่มากกว่าผิวเปลือกกล้วยดิบ แต่ผลการวิจัยครั้งนี้กลับพบว่า เปลือกกล้วยหอมทองดิบดูดซับสี RR31 ได้ดีที่สุด ดังนั้นกลไกการดูดซับสี RR31 จึงไม่น่าจะสัมพันธ์กับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ แต่อาจเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับในหัวข้อที่ 9 ที่การดูดซับสีอธิบายได้ดีด้วย Langmuir adsorption isotherms แสดงว่ากระบวนการดูดซับเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี อีกทั้ง ผลการศึกษาด้วย SEM พบว่าผิวเปลือกกล้วยหอมทองดิบหลังดูดซับสี (รูปที่ 3e) มีลักษณะไม่แตกต่างจากผิวเปลือกกล้วยหอมทองดิบก่อนดูดซับสี (รูปที่ 3c) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirilamduan et al. (2011) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านงบประมาณและเวลา ทำให้การวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านเคมีสำหรับผิวเปลือกกล้วยทั้ง 4 แบบที่ศึกษาได้ แต่หากสามารถดำเนินการศึกษาเพิ่มเติมด้านนี้ได้ อาจช่วยให้สามารถเข้าใจกลไกการดูดซับสี RR31 ด้วยผิวเปลือกกล้วยหอมทองดิบได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสนับสนุนว่าได้รับอิทธิพลเด่นมาจากกลไกการดูดซับทางเคมี

4. เวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผิวเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ (0-24 ชม.) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีต่าง ๆ (5-100 มก./ล.) แสดงดังรูปที่ 4



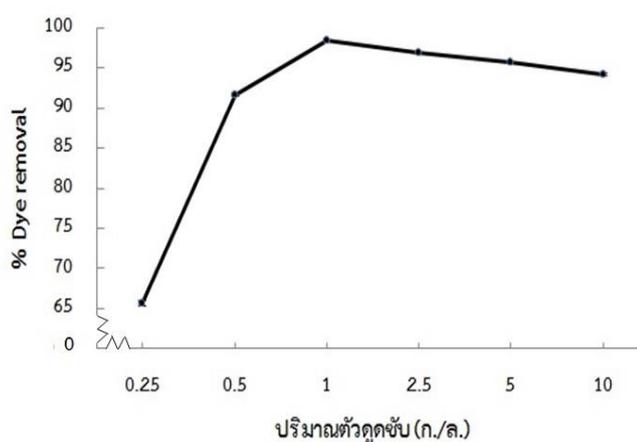
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผิวเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัส 0-24 ชม. และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 5-100 มก./ล. ที่ pH 2 ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 มม. ที่ 30°C., 150 รอบ/นาที

จากรูปที่ 4 พบว่า เวลาสมดุสำหรับการทดลองทุกความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 จะเข้าสู่สมดุประมาณ 12 ชม. เนื่องจากก่อนดูดซับตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีจำนวนมาก เมื่อเวลาสัมผัสนานขึ้น ตำแหน่งบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยสี RR31 จนกระทั่งเข้าสู่สมดุ กระบวนการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ (Kumar et al., 2011) โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 สูงสุด คือ 98.37% ที่เวลาสมดุ 12 ชม. และความเข้มข้นเริ่มต้นของสี คือ 25 มก./ล. อีกทั้งพบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีเพิ่มขึ้น จะทำ

ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีน้อย ๆ พื้นผิวของผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบจะมีตำแหน่งอีกมากที่สามารถจะดูดซับสี RR31 ได้ เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 จึงมีค่ามาก ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีมาก ๆ ตำแหน่งที่สามารถดูดซับสี RR31 บนพื้นผิวของผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบจะอิ่มตัว ทำให้ไม่สามารถดูดซับสีเพิ่มได้อีก จึงยังมีสีหลงเหลืออยู่ เมื่อนำผลที่ได้มาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 จึงมีค่าลดลง (Salleh et al., 2011)

5. ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

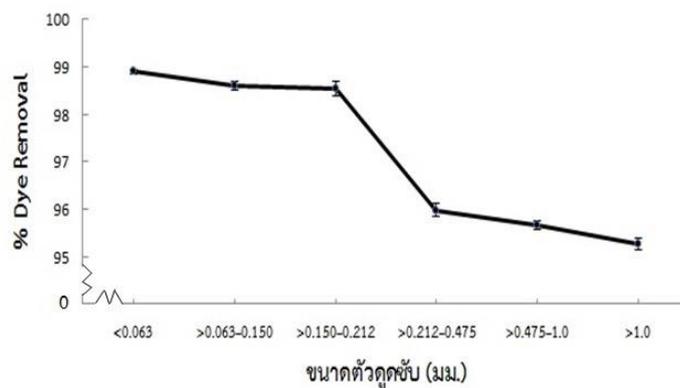
ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ปริมาณตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 ก./ล.) แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.25 ก./ล. เป็น 1 ก./ล. ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 65.67% เป็น 98.45% เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้เพิ่มจำนวนตำแหน่งบนพื้นผิวในการดูดซับสี (Yagub et al., 2014) โดยเมื่อใช้ตัวดูดซับ 1 ก./ล. จะดูดซับสี RR31 ได้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ 98.45 % แต่เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในช่วง 2.5-10 ก./ล พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ที่ได้ไม่แตกต่างกันนักเมื่อเทียบกับเมื่อใช้ตัวดูดซับ 1 ก./ล. จึงเลือกปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. มาใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ปริมาณของตัวดูดซับต่าง ๆ (0.25-10 ก./ล.) ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 มก./ล. ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 มม. ที่ 30°C., 150 รอบ/นาที นาน 12 ชม.

6. ขนาดตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

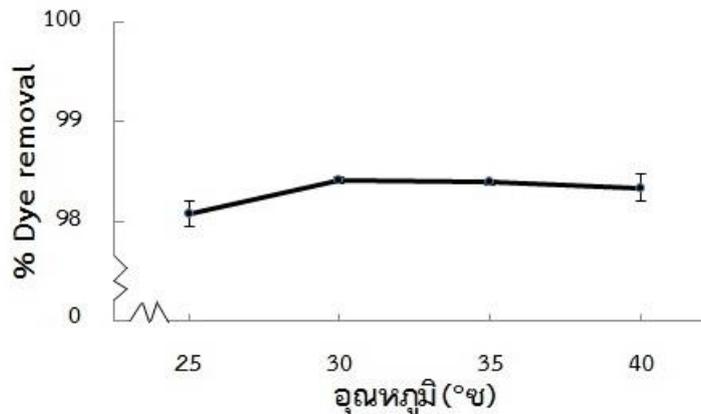
ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ขนาดตัวดูดซับต่าง ๆ (<0.063->1 มม.) แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ตัวดูดซับขนาดเล็กดูดซับสี RR31 ได้มากกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ เนื่องจากตัวดูดซับขนาดเล็กมีพื้นผิวทั้งหมดสำหรับการดูดซับสีมากกว่าตัวดูดซับขนาดใหญ่ (Krishna and Swamy, 2012) อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับขนาด >0.150-0.212 มม. และ <0.063 มม. มีประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 เป็น 98.54% และ 98.90% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาถึงความสะดวกในการเตรียมตัวดูดซับ และประสิทธิภาพที่ได้ จึงเลือกผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบขนาด >0.150-0.212 มม. มาใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบขนาดต่าง ๆ (<0.063->1 มม.) ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 มก./ล. ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ที่ 30^oซ., 150 รอบ/นาที นาน 12 ชม.

7. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31

ผลการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่อุณหภูมิต่าง ๆ (25-40^oซ.) แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25^oซ. เป็น 40^oซ. ประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 เพิ่มขึ้นจาก 98.08% เป็น 98.41% เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง และเพิ่มอัตราการแพร่ของสี RR31 จากบริเวณพื้นผิวภายนอก ผ่านเข้าไปยังรูภายในของตัวดูดซับ (Hazzaa and Hussien, 2015) อย่างไรก็ตาม พบว่า อุณหภูมิที่ต่างกันในช่วง 30-40^oซ. มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้เพื่อให้สอดคล้องกับอุณหภูมิของประเทศไทย จึงเลือกอุณหภูมิที่ 30^oซ. มาใช้ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ย (mean) และแถบการเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD bar) ของค่าประสิทธิภาพการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่ 25–40°C. ที่ pH 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR31 ที่ 25 มก./ล. ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ขนาดตัวดูดซับ >0.150–0.212 มม. 150 รอบ/นาที นาน 12 ชม.

8. การศึกษาสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วย

ผลการศึกษาค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ ภายใต้สภาวะการทดลอง ณ เวลาสัมผัสต่าง ๆ (30 นาที, 2 ชม., 6 ชม., 12 ชม. และ 24 ชม.) เมื่อวิเคราะห์ด้วยค่า COD แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบขนาด >0.150–0.212 มม. ในน้ำกลั่นที่ปรับด้วย 0.1 M HCl จนได้สารละลายที่มี pH 2 ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ที่ 30°C., 150 รอบ/นาที ที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยค่า COD

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean±SD) ของค่าสารอินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่เวลาสัมผัสต่าง ๆ ที่วิเคราะห์ด้วยค่า COD (มก./ล.)				
30 นาที	2 ชม.	6 ชม.	12 ชม.	24 ชม.
160±0	165±4	165±4	172±4	179±4

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่า COD เพิ่มขึ้นจาก 160 มก./ล. เป็น 179 มก./ล. เมื่อเพิ่มเวลาสัมผัสจาก 30 นาที เป็น 24 ชม. โดย Tartrakoon et al. (1999) และ Emaga et al. (2007) รายงานว่ามี แทนนิน และแป้ง อยู่มากในเปลือกกล้วยดิบ ดังนั้นสารเหล่านี้จึงอาจถูกชะล้างออกมา และส่งผลต่อค่า COD ที่วิเคราะห์ได้อย่างไรก็ตาม ค่า COD ที่ถูกชะล้างออกมาจากผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เนื่องจากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งสำหรับโรงงานที่ประกอบกิจการเกี่ยวกับสิ่งทอ กำหนดไว้ให้มีค่า COD ไม่เกิน 400 มก./ล. (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540)

9. ไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherms)

ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ สรุปดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่า พบว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการ Langmuir adsorption isotherms มากกว่าสมการ Freundlich adsorption isotherms แสดงว่าพื้นผิวตัวดูดซับมีลักษณะเป็น homogeneous และมีตำแหน่งการดูดซับที่แน่นอน โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวตัวดูดเพียงชั้นเดียว (Kumar et al., 2011)

ตารางที่ 2 Adsorption isotherm parameters สำหรับการดูดซับสี่ RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

Isotherm Models		Isotherm Parameters	
Langmuir	q_m (มก./ก.)	68.03	
	K_L (ล./มก.)	0.5742	
	R^2	0.9920	
Freundlich	$1/n$	0.4499	
	n	2.2227	
	K_F	19.3063	
	R^2	0.7692	

10. จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

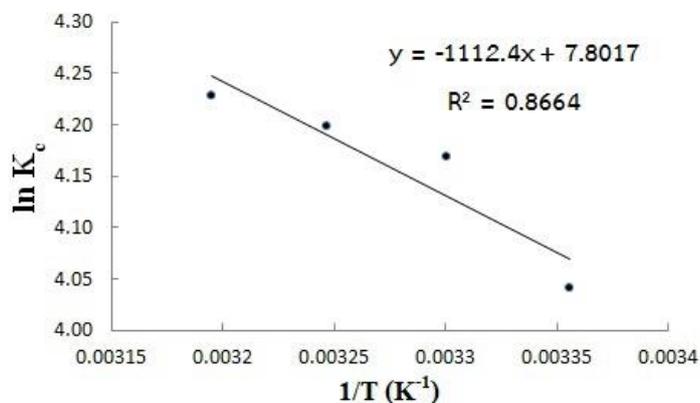
เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่า และค่า $q_{e,cal}$ ที่ใกล้เคียง $q_{e,exp}$ มากกว่า พบว่า จลนพลศาสตร์การดูดซับสี่ RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ (ตารางที่ 3) อธิบายด้วย pseudo second order ได้ดีกว่า pseudo first order แสดงว่าขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ (rate limiting step) ของการดูดซับสี่ เกิดจากกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption) (Kumar et al. 2011)

ตารางที่ 3 Adsorption kinetic parameters สำหรับการดูดซับสี่ RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มก./ล.)	$q_{e,exp}$ (มก./ก.)	pseudo first order			pseudo second order		
		$q_{e,cal}$ (มก./ก.)	k_1 (1/นาที)	R^2	$q_{e,cal}$ (มก./ก.)	k_2 (ก./มก.× นาที)	R^2
5	3.88	0.05	0.0037	0.4779	3.90	0.3166	0.9993
15	13.48	1.05	0.0094	0.9321	13.53	0.0300	1.0000
25	21.69	1.82	0.0131	0.9856	21.88	0.0196	1.0000
50	44.40	9.53	0.0090	0.9787	44.84	0.0032	0.9998
75	55.11	9.24	0.0048	0.9591	54.64	0.0027	0.9997
100	64.84	12.36	0.0023	0.5879	60.24	0.0026	0.9996

11. เทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ (Adsorption Thermodynamics)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบแสดงดังรูปที่ 8 ($R^2 = 0.8664$) และเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบสรุปดังตารางที่ 4 ซึ่งพบว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) มีค่าเป็นลบ ทุกอุณหภูมิที่ทดสอบ แสดงว่าปฏิกิริยาการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เอง ค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy (ΔH°) มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) และค่าการเปลี่ยนแปลง entropy (ΔS°) มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับที่ระหว่างหน้า (interface) ของผงตัวดูดซับ/สารละลายสี เกิดขึ้นแบบสุ่ม (Setiabudi et al. 2016)



รูปที่ 8 กราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

ตารางที่ 4 Adsorption thermodynamic parameters สำหรับการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ

Temperature °ซ. (องศาเซลเซียส)	ΔH° (กิโลจูล/โมล)	ΔS° (จูล/โมล องศาเซลเซียส)	ΔG° (กิโลจูล/โมล)
25 (298.15)			-10.0107
30 (303.15)	9.2485	64.8633	-10.5022
35 (308.15)			-10.7521
40 (313.15)			-11.0032

สรุปผล

ผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ (ระยะ 2) เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 จาก น้ำเสียสังเคราะห์ โดยประสิทธิภาพที่ดีที่สุด คือ 98.54% ภายใต้สภาวะการทดลอง ที่ pH 2 เวลาสมดุล 12 ชม. ความเข้มข้นสีเริ่มต้นที่ 25 มก./ล. ปริมาณตัวดูดซับ 1 ก./ล. ขนาดตัวดูดซับ >0.150-0.212 มม. ที่ 30°C., 150 รอบ/นาที อีกทั้งพบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับ Langmuir isotherms ($R^2 = 0.9920$) ส่วนจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ pseudo second order ($R^2 = >0.9993$) และเทอร์โมไดนามิกส์การดูดซับ แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน แบบสุ่ม ที่เกิดขึ้นได้เอง

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลอง พบว่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบ คือ pH 2 แต่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 กำหนดว่า น้ำทิ้งจากโรงงานที่จะระบายออก ต้องมีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) ตั้งแต่ 5.5 ถึง 9.0 ดังนั้นน้ำที่ผ่านการดูดซับสี RR31 ด้วยผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบต้องปรับ pH ของน้ำเสียให้อยู่ในช่วง 5.5 ถึง 9.0 ตามที่กำหนดถึงจะระบายทิ้งออกนอกโรงงานได้ อย่างไรก็ตาม หากสามารถนำน้ำทิ้งจากขั้นตอนอื่นที่มี pH สูงกว่า pH 2 มาช่วยในการปรับ pH ก็อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้ เช่น น้ำทิ้งจากขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน หรือ น้ำทิ้งจากขั้นตอนการฟอกขาว ในกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย ซึ่งน้ำทิ้งจากทั้งสองขั้นตอนนี้มีสภาพต่างสูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542) นอกจากนี้การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองแบบที่ละเท อย่างไรก็ตาม สำหรับการนำไปใช้จริง ควรบรรจุผงเปลือกกล้วยหอมทองดิบใน column แล้วปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสี RR31 ผ่าน column เพื่อให้เกิดการดูดซับ ซึ่งน่าจะสะดวกในการใช้มากกว่าการใช้แบบที่ละเทที่ทดสอบในการวิจัยครั้งนี้ แต่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการทดลองแบบ column experiment ด้วย เพื่อให้สามารถประยุกต์ผลการทดลองได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมยิ่งขึ้นในสภาพการใช้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์จากเงินงบประมาณแผ่นดิน (หมวดเงินอุดหนุนทั่วไป) ประจำปีงบประมาณ 2560 ครั้งที่ 2 และภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2540). **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน.** เข้าถึงเมื่อ 7 กรกฎาคม. เข้าถึงได้จาก http://www2.diw.go.th/research/Law_Env_Standard/Water/2-2539.pdf

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). **ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560.** เข้าถึงเมื่อ 7 กรกฎาคม. เข้าถึงได้จาก <http://www.diw.go.th/hawk/news/ประกาศ%20ก.น้ำทิ้ง.PDF>

กรมโรงงานอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. (2542). **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงาน** **พอกย้อม.** กรุงเทพฯ ฯ สถาบันเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม.

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2547). **ผลิตภัณฑ์กล้วย.** เข้าถึงเมื่อ 7 กรกฎาคม. เข้าถึงได้จาก <http://agri-media.agritech.doae.go.th/book/book-praeroob/fd050.pdf>

เสริม จันทร์ฉาย และ บุศราภรณ์ มหาโยธี. (2559). “การพัฒนาการผลิตกล้วยตากในชุมชนกล้วยตากอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก.” **Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University** 3, (6): 310-322.

ภาษาต่างประเทศ

Abdel-Khalek, M. A., M. K. Abdel Rahman, and A. A. Francis. (2017). “Exploring the adsorption behavior of cationic and anionic dyes on industrial waste shells of egg.” **Journal of Environmental Chemical Engineering** 5: 319-327.

American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. (1985). “508 B. Closed Reflux, Titrimetric Method.” In **Standard methods, for the examination of water and wastewater.** 16th Edition. Edited by M.A.H. Franson. Washington DC: APHA, AWWA and WPCF.

Baek, Mi-Hwa, Christianah Olakitan Ijabemi, Se-Jin O, and Dong-Su Kim. (2010). “Removal of malachite green from aqueous solution using degreased coffee bean.” **Journal of Hazardous Material** 176: 820-828.

Chakravarty, Poulomi, Kuldeep Baudh, and Manoj Kumar. (2015). Chapter 8: Remediation of dyes from aquatic ecosystem by biosorption method using algae. In **Algae and environmental sustainability, Series Volume 7 in Developments in applied phycology,** page 98. Edited by Bhaskar Singh, Kuldeep Baudh and Frizal Bux. New Dehli: Springer India.

- Chowdhury Shamik, Rahul Mishra, Papita Saha, and Praveen Kushwaha. (2011). “Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk.” **Desalination** 265: 159-168.
- Dada, A. O., A. P. Olalekan, A. M. Olatunya, and O. Dada. (2012). “Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich Isotherms studies of equilibrium sorption of Zn²⁺ unto phosphoric acid modified rice husk”. **IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)** 3, (1): 38-45.
- Devi, Parmila, and Ani K. Saroha. (2017). “Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: A review.” **Science of the Total Environment** 578: 16-33.
- Emaga, Thomas Happi, Rado Herinavalona Andrianaivo, Bernard Wathelet, Jean Tchango Tchango, and Michel Paquot. (2007). “Effects of the stage of maturation and varieties on the chemical composition of banana and plantain peels.” **Food Chemistry** 103: 590-600.
- Fernandez, Maria Emilia, Gisel Vanesa Numell, Pablo Ricardo Bonelli, and Anna Lea Cukierman. (2014). “Activated carbon developed from orange peels: Batch and dynamic competitive adsorption of basic dyes.” **Industrial Crops and Products** 62: 437-445.
- Ferreira, Ana M., João A. P. Coutinho, Ana M. Fernandes, and Mara G. Freire. (2014). “Complete removal of textile dyes from aqueous media using ionic-liquid-based aqueous two-phase systems.” **Separation and Purification Technology** 128: 8-66.
- Hazzaa, R., and M. Hussien. (2015). “Adsorption of cationic basic dye from aqueous solution onto activated carbon derived from banana peel.” In **Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology**, CEST2015_00031. Rhodes, Greece, September 3-5, 2015. Rhodes: Global Network of Environmental Science and Technology.
- Ho, Y. S., and G. Mckay. (2000). “The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat.” **Water Resource Journal** 34 (3): 735-742.
- Ho, Yuh-Shan. (2004). “Citation review of Lagergren kinetic rate equation on adsorption reactions.” **Scientometrics** 59 (1): 171-177.

- Krishna, R. Hema, and A. V. V. S. Swamy. (2012). "Physico-chemical key parameters, Langmuir and Freundlich isotherm and Lagergren rate constant studies on the removal of divalent nickel from the aqueous solutions onto powder of calcined brick." **International Journal of Engineering Research and Development** 4 (1): 29-38.
- Kumar, P. Senthil, R. V. Abhinaya, K. Fayathri Lashmi, V. Arthi, R. Pavithra, V. Ssthyaselvabala, S. Dinesh Kirupha, and S. Sivanesan. (2011). "Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by agricultural waste: Equilibrium, thermodynamics, kinetics, mechanism and process design." **Colloid Journal** 73 (5): 651-661.
- Mohammed, Rafie Rushdy, and Mei Fong Chong. (2014). "Treatment and decolorization of biologically treated palm oil mill effluent (POME) using banana peel as novel biosorbent." **Journal of Environmental Management** 132: 237-249.
- Mohapatra, Debabandya, Sabyasachi Mishra, and Namrata Sutar. (2010). "Banana and its by-product utilisation: an overview." **Journal of Scientific & Industrial Research** 69: 323-329.
- Moubarak, Faisal, Rachid Atmani, Ibtissam Maghri, M'hamed Elkouali, Mohammed Talbi, Mona Latifa Bouamrani, Mohammed Salouhi, and Abdelkbir Kenz. (2014). "Elimination of methylene blue dye with natural adsorbent (banana peels powder)." **Global Journal of Science Frontier Research: B Chemistry** 14 (1): 38-44.
- Palma, Carolyn, Elsa Contreras, Johana Urra, María Jesús Martínez. (2011). "Eco-friendly technologies based on banana peel use for the decolourization of the dyeing process wastewater". **Waste Biomass Valor** 2: 77-86.
- Qiu, Hui, Lu L.V., Bing-cai Pan, Qing-jian Zhang, Wei-ming Zhang, and Quan-xing Zhang. (2009). "Critical review in adsorption kinetic models." **Journal of Zhejiang University Science A** 10 (5): 716-724.
- Saechiam, Suphakit, and Guntharee Sripongpun. (2019). "Adsorption of malachite green from synthetic wastewater by using banana peel adsorbents". **Songklanakrin Journal of Science and Technology** 41 (4): (In press).
- Salleh, Mohamad Amran Mohd, Dalia Khalid Mahmoud, Wan Azlina Wan Abdul Karim, and Azni Idris. (2011). "Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review." **Desalination** 280: 1-13.
- Seow, Ta Wee, and Chi Kim Lim. (2016). "Removal of dye by adsorption: A review." **International Journal of Applied Engineering Research** 11 (4): 2675-2679.

- Setiabudi, H.D., R. Jusoh, S. F. R. M. Suhaimi, and S. F. Masrur. (2016). “Adsorption of methylene blue onto oil palm (*Elaeis guineensis*) leaves: Process optimization, isotherm, kinetics and thermodynamic studies”. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** 63: 363-370.
- Sirilamduan, Chadrudee, Chakkrit Umpuch, and Pairat Kaewsarn. (2011). “Removal of copper from aqueous solutions by adsorption using modify *Zalacca edulis* peel modify.” **Songklanakrin Journal of Science and Technology** 33 (6): 725-732.
- Tapre, A.R., and R.K. Jain. (2012). “Study of advanced maturity stages of banana.” **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies** 1 (3): 272-274.
- Tartrakoon, Tinnagon, Nitima Chalearmsan, Therdehai Vearasilp, and Udo ter Meulen. (1999). “The Nutritive value of banana peel (*Musa sapieutum* L.) in growing pigs.” pp 1-4. In **Proceedings of the Deutscher Tropentag 1999, Session: Sustainable Technology Development in Animal Agriculture**, 1-4. Berlin, Germany, October 14-15, 1999, Berlin: Humboldt University of Berlin and ATSAF, Berlin, Germany.
- Valmayor, R. V., S.H. Jamaluddin, B. Silayoi, S. Kusumo, L.D. Danh, O. C. Pascua, and R. R. C. Espino. (2000). **Banana Cultivar Names and Synonyms in Southeast Asia**. Accessed July 6, 2017. Available from http://www.biodiversityinternational.org/uploads/tx_news/Banana_cultivar_names_and_synonyms_in_Southeast_Asia_713.pdf
- Yagub, Mustafa T, Tushar Kanti Sen, Sharmeen Afroze, and H. M. Ang. (2014). “Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review.” **Advances in Colloid and Interface Science** 209: 172-184.
- Yang, Yaning, Yuan Chun, Guangyan Sheng, and Minsheng Huang. (2004). “pH-dependence of pesticide adsorption by wheat-residue-derived black carbon.” **Langmuir** 20: 6736-6741.