

การดูดซับสีดีสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ปรับปรุง สภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

Adsorption of Disperse Dyes from Wastewater Using Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar

ฉัตรสุดา โกศัยกานนท์ (Chatsuda Kosaiyakanon)* ดร.สุรัสวดี กิ่งสนั่น (Dr.Suratsawadee Kungsanan)^{1**}

(Received: May 17, 2019; Revised: July 16, 2019; Accepted: July 25, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาการดูดซับสีดีสเพิร์สออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับถ่านชีวภาพจากเปลือกเมล็ดกาแฟ โดยการนำเปลือกเมล็ดกาแฟมาเผา ณ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นนำถ่านดังกล่าวมาปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Cetyltrimethylammonium bromide ได้เป็นถ่าน Modified coffee husk biochar (MCH) เพื่อนำมาใช้ในการดูดซับสีดีสเพิร์สออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ สีเหลือง Disperse yellow 3 (DDY3) สีแดง Disperse red 60 (DDR60) และสีน้ำเงิน Disperse blue 56 (DDB56) ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 (ร้อยละ 79.5) มีค่ามากกว่าสีแดง DDR60 (ร้อยละ 23.2) และสีน้ำเงิน DDB56 (ร้อยละ 9.7) ตามลำดับ โดยการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและไอโซเทอมการดูดซับของฟรันทริช ส่วนการดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และถ่าน MCH มีประสิทธิภาพในการดูดซับเทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ABSTRACT

A solid agricultural waste, coffee husk, was applied as an adsorbent for disperse dye-polluted wastewater treatment. The coffee husk was pyrolyzed at 450°C and then chemically activated using 50 %wt ZnCl₂ solution. The biochar was subsequently activated at 500°C under N₂ blanket. The activated coffee husk biochar was then modified using a cationic surfactant, Cetyltrimethylammonium bromide. The modified coffee husk biochar (MCH) was applied for disperse dyes removal from synthetic wastewater. The selected disperse dyes were disperse yellow 3 (DDY3), disperse red 60 (DDR60), and disperse blue 56 (DDB56), respectively. The removal efficiency of DDY3 (79.5 %) was the highest, followed by DDR6 (23.2 %), and DDB56 (9.7 %), respectively. For DDY3 and DDB56, the adsorption kinetics was fit well by a pseudo-first order model and the adsorption isotherms matched well the Freundlich model. Besides, the adsorption kinetics of DDR60 was fit well by a pseudo-second order model and the adsorption isotherms matched well the Langmuir model. Additionally, the variation of pH in synthetic wastewater provided no effect on disperse dyes removal efficiency. Moreover, the disperse dye removal efficiency using MCH was similar to those of using activated carbon.

คำสำคัญ: การดูดซับ สีดีสเพิร์ส ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ

Keywords: Adsorption, Disperse dyes, Coffee husk biochar

¹Corresponding author: suratsawadee.k@psu.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อมจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมากในกระบวนการ หลังจากดำเนินการเสร็จสิ้นน้ำเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการอาจมีการปนเปื้อนของสีย้อมตลอดจนสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ได้ ซึ่งสีย้อมที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสีย้อมชนิดประจุลบ อาทิ สีแอซิด (Acid dyes) สีไดเรกต์ (Direct dyes) และสีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นต้น กลุ่มสีย้อมชนิดประจุบวก อาทิ สีเบสิก (Basic dyes) และกลุ่มสีย้อมชนิดไม่มีประจุ อาทิ สีดีสเพิร์ส (Dispersed dyes) ซึ่งสีเหล่านี้อาจมีการปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม และจำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยเฉพาะสีดีสเพิร์ส ซึ่งเป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมคิดเป็นร้อยละ 18 ของอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้งหมด [1] มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกและพันธะอะโซ (-N=N-) ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้น้อยและมักแขวนลอยเป็นอนุภาคขนาดเล็กในน้ำ ทำให้สีดีสเพิร์สสามารถปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้งได้มากถึงร้อยละ 20 และมีพีเอช (pH) ของน้ำทิ้งสูงถึง 9 [2] การจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมอาจส่งผลกระทบต่อชุมชน แหล่งน้ำและระบบนิเวศน์บริเวณใกล้โรงงาน ก่อให้เกิดผลเสียทั้งทางด้านสุขภาพ สังคม และเศรษฐกิจได้ จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีย้อมเหล่านี้ออกจากน้ำเสียของโรงงานก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งวิธีการอาจทำได้หลายวิธี อาทิ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment) การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone treatment) และการกรองด้วยเมมเบรน (Membrane process) เป็นต้น [3] แต่กระบวนการเหล่านี้พบว่าไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดในการบำบัดเพียงครั้งเดียว และเป็นการบำบัดที่ใช้ต้นทุนสูง

ปัจจุบันกระบวนการดูดซับนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวก ให้ประสิทธิภาพสูง และใช้ต้นทุนในการบำบัดต่ำกว่าแบบอื่นที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สารดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) แต่ในการนำมาใช้งานยังมีข้อจำกัด เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และยังมีการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว ฟางข้าว หรือถ่านจากการเผาชีวมวลมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อทดแทนถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะการนำชีวมวลมาผ่านการเผาเพื่อให้ได้เป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมสำหรับการเป็นตัวดูดซับ คือ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง ทำให้ถ่านชีวภาพเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารพิษ ไอออนโลหะหนัก หรือสีย้อมได้ดี [4] โดยมีหลายงานวิจัยได้ศึกษาและพบว่าถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อาทิ เมล็ดปาล์ม ลำไย ไม้ไผ่ ต้นอ้อย สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้ในการดูดซับสีดีสเพิร์สชนิดสีแดงหรือน้ำเงินได้อย่างมีประสิทธิภาพและเทียบเท่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าได้ [5-7] จึงนับเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียที่น่าสนใจเนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงและเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรได้อีกช่องทางหนึ่งด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจนำถ่านชีวภาพจากเปลือกเมล็ดกาแฟมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีดีสเพิร์สออกจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม เนื่องจากในประเทศไทยมีการปลูกกาแฟเป็นจำนวนมากถึง 30,000 ต้นต่อปี [8] โดยเฉพาะภาคใต้ของไทยปลูกมากถึงร้อยละ 98 ของกาแฟที่ปลูกภายในประเทศ ทำให้เกิดเปลือกกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก [9] รวมทั้งองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดกาแฟ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงถึงร้อยละ 40 และปริมาณเถ้าต่ำถึงร้อยละ 1.5 ทำให้เปลือกเมล็ดกาแฟมีความน่าสนใจที่จะนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับได้ [10]

นอกจากนี้งานวิจัยก่อนหน้านี้ของคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการดูดซับสีรีแอคทีฟออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟได้มากขึ้นถึงร้อยละ 60 และให้

ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า [11] ทั้งนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนหัวซึ่งแสดงอำนาจประจุบวกและส่วนหางซึ่งแสดงสภาพไม่มีขั้ว ทำให้เมื่อดูดซับบนพื้นผิวถ่านแล้วสามารถดัดแปลงสภาพพื้นผิวให้แสดงอำนาจประจุบวกและดูดซับสีประจุลบได้ดี วิธีการนั้นนอกจากให้ประสิทธิภาพสูงแล้วยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วยเนื่องจากถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟและสารลดแรงตึงผิวสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ [1, 12]

จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB มีความน่าสนใจในการนำมาศึกษาการดูดซับสีย้อมสี เนื่องจากเป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมและอาจปนเปื้อนออกมาพร้อมกับสีกลุ่มรีแอคทีฟในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเปลือกเมล็ดกาแฟมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพและปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB เพื่อใช้ในการดูดซับสีย้อมสีที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกัน ได้แก่ สีเหลือง Disperse yellow 3 (DDY3) สีแดง Disperse red 60 (DDR60) และสีน้ำเงิน Disperse blue 56 (DDB56) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ พร้อมทำการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟทั้งก่อนและหลังปรับปรุงสภาพ ตลอดจนศึกษาจลนพลศาสตร์และอธิบายกลไกการดูดซับด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ อีกทั้งศึกษาผลของค่าพีเอช ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

วิธีการวิจัย

1. วัสดุและสารเคมี

1.1 เปลือกเมล็ดกาแฟ ได้จากกาแฟพันธุ์โรบัสต้า (Robusta coffee) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มกาแฟบ้านถ้ำสิงห์ จังหวัดชุมพร นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตตัวดูดซับ ดำเนินการโดยการนำเปลือกเมล็ดกาแฟมาผึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นนำไปเผา ณ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของแก๊ส 0.25 ลิตรต่อนาที ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ (Coffee husk biochar, CH) ที่ได้จะถูกนำมาลดขนาด และร่อนด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ถ่านที่มีขนาดในช่วง 0.60 - 1.41 มิลลิเมตร [13]

1.2 ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Activated carbon, AC) เป็นถ่านที่ผลิตจากกะลามะพร้าว เพื่อใช้ในการกรองน้ำซื้อจากบริษัท ซี ไอ แอนด์ คาร์บอน จำกัด

1.3 ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride, $ZnCl_2$) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 ซื้อจากบริษัท Ajax Finechem

1.4 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 35.4 ซื้อจากบริษัท LOBA Chemie

1.5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ซื้อจากบริษัท Univar

1.6 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 100 ซื้อจากบริษัท Ajax Finechem มีสมบัติแสดงดังตารางที่ 1 [14]

1.7 สีย้อมสี ได้แก่ สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมผ้าได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคพีที คอร์ปอเรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด โดยมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 1 [15-17]

2. การเตรียมตัวดูดซับ

นำถ่าน CH ไปกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ณ อัตราส่วนถ่านต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยแช่ถ่านในสารละลาย $ZnCl_2$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำถ่านไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

ณ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 0.25 ลิตรต่อนาที [18] ถ่านที่ได้จากการเผากระตุ้นจะถูกนำมาล้างจนฟิเอชน้ำล้างเป็นกลาง จากนั้นนำถ่านมาระเหยน้ำออกที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการกระตุ้น (Activated coffee husk biochar, ACH)

3. การปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟผ่านการกระตุ้นด้วยสารลดแรงตึงผิว

การทดลองดัดแปลงจากวิธีการของ Zhao และคณะ [19] และปรับสภาพให้เหมาะสมกับถ่าน ACH โดยการนำถ่าน ACH ปริมาณ 10 กรัม ผสมกับสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) 7.5 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างมารอง และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จึงได้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (Modified coffee husk biochar, MCH)

เมื่อเสร็จสิ้นการเตรียมตัวดูดซับจะมีการสุ่มตัวอย่างถ่าน CH, ACH, และ MCH ไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (BET) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกายภาพของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟก่อนและหลังการทำการกระตุ้น ตลอดจนเปรียบเทียบกับถ่าน AC ซึ่งมีขนาดเดียวกัน

4. การดูดซับสีติดเพิร์ส

การทดลองทำโดยนำถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม มาผสมกับสารละลายสีติดเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 หรือสีน้ำเงิน DDB56) ที่ C_0 10-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดตัวอย่างขนาด 150 มิลลิลิตร โดยเตรียมขวดตัวอย่างแยกสำหรับการวิเคราะห์แต่ละเวลา เพื่อเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวสำหรับช่วงเวลาหนึ่ง อันเป็นการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหลวจากการเก็บตัวอย่าง จากนั้นนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บตัวอย่างของเหลวในขวดไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสีในสารละลายทุกๆ 10 นาที โดยนำของเหลวมากรองแยกถ่านออก แล้วนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีติดเพิร์สคงเหลือในสารละลายด้วย เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-Vis) ยี่ห้อ Agilent รุ่น HP 8453 โดยมีค่าความยาวคลื่นของสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 คือ 350 590 และ 555 นาโนเมตร ตามลำดับ [20] ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำไปประเมินค่าจลนพลศาสตร์และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ นอกจากนี้การศึกษากการเปลี่ยนแปลงค่าฟิเอชของสารละลายและการดูดซับสีติดเพิร์สด้วยถ่าน AC มีการดำเนินการเช่นเดียวกันกับการทดลองนี้ โดยในการศึกษาค่าฟิเอช มีการปรับค่าฟิเอชสารละลายเป็น 3 6 และ 9 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร [21]

5. การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับ

5.1 ปริมาณการดูดซับบนผิวของแข็ง อันแสดงถึงปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$q = \frac{C_0 - C_t}{m} V \quad (\text{สมการที่ 1})$$

เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม) C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวถูกดูดซับ ณ เวลาเริ่มต้น (มิลลิโมลต่อลิตร) C_t คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อลิตร) m คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม) และ V คือ ปริมาตรสารละลายตัวถูกดูดซับ (ลิตร)

5.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ ประเมินได้จากการคำนวณร้อยละการดูดซับซึ่งแสดงดังสมการที่ 2

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2})$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นที่เริ่มต้นก่อนการดูดซับ (มิลลิโมลต่อลิตร) และ C_e คือ ความเข้มข้นที่ ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ (มิลลิโมลต่อลิตร)

5.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics) เป็นการแสดงอัตราเร็วในการดูดซับสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยสมการคณิตศาสตร์ โดยแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) แสดงดังสมการที่ 3 อันเป็นการดูดซับแบบกายภาพ ปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับสามารถผันกลับได้ [22-23] และแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second order) เป็นการดูดซับการดูดซับทางเคมี ปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ และการดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว [21, 23] แสดงดังสมการที่ 4

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (\text{สมการที่ 3})$$

$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (\text{สมการที่ 4})$$

โดย q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม) q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม) k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที⁻¹) k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิโมล-นาที) และ t คือ เวลาใดๆ (นาที)

5.4 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) แสดงให้เห็นถึงขอบเขตของการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับในเชิงปริมาณ โดยแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้อธิบายกลไกการดูดซับสำหรับระบบของแข็งและของเหลว ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm model) ซึ่งอธิบายการดูดซับของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) [22] แสดงดังสมการที่ 5 และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช (Freundlich isotherm model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อธิบายการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) [22] นิยมใช้กับการดูดซับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ [24] แสดงดังสมการที่ 6

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (\text{สมการที่ 5})$$

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{สมการที่ 6})$$

โดย q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม) C_e คือ ความเข้มข้นสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อลิตร) $q_{\max}$ คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้สูงสุด (มิลลิโมลต่อกรัม) k_L คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิโมล) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความแข็งแรงในการดูดซับ โดยหากมีค่ามากแสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับมาก n คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดริช เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานพันธะ

หรือความแข็งแรงในการดูดซับ และ k_f คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรอนดริช (มิลลิโมลต่อกรัม (ลิตรต่อมิลลิโมล)^{1/n}) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความจุในการดูดซับของตัวดูดซับ [25]

ผลการวิจัย

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตถ่าน ACH จากเปลือกเมล็ดกาแฟแห้งได้ร้อยละ 25 โดยตัวดูดซับถ่าน CH ถ่าน ACH ถ่าน MCH และถ่าน AC ได้ถูกสุ่มตัวอย่างและนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และ BET แสดงดังภาพที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ โดยภาพที่ 1 จากเทคนิค SEM แสดงให้เห็นว่าถ่าน ACH (ภาพที่ 1 (ข)) ที่ผ่านการกระตุ้นแล้วมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าถ่าน CH (ภาพที่ 1 (ก)) อันเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และมีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับถ่าน MCH (ภาพที่ 1 (ค)) ซึ่งการปรับปรุงสภาพผิวถ่าน ACH ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวและรูพรุนของถ่านมากนัก และถ่านทั้งสองชนิดยังมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าถ่าน AC (ภาพที่ 1 (ง)) นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค BET จากตารางที่ 2 ยังแสดงให้เห็นว่าถ่าน CH มีพื้นที่ผิวจำเพาะผิวน้อย แทบจะไม่เกิดเป็นรูพรุน หรืออาจมีรูพรุนที่เป็นช่องขนาดใหญ่และตัน แต่เมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วจะได้ถ่าน ACH ที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กลงและมีความลึกมากขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้น อันเป็นผลมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ออกจากรูพรุนโดยการกระตุ้นเชิงเคมีด้วย $ZnCl_2$ นอกจากนี้การปรับปรุงสภาพผิวถ่าน ACH ด้วย CTAB ส่งผลให้รูพรุนของ MCH มีขนาดเฉลี่ยใหญ่ขึ้นและพื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการกำจัดสารอินทรีย์ที่ตกค้างในรูพรุนด้วยสารลดแรงตึงผิว CTAB ในระหว่างกระบวนการปรับปรุงสภาพถ่าน และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน AC พบว่าถ่าน MCH มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าถ่าน AC แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่าน MCH มีค่าใกล้เคียงกับช่วง 600 - 900 ตารางเมตรต่อกรัม [6, 26] ซึ่งเป็นช่วงที่มีการรายงานว่ามีความเหมาะสมและมีแนวโน้มที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นตัวดูดซับชีวภาพเพื่อทดแทนถ่าน AC ได้ อาทิ การศึกษาการดูดซับสีย้อมฟิสิกส์สีแดง (Disperse red 167) โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากลำไ้ไม้ไฟที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าถ่านที่ใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 747 ตารางเมตรต่อกรัม [6] หรือการศึกษาการดูดซับสีย้อมฟิสิกส์สีส้ม (Disperse orange 25) โดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก *Euphorbia rigida* พบว่าถ่านมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 741.21 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นต้น [26]

2. ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเปรียบเทียบตัวดูดซับระหว่างถ่าน ACH ถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะการทดลอง C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2 พบว่า ถ่าน ACH สามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้ร้อยละ 86.3 ถ่าน MCH ดูดซับได้ร้อยละ 79.5 และถ่าน AC ดูดซับได้ร้อยละ 85.6 ทั้งนี้การดูดซับสีเหลือง DDY3 ซึ่งเป็นสีกลุ่มไม่มีขั้ว มีอิทธิพลหลักมาจากแรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลสีเหลือง DDY3 และพื้นผิวถ่านซึ่งเป็นอันตรกิริยาแบบไม่มีขั้ว จึงทำให้การดูดซับด้วยถ่าน ACH และถ่าน AC มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่าน MCH ประมาณร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ดูดซับบนพื้นผิวถ่าน MCH ด้วยส่วนหางและหันส่วนหัวที่มีประจุบวกออกสู่ภายนอก ทำให้พื้นผิวถ่าน MCH แสดงอำนาจประจุบวก [27] ซึ่งอาจขัดขวางการแพร่ของโมเลกุลสีเหลือง DDY3 เข้าดูดซับบนพื้นผิวของถ่าน MCH ที่เป็นบริเวณไม่มีขั้วได้

อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพถ่าน MCH เป็นไปอย่างเล็กน้อยและมีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกับถ่าน AC แม้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวยังส่งเสริมให้เกิดการเปียกผิวบนตัวดูดซับได้ดี [1, 12] ประกอบกับผลการศึกษาเบื้องต้นในการใช้ถ่าน MCH เพื่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ พบว่าให้ประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 80 คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรนำถ่าน MCH ไปใช้ในการศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สชนิดอื่นต่อไป เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมที่มีความหลากหลายได้ในคราวเดียวกัน

3. ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีดิสเพิร์ส

ถ่าน MCH ถูกนำมาศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สสามชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งทั้งสามชนิดเป็นแม่สีที่นิยมใช้ในโรงงานฟอกย้อม มีขนาดและโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน (แสดงดังตารางที่ 1) ได้แก่ สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน MCH 1 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 36 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับสีแต่ละชนิดบนถ่าน MCH เพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ด้วยถ่าน MCH เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสีเหลือง DDY3 สามารถดูดซับบนถ่าน MCH ได้สูงสุด รองลงมาคือสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 หรือคิดเป็นร้อยละการดูดซับ 79.5 23.2 และ 9.7 ตามลำดับ จากการทดลองสีเหลือง DDY3 มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ (ขนาดโมเลกุลประเมินได้จากมวลโมเลกุลแสดงดังตารางที่ 1) ทำให้สามารถเข้าดูดซับบนพื้นผิวและแพร่ผ่านรูพรุนของถ่าน MCH ได้ดี เกิดการดูดซับได้มากและเข้าสู่สมดุลช้ากว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 [28] นอกจากนี้โมเลกุลสีน้ำเงิน DDB56 และสีแดง DDR60 ยังมีโครงสร้างที่มีองค์ประกอบของวงแหวนเบนซีนหรือวงปิดมากกว่าสีเหลือง DDY3 [15-17] ซึ่งส่งผลให้โมเลกุลมีสภาพไม่มีขั้วมากกว่า เกิดการแพร่เข้าดูดซับบนพื้นผิวของถ่าน MCH ซึ่งมีสภาพเป็นประจุบวกได้ยาก ทำให้เกิดการดูดซับได้น้อยกว่าสีเหลือง DDY3 ก่อนข้างมาก

4. ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส

ผลจากการศึกษาเวลาในการดูดซับนำมาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง แสดงดังตารางที่ 3 โดยเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 สอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง แต่เมื่อพิจารณาค่า q_c จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า (แสดงดังภาพที่ 3) ดังนั้นจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 สอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง อันแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบกายภาพ ส่วนสีน้ำเงิน DDB56 สอดคล้องกับแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งเช่นกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพและเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ [23] สำหรับการดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ [23] และเมื่อพิจารณาค่า q_c ของสีดิสเพิร์สบนผิวถ่าน MCH ของแต่ละแบบจำลองพบว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 มีค่ามากกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า q ของสีดิสเพิร์สบนผิวถ่าน MCH ที่ได้จากการทดลอง (แสดงดังภาพที่ 3) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดและสภาพขั้วของโมเลกุลสีส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเป็นอย่างมาก โดยหากโมเลกุลมีขนาดเล็กจะเกิดการดูดซับได้ดี และหากมีสภาพไม่มีขั้วมากจะเกิดการดูดซับได้ลดลง

นอกจากนี้ผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสีแดง DDR60 สอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับสีแดง Disperse red 167 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ [6] ซึ่งให้ผลการศึกษาสอดคล้องกันว่าการดูดซับ

เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ส่วนผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสีน้ำเงิน DDB56 มีความสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 56 โดยใช้ซีลี้อย [29] ซึ่งเป็นแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีเหลือง DDY3 ยังไม่พบงานวิจัยที่สอดคล้องมากนัก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษา ณ ความเข้มข้นต่ำ (<100 มิลลิกรัมต่อลิตร) และพบว่ามีความแปรปรวนในการกระจายตัวของสปีดสเฟียในการทดลอง ซึ่งทำให้พฤติกรรมการดูดซับของสปีดสเฟียก่อนข้างมีความจำเพาะในแต่ละระบบที่มีการศึกษาและความคมที่แตกต่างกัน [30-31]

5. ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสปีดสเฟีย

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับดำเนินการ ณ สภาวะสมดุล ค่า C_0 ของสปีดสเฟีย 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วยรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ผลการศึกษาได้นำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4 โดยเมื่อพิจารณาค่า R^2 พบว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช อันแสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และการดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงถึงการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว [22] โดยค่า q_{max} จากการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH มีค่าใกล้เคียงกับค่า q_c จากการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH ที่ได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองอีกด้วย (ค่า q_c ของการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH คือ 0.0158 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน)

ผลการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีน้ำเงิน DDB56 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา อาทิ การศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ซีลี้อย ซีลี้อยพอลิเมอร์ และถ่านจากซีลี้อย [32] หรือศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 79 โดยใช้ซีลี้อยผสมกับดิน [33] ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช นอกจากนี้ผลการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีแดง DDR60 สอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีแดง Disperse red โดยใช้ซีลี้อย [29] ซึ่งให้ผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ส่วนสีเหลือง DDY3 ไม่พบงานวิจัยที่สอดคล้อง แต่อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยบางรายงานพบว่าสปีดสเฟียสีเหลือง Yellow 211 มีการดูดซับบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์จากเปลือกเชอร์รี่ตรงกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ แต่เป็นการศึกษา ณ ความเข้มข้นสีในช่วงต่ำกว่างานวิจัยนี้ คือช่วง 15-50 มิลลิกรัมต่อลิตร [31]

6. ผลการศึกษาพีเอชในการดูดซับสปีดสเฟีย

การทดลองใช้สีเหลือง DDY3 เป็นตัวแทนการศึกษาการดูดซับสปีดสเฟียด้วยถ่าน MCH ดำเนินการทดลองโดยการนำสารละลายสีเหลือง DDY3 ที่ปรับค่าพีเอช เป็น 3 และ 6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และปรับค่าพีเอชเป็น 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร การดูดซับใช้ถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม ศึกษา ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาที่ความเร็วยรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4 พบว่าการเพิ่มค่าพีเอชในช่วง 3 ถึง 9 ซึ่งเป็นช่วงค่าพีเอชของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม [2] ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH เนื่องจากการเพิ่มพีเอชในสารละลายด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ทำให้หมู่ไฮโดรอกซิล (OH^-) แพร่ในสารละลาย และการลดพีเอชในสารละลายด้วยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) แพร่ในสารละลาย แต่การแพร่ของหมู่ OH^- หรือ H^+ ในสารละลายสีย้อมไม่ได้มีปริมาณมากพอที่จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวของถ่าน จึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน

นอกจากนี้งานวิจัยการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายในช่วง 3 ถึง 9 ส่งผลต่อสภาพพื้นผิวของถ่านกัมมันต์และทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเปลี่ยนแปลงได้ อาทิ การดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 บนถ่านกัมมันต์จากเมล็ดปาล์ม [5] การดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 56 บนถ่านกัมมันต์จากต้นอ้อย [7] หรือการดูดซับสีแดง Disperse red 167 บนถ่านกัมมันต์จากถั่วไม่ไฟ [6] เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการดูดซับสีย้อมของ DDY3 หรือสีรีแอคทีฟ Yellow 145 ด้วยถ่าน MCH [11] อันแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีของถ่าน MCH ในการนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับสีย้อมออกจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมซึ่งมีความแปรปรวนของค่าพีเอชในน้ำทิ้งสูงได้

7. ผลการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน MCH และถ่าน AC

การทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม DDY3 ซึ่งเป็นสีที่มีขนาดเล็กสุด เพื่อประเมินการดูดซับทั้งพื้นผิวภายนอกและภายในรูพรุนของการดูดซับสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่าน MCH และถ่าน AC

7.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่านทั้งสองชนิดในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ถ่าน MCH และถ่าน AC โดยทำการทดลอง ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 5 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับของสีเหลือง DDY3 บนถ่านทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH และถ่าน AC เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 24 และ 21 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยถ่าน MCH สามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้ 159.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 79.5 ขณะที่ถ่าน AC สามารถดูดซับได้ 168.6 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 84.3 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่าน MCH แม้มีสภาพพื้นผิวแสดงอำนาจประจุบวกอ่อนเนื่องมาจากการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าถ่าน AC แต่สามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้ใกล้เคียงทั้งเวลาและประสิทธิภาพในการดูดซับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีขนาดรูพรุนที่กว้างกว่าถ่าน AC (แสดงดังตารางที่ 2) ซึ่งอาจมีส่วนช่วยให้การแพร่ของโมเลกุลสีเข้าสู่ดูดซับบนพื้นผิวหรือรูพรุนเทียบเท่ากับการดูดซับบนพื้นผิวถ่าน AC ได้ [5-7]

7.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3

จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3 โดยใช้ถ่าน MCH และถ่าน AC ได้นำผลการทดลองมาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่าน MCH และถ่าน AC ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง แสดงดังตารางที่ 5 โดยเมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ของการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 ในการนำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน AC เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง เหมือนกับการดูดซับของสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีเหลือง DDY3 บนถ่านทั้งสองชนิดมีลักษณะเดียวกัน คือ เป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ [23] โดยมีค่า q_c ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC มากกว่าถ่าน MCH และค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (k_1) ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC มากกว่าถ่าน MCH ตามลำดับ แสดงว่าถ่าน AC มีอัตราการดูดซับของสีเหลือง DDY3 ที่มากกว่าและรวดเร็วกว่าถ่าน MCH

7.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำโดยการนำถ่าน MCH และถ่าน AC มาดูดซับสีเหลือง DDY3 ณ สภาวะ C_0 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 และ 21 ชั่วโมง สำหรับถ่าน

MCH และถ่าน AC ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาได้นำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช แสดงดังตารางที่ 6 ซึ่งจากค่า R^2 พบว่าถ่านทั้งสองชนิดเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช แสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [22] นอกจากนี้ค่า k_f ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC มีค่ามากกว่าค่า k_f ของถ่าน MCH แสดงถึงความสามารถในการแพร่ของสีเข้าสู่ผิวถ่านได้ดีกว่า และค่า n ของการดูดซับสีด้วยถ่าน MCH มากกว่าถ่าน AC แสดงให้เห็นได้ว่าการปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ทำให้การดูดซับแข็งแรงขึ้น

จากการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH และถ่าน AC โดยภาพรวมจะเห็นได้ว่าการดูดซับด้วยถ่าน MCH มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่าน AC ทางการค้า นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสีดิสเพิร์สกับงานวิจัยต่างๆ ซึ่งเป็นศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้ง โดยแสดงการดูดซับด้วยค่า q_e ของสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 7 [5, 20, 32, 34] ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ดปาล์ม ให้ค่า q_e สูงสุด คือ 0.0273 มิลลิโมลต่อกรัม [5] และการดูดซับสีแดง Disperse red 156 ด้วยขี้เลื่อยพอลิเมอร์ การดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 ด้วยขี้เลื่อยและขี้เลื่อยพอลิเมอร์มีค่า q_e น้อยสุดเท่ากับ 0.0012 มิลลิโมลต่อกรัม [32] โดยในการทดลองนี้การดูดซับสีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) ด้วยถ่าน MCH พบว่ามีค่า q_e อยู่ในช่วง 0.0048 – 0.0544 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งอยู่ในช่วงค่า q_e เดียวกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นถ่าน MCH จึงนับเป็นตัวดูดซับซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีดิสเพิร์สออกจากน้ำเสียได้ และมีแนวโน้มเทียบเท่าถ่าน AC ได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ในการใช้ถ่าน MCH เพื่อดูดซับสีรีแอคทีฟ ทำให้เห็นได้ว่าถ่าน MCH มีแนวโน้มในการดูดซับโมเลกุลที่มีความหลากหลายออกจากร่างน้ำเสียได้ในคราวเดียวกัน อันเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอดถ่านจากเปลือกเมล็ดคาแฟเพื่อนำไปศึกษาการดูดซับสีย้อมที่มีประจุหรือมีขั้วชนิดอื่นที่มีความหลากหลายได้มากขึ้น แต่หากนำไปใช้ในการประยุกต์เพื่อดูดซับสีเพียงหนึ่งชนิดออกจากร่างน้ำเสีย การเลือกใช้ชนิดสารลดแรงดึงผิวให้เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการส่งเสริมให้เกิดประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านจากเปลือกเมล็ดคาแฟที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดประจุบวกสามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้มากกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับได้รับอิทธิพลจากขนาดและความไม่มีขั้วของโมเลกุลสี ซึ่งสีเหลือง DDY3 มีขนาดโมเลกุลเล็ก สามารถถูกดูดซับได้ทั้งผิวถ่านและภายในรูพรุน การดูดซับเป็นแรงกระทำแบบไม่มีขั้ว การปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงดึงผิวชนิดประจุบวก CTAB อาจส่งผลกระทบต่อการแพร่ของโมเลกุลสีที่มีความไม่มีขั้วมากเข้าสู่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของถ่านและส่วนหางของสารลดแรงดึงผิวซึ่งเป็นบริเวณไม่มีขั้วได้ (Like dissolves like) นอกจากนี้กลไกการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและมีกลไกการดูดซับตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช ขณะที่การดูดซับของสีแดง DDR60 มีกลไกการดูดซับตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและมีกลไกการดูดซับตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับสีดิสเพิร์สด้วยถ่าน MCH มีค่าใกล้เคียงกับถ่าน AC และการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 3 - 9 ณ อุณหภูมิห้อง ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ วิทยากรกลุ่มกาแฟบ้านถ้ำสิงห์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนและอนุเคราะห์เปลือกเมล็ดกาแฟ บริษัท เคพีที คอร์ปอเรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด ที่สนับสนุนและอนุเคราะห์สปีดเพิร์ส บัณฑิตวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ สนับสนุนการทำวิจัยและทุนสนับสนุนการศึกษาในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

1. Tehrani-bagha AR, Holmberg K. Solubilization of hydrophobic dyes in surfactant solutions. *Materials*. 2013; 6(2): 580-608.
2. Department of Industrial Works, Ministry of Industry. Wastewater management guidance manual from textile factories. Bangkok, Thailand: Department of Industrial Works, Ministry of Industry; 2013. Chula Unisearch, Chulalongkorn University. Thai.
3. Khaowin P. Decolorization of dyeing wastewater using regenerable catalyst [MSc thesis]. Songkhla: Prince of Songkla University; 2012. Thai.
4. Salleh MAM, Mahmoud DK, Karim WAWA, Idris A. Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*. 2011; 280(1-3): 1-13.
5. Halbus AF, Athab ZH, Hussein FH. Adsorption of disperse blue dye on Iraqi date palm seeds activated carbon. *International Journal of Chemical Science*. 2013; 11(3): 1219-1233.
6. Wang L. Application of activated carbon derived from 'waste' bamboo culms for the adsorption of azo disperse dye: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Management*. 2012; 102: 79-87.
7. El-Sayed GO, Moustafa ME, Mahrous MF. Removal of disperse 2BLN dye from industrial water onto activated carbon prepared from sugar cane stalks. *International Journal of ChemTech Research*. 2011; 3(3): 1604-1611.
8. Sirichai. Coffee [Internet]. 2018 [cited 2018 Nov 29]. Available from: <https://beanshere.com/posts/coffee-history-basic-brewing-roasting-กาแฟ-101/>.
9. Phuk-in A. The developed of horizontal roasted coffee machine. *The Golden Teak: Humanity and Social Science Journal*. 2011; 2: 1-11. Thai.
10. Gonçalves M, Guerreiro MC, Oliveira LCA, Solar C, Nazarro M, Sapag K. Micro mesoporous activated carbon from coffee husk as biomass waste for environmental applications. *Waste and Biomass Valorization*. 2013; 4(2): 395-400.
11. Kosaiyakanon C, Kungsanant S. Adsorption of reactive dyes from wastewater using cationic surfactant-modified coffee husk biochar. *Environment and Natural Resources Journal*. Forthcoming 2020.
12. Holmberg K, Jonsson B, Kronberg B, Lindman B. Surfactant and polymers in aqueous solution. 2nd ed.; Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.; 2003.

13. Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*. 2014; 99: 19-23.
14. National Center for Biotechnology Information (NCBI). PubChem Compound Database; CID=5974 [Internet]. 2004 [cited 2018 Jul 30]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5974>.
15. Sigma-aldrich. Disperse yellow 3 [Internet]. 2018 [cited 2018 Jul 9]. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/215686?lang=en®ion=TH>.
16. Sigma-aldrich. Disperse red 60 (Samaron pink fbl) [Internet]. 2018 [cited 2018 Jul 9]. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/s477648?lang=en®ion=TH>.
17. Sigma-aldrich. Disperse blue 56 (Latyl blue bcn or resoling blue fbl) [Internet]. 2018 [cited 2018 Jul 9]. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/s477850?lang=en®ion=TH>.
18. Thakunmahachai B. Production of activated carbon from palmyra palm shell in fluidized bed [MSc thesis]. Songkhla: Prince of Songkla University; 1994. Thai.
19. Zhao B, Xiao W, Shang Y, Zhu H, Han R. Adsorption of light green anionic dye using cationic surfactant-modified peanut husk in batch mode. *Arabian Journal of Chemistry* 2017; 10 Suppl 2: S3595-S3602.
20. Wang L. Removal of disperse red dye by bamboo-based activated carbon: Optimisation, kinetics and equilibrium. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2013; 20(7): 4635-4646.
21. Ghazi Mokri HS, Modirshahla N, Behnajady MA, Vahid B. Adsorption of C.I. acid red 97 dye from aqueous solution onto walnut shell: kinetics, thermodynamics parameters, isotherms. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015; 12(4): 1401-1408.
22. Mi X, Li G, Zhu W, Liu L. Enhanced adsorption of orange II using cationic surfactant modified biochar pyrolyzed from cornstalk. *Journal of Chemistry* 2016; 2016: 1-7.
23. Ibrahim S, Fatimah I, Ang H-M, Wang S. Adsorption of anionic dyes in aqueous solution using chemically modified barley straw. *Water Science and Technology*. 2010; 62(5): 1177-1182.
24. Nopkhuntod S. Removal of reactive dyes from wastewater by shale [MSc thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2011. Thai.
25. Markandeya, Shukla SP, Dhiman N. Characterization and adsorption of disperse dyes from wastewater onto cenospheres activated carbon composites. *Environmental Earth Sciences*. 2017; 76(20): 1-12.
26. Gerçel Ö, Gerçel HF, Koparal AS, Öğütveren ÜB. Removal of disperse dye from aqueous solution by novel adsorbent prepared from biomass plant material. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 160(2-3): 668-674.
27. Krivova MG, Grinshpan DD, Hedin N. Adsorption of C_nTABr surfactants on activated carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2013; 436: 62-70.
28. Vijayaraghavan K, Won SW, Yun Y-S. Treatment of complex remazol dye effluent using sawdust- and coal-based activated carbons. *Journal of Hazardous Materials*. 2009; 167(1-3): 790-796.
29. Rai PB, Banerjee SS, Jayaram RV. Removal of disperse dyes from aqueous solution using sawdust and BDTDA-sawdust. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2007; 28: 1066-1071.

30. Yue Q-Y, Li Q, Gao B-Y, Wang Y. Kinetics of adsorption of disperse dyes by polyepichlorohydrin-dimethylamine cationic polymer/bentonite. *Separation and Purification Technology*. 2007; 54(3): 279-290.
31. Erdogan T, Erdogan FO. Characterization of the adsorption of disperse yellow 211 on activated carbon from cherry stones following microwave-assisted phosphoric acid treatment. *Analytical Letters*. 2016; 49(7): 917-928.
32. Jadhav DN, Vanjara AK. Adsorption equilibrium study: Removal of dyestuff effluent using sawdust, polymerized sawdust and sawdust carbon-I. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2004; 11(2): 194-200.
33. Albanis TA, Hela DG, Sakellariades TM, Danis TG. Removal of dyes from aqueous solutions by adsorption on mixtures of fly ash and soil in batch and column techniques. *Global Nest*. 2000; 2(3): 237-244.
34. Kisku GC, Markandeya, Shukla SP, Singh DS, Murthy RC. Characterization and adsorptive capacity of coal fly ash from aqueous solutions of disperse blue and disperse orange dyes. *Environmental Earth Sciences*. 2015; 74(2): 1125-1135.

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวและสีติดเพิร์ส

สาร	ชื่อทางเคมี	สูตรทางเคมี	มวลโมเลกุล (กรัมต่อ โมล)
สารลดแรงตึงผิวชนิด ประจุบวก CTAB [14]	Cetyltrimethylammonium bromide	$C_{19}H_{42}BrN$	364.5
สีเหลือง DDY3 [15]	N-[4-(2-Hydroxy-5-methylphenylazo)phenyl]acetamide	$C_{15}H_{15}N_3O_2$	269.0
สีแดง DDR60 [16]	1-Amino-4-hydroxy-2-phenoxyanthraquinone	$C_{20}H_{13}NO_4$	331.0
สีน้ำเงิน DDB56 [17]	1,5-Diaminobromo-4,8-dihydroxyanthraquinone	$C_{14}H_9BrN_2O_4$	349.2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของถ่าน CH ถ่าน ACH ถ่าน MCH และถ่าน AC

พารามิเตอร์	ถ่าน CH	ถ่าน ACH	ถ่าน MCH	ถ่าน AC
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	1.2	856.9	557.1	1099.8
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	150.0	18.2	19.8	17.0
ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.0043	0.3904	0.2734	0.4684

ตารางที่ 3 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 บนถ่าน MCH ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 – 1.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

สีย้อม	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	k_1 (นาที ⁻¹)	q_e (มิลลิโมลต่อกรัม)	R^2	k_2 (กรัมต่อมิลลิโมล-นาที)	q_e (มิลลิโมลต่อกรัม)	R^2
DDY3	0.0023	0.0544	0.986	1.1618	0.0190	0.982
DDR60	0.0128	0.0112	0.971	1.4749	0.0158	0.996
DDB56	0.0160	0.0048	0.980	1.9751	0.0077	0.970

ตารางที่ 4 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับสี่เหลี่ยม DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 บนถ่าน MCH ณ สภาวะ C_0 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขยาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 และ 3 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสี่เหลี่ยม DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง

สีย้อม	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช		
	q_{max}	k_L	R^2	k_F	n	R^2
	(มิลลิโมลต่อกรัม)	(ลิตรต่อมิลลิโมล)		(มิลลิโมลต่อกรัม (ลิตรต่อมิลลิโมล) ^{1/n})		
DDY3	0.112	7.515	0.958	0.19	1.65	0.971
DDR60	0.014	2.836	0.999	0.05	2.07	0.923
DDB56	0.008	4.303	0.915	0.01	1.94	0.951

ตารางที่ 5 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับสี่เหลี่ยม DDY3 บนถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขยาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 1.5 ชั่วโมง สำหรับถ่าน MCH และ 0 - 6 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ที่อุณหภูมิห้อง

ตัวอย่าง	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	k_1	q_e	R^2	k_2	q_e	R^2
	(นาที่ ⁻¹)	(มิลลิโมลต่อกรัม)		(กรัมต่อมิลลิโมล-นาที่)	(มิลลิโมลต่อกรัม)	
MCH	0.002	0.0544	0.986	1.16	0.019	0.982
AC	0.110	0.0639	0.997	0.46	0.1196	0.899

ตารางที่ 6 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับสี่เหลี่ยม DDY3 บนถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะ C_0 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขยาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 และ 21 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง

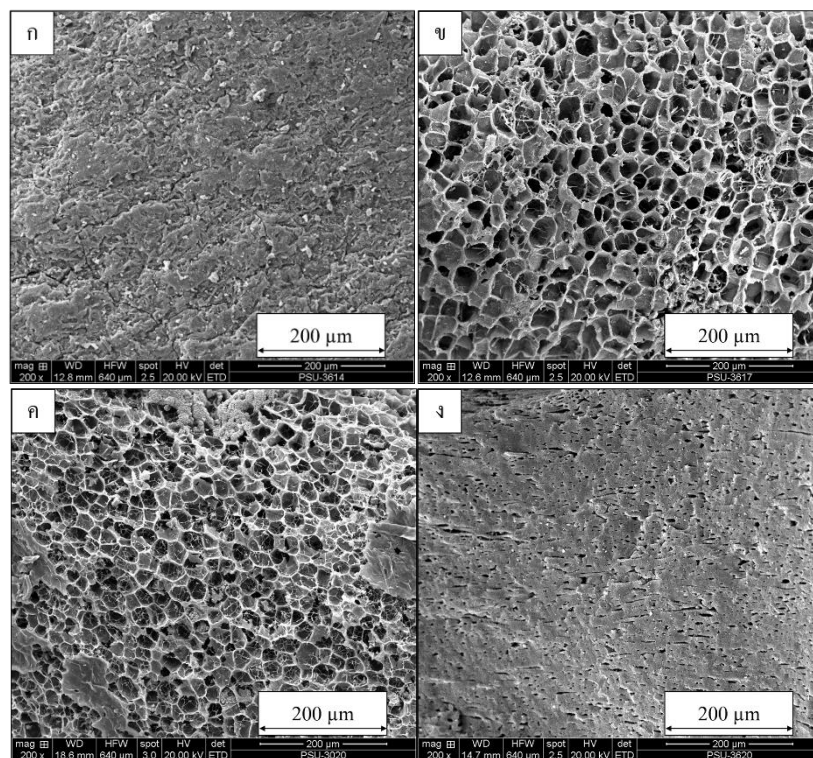
ตัวอย่าง	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช		
	q_{max}	k_L	R^2	k_F	n	R^2
	(มิลลิโมลต่อกรัม)	(ลิตรต่อมิลลิโมล)		(มิลลิโมลต่อกรัม (ลิตรต่อมิลลิโมล) ^{1/n})		
MCH	0.112	7.51	0.958	0.191	1.65	0.971
AC	0.255	2.91	0.826	0.424	1.16	0.994

ตารางที่ 7 ค่า q_c ของสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

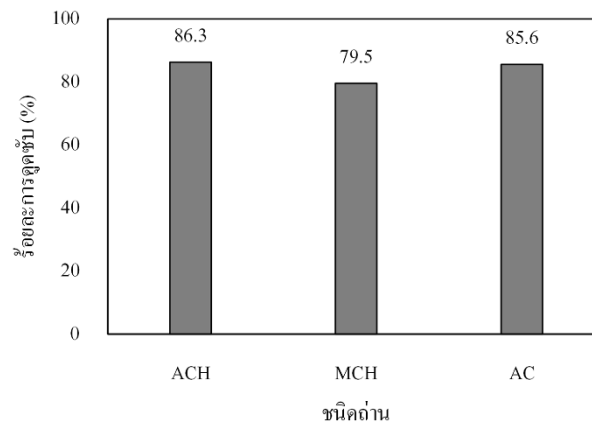
ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_c (มิลลิโมลต่อกรัม)	แหล่งที่มา
ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดปาล์ม	Disperse blue 26	0.0273	[5]
ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่	Disperse Red 167	0.0034	[20]
ขี้เลื่อย	Disperse blue 26	0.0012	[32]

ตารางที่ 7 ค่า q_c ของสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (ต่อ)

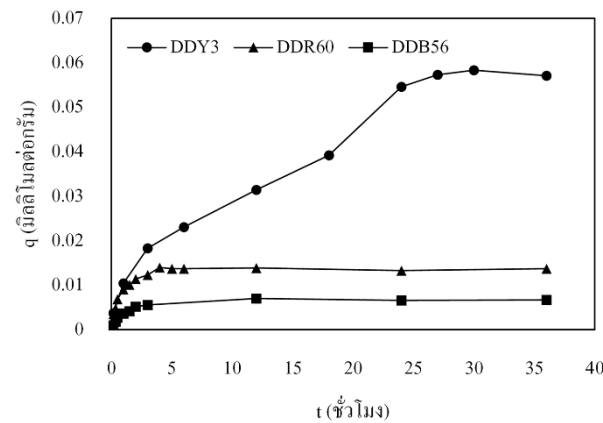
ตัวดูดซับ	สีย้อม	q_c (มิลลิโมลต่อกรัม)	แหล่งที่มา
ขี้เลื่อย	Disperse red 156	0.0024	[32]
ขี้เลื่อยพอลิเมอร์	Disperse blue 26	0.0012	[32]
ขี้เลื่อยพอลิเมอร์	Disperse red 156	0.0012	[32]
ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย	Disperse blue 26	0.0013	[32]
ถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย	Disperse red 156	0.0022	[32]
ขี้เถ้าลอย	Disperse blue	0.0019	[34]
ขี้เถ้าลอย	Disperse orange	0.0039	[34]
ถ่าน MCH	DDY3	0.0544	งานวิจัยนี้
ถ่าน MCH	DDR60	0.0158	งานวิจัยนี้
ถ่าน MCH	DDB56	0.0048	งานวิจัยนี้
ถ่าน AC	DDY3	0.0639	งานวิจัยนี้



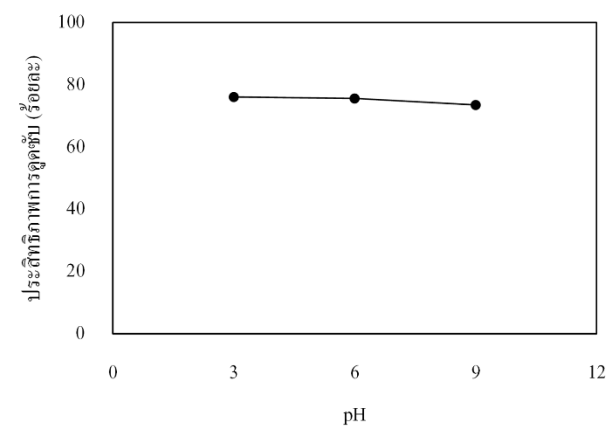
ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของ (ก) ถ่าน CH (ข) ถ่าน ACH (ค) ถ่าน MCH และ (ง) ถ่าน AC ที่กำลังขยาย 200 เท่า



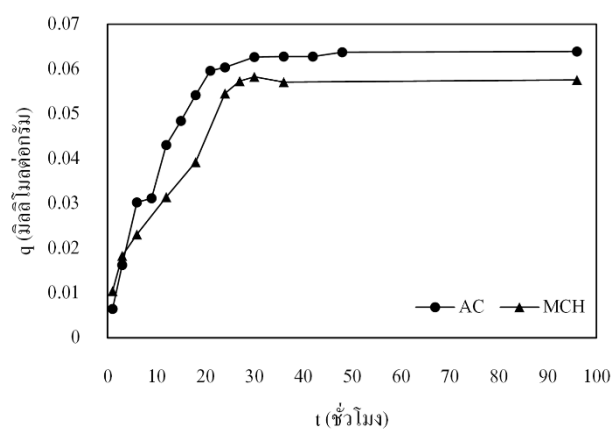
ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน ACH ถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะ C_0 ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3 ผลของเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 บนถ่าน MCH ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน MCH ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 9 ตามลำดับ ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5 เวลาการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะ C_0 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง