

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้ารีแอคทีฟด้วยผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

Removal Efficacy of Reactive Textile Dyes by Cellulose Powder from Rice Straw

จิราลักษณ์ อนุกุล (Jiralak Anukul)^{1*} คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)**

ดร.นพวรรณ เสมวิมล (Dr.Noppawan Semvimol)***

(Received: June 24, 2021; Revised: August 3, 2021; Accepted: September 7, 2021)

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ใช้ผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 เพื่อกำจัดสีย้อมแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Blue G, Red SBN และ Yellow RN โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ระยะเวลาสัมผัส และการดูดซับสารละลายสีย้อมผสม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับ จากการศึกษาพบว่าปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าว 2.5 กรัม ในระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ร้อยละ 91.37±0.20, 92.27±0.00 และ 97.20±0.73 ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการดูดซับสารละลายสีย้อมผสมความเข้มข้น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าสีหลังจากกระบวนการดูดซับมีค่าต่ำกว่า 300 ADMI (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม) จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของผงเซลลูโลสจากฟางข้าวสอดคล้องกับสมการ Pseudo-Second Order และกลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังนั้นผงเซลลูโลสจากฟางข้าวจึงสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพซึ่งเหมาะสำหรับการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในน้ำเสียจากสีย้อมผ้าพื้นเมือง

ABSTRACT

In this research, Cellulose powder was prepared by bleaching rice straw with 10% w/v H₂O₂ (CPR) to removal 3 reactive dyes (Blue G, Red SBN and Yellow RN). The optimum conditions for the dye adsorption were investigated including an adsorbent dosage, the concentration of 3 reactive dyes solution, the contact time and adsorption of mixed 3 dye solution. The adsorption isotherm and kinetics. It was found that the amount of CPR of 2.5 g contact time at 60 min the adsorption capacity of 3 reactive dyes the removal percentages were 91.37±0.20, 92.27±0.00 and 97.20±0.73 respectively. At the concentration of 3 reactive dyes solution 15 mg/L. In 15 mg/L adsorption of mixed 3 dyes solution, the color value after the adsorption was lower than 300 ADMI (standard value of wastewater industry). The Pseudo-Second Order model was applied for fitting experimental data of 3 dyes adsorption by CPR. The adsorption mechanism was consistent with Langmuir isotherm. Therefore, CPR could be used as alternative bio-adsorbent for reactive dyes removal in native textile dyes wastewater.

คำสำคัญ: ผงเซลลูโลส ฟางข้าว สีย้อมรีแอคทีฟ การกำจัดสีย้อม

Keywords: Cellulose powder, Rice straw, Reactive dyes, Dye removal

¹Corresponding author: kkanita.kt@gmail.com

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

***อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

น้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าจากพื้นที่ชุมชนที่มีอาชีพย้อมผ้าพื้นเมืองปัญหาส่วนใหญ่ที่พบ เมื่อปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมมักจะไม่มีการบำบัดหรือกำจัดเสียให้ได้ค่าตามมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด คือ มีค่าไม่เกิน 300 ADMI (American Dye Manufacturers Institute) [1] ซึ่งมีสีย้อมผ้าที่หลงเหลืออยู่ปริมาณมากในน้ำจากกระบวนการฟอกย้อมเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมทำให้คุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำนั้นเสื่อมโทรมลง สีย้อมผ้าที่ปนเปื้อนในน้ำเสียยากต่อการกำจัดเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมมีองค์ประกอบของสารอะโรมาติกหลายชนิดที่สามารถทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ [2] อีกทั้งสีย้อมผ้าทำให้แหล่งน้ำมีสภาพที่เปลี่ยนแปลงไป เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น และยังปิดกั้นการแลกเปลี่ยนออกซิเจน จนทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจนซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติขาดความสวยงาม [3] สีย้อมผ้ากลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้สามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับเส้นใยเกิดพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) เป็นสีย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุด นิยมการนำมาย้อมผ้าพื้นเมืองจำพวกผ้าฝ้ายและผ้าไหม [4-5]

การบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีหลายวิธี เช่น การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง การบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ (Adsorption) ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำ ใช้สถานที่น้อย และควบคุมดูแลง่าย โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ สารอินทรีย์สังเคราะห์ (เรซิน) และวัสดุชีวภาพ [6] ในงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นปัญหาจากฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากและยากต่อการกำจัด ชาวบ้านส่วนใหญ่จึงมีวิธีกำจัดฟางข้าวโดยการเผา ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ เกิดเขม่าควัน และฝุ่นละอองที่แพร่กระจายเป็นวงกว้างและส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม [7] จึงเลือกใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมผ้ากลุ่มรีแอคทีฟ เนื่องจากฟางข้าวมีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส รองลงมา คือ เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามลำดับ เมื่อนำมาปรับสภาพทางเคมีเพิ่มรูพรุนและพื้นที่ผิวทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ [8] และเพื่อเป็นแนวทางเลือกให้ชุมชนที่ทำผ้าพื้นเมืองใช้ในการบำบัดสีย้อมผ้ารีแอคทีฟในน้ำเสียที่เกิดจากการฟอกย้อมต่อไป

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวดูดซับฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

ตัดฟางข้าวให้ได้ขนาด 2 เซนติเมตร นำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น ตากแดดให้แห้ง ปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียดได้ผงฟางข้าว (Rice Straw Powder, RSP) และนำผงฟางข้าวที่เตรียมได้ส่วนหนึ่งมาฟอกสีโดยเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 10 % โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แช่ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง และนำมาล้างให้สะอาดจากนั้นนำไปต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 M โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อกำจัดลิกนิน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง ล้างวัตถุดิบที่ต้มแล้วหลายๆ ครั้ง นำไปตากให้แห้ง แล้วนำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2.0 มิลลิเมตร ได้ผงเซลลูโลสจากฟางข้าว (Cellulose Powder from Rice Straw, CPR) และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น

2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมผสม

2.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิด ได้แก่ Blue G, Red SBN และ Yellow RN ความเข้มข้น 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 เตรียมสารละลายสีย้อมผสมที่แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี 15.0 มิลลิกรัม ใส่ในปิเก็ตเจอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรในขวดปรับปริมาตร

3. การศึกษาหาความยาวคลื่นที่สีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (λ_{max})

นำสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดที่มีความเข้มข้น 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มาสแกนหาความยาวคลื่นที่สีย้อมดูดกลืนได้มากที่สุด (λ_{max}) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer พบว่า λ_{max} ของสี Blue G, Red SBN และ Yellow RN เท่ากับ 590, 516 และ 397 นาโนเมตร ตามลำดับ

4. การศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเบื้องต้นของผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

ซึ่งผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว 1.0 กรัม ต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดความเข้มข้น 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่า 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับของแต่ละสีย้อมโดยการวัดค่าดูดกลืนแสงที่แต่ละ λ_{max} ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมด้วยเซลลูโลสจากฟางข้าว โดยทำการทดลองแบบแบตช์

5.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

ซึ่งผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เตรียมไว้ปริมาณ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 และ 5.0 กรัม [4] ต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดความเข้มข้น 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่า 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับของแต่ละสีย้อมโดยการวัดค่าดูดกลืนแสงที่แต่ละ λ_{max} และค่า ADMI ตามวิธีมาตรฐาน APHA 2120F (ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometric method) [1] ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

5.2 ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

ซึ่งผงเซลลูโลสจากฟางข้าวปริมาณที่ได้จากการศึกษาในข้อ 5.1 ต่อสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดเข้มข้น 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 และ 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรขวดละ 50 มิลลิลิตร ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

5.3 ศึกษาระยะเวลาสัมผัส

ซึ่งผงเซลลูโลสจากฟางข้าวปริมาณที่ได้จากข้อ 5.1 และสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟที่มีความเข้มข้นเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาได้แก่ 30, 60, 90 และ 120 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

5.4 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

การศึกษาดูจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ผลการศึกษาจากข้อ 5.3 นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับของแต่ละสีย้อม และนำมาสร้างแบบจำลองสมการ Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order เพื่อศึกษาลักษณะของการดูดซับ

5.5 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ผลการศึกษาจากข้อ 5.2 มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิชเพื่อศึกษาแนวโน้มในการดูดซับ

5.6 ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมผสม

โดยใช้ปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าวและระยะเวลาสัมผัสที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.1 และ 5.3 ตามลำดับ ทดลองกับสารละลายสีย้อมผสมที่มีความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร นำไปกวนกับเครื่อง JarTest ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที กรองผ่านกระดาษกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับของแต่ละสีย้อมโดยการวัดค่าดูดกลืนแสงที่แต่ละ λ_{max} และค่า ADMI ตามวิธีมาตรฐาน APHA 2120F (ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometric method) [1] ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

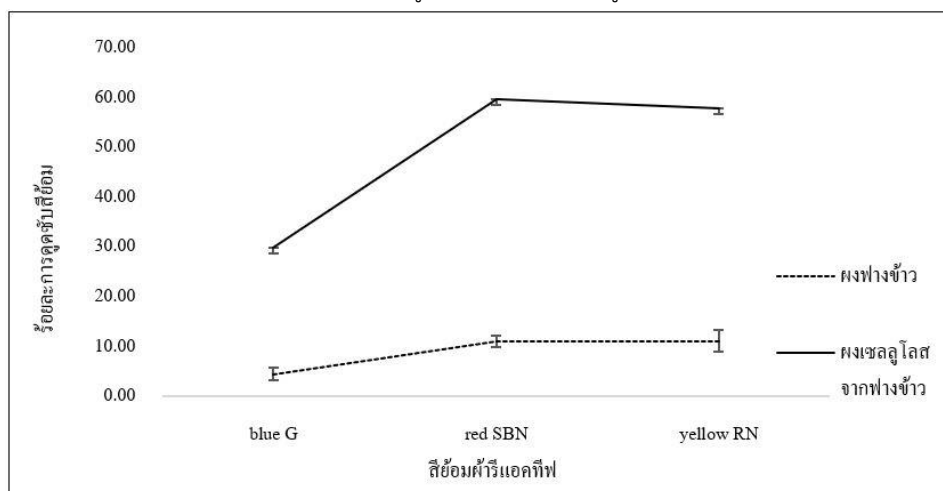
จากการศึกษาการเตรียมผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่ผ่านการฟอกด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าผงฟางข้าวมีลักษณะเป็นเส้นใยสีเหลืองของฟางข้าว และผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่ผ่านการฟอก พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวขุ่น เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณลิกนิน และสามารถกำจัดสิ่งสกปรกได้ [9] ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะของผงฟางข้าว (ก) ลักษณะของผงเซลลูโลสจากฟางข้าว (ข)

2. ผลการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟเบื้องต้นของผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Blue G, Red SBN และ Yellow RN ความเข้มข้น 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตรของผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว 1.0 กรัม ดังภาพที่ 2 พบว่าผงเซลลูโลสจากฟางข้าว มีความสามารถในการกำจัดสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 29.61 ± 0.10 , 59.40 ± 0.00 และ 57.62 ± 0.01 ตามลำดับ และผงฟางข้าวสามารถกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 4.27 ± 1.26 , 10.85 ± 1.08 และ 11.00 ± 2.09 ตามลำดับ จะเห็นว่าผงเซลลูโลสจากฟางข้าวมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมทั้ง 3 ชนิดได้ดีกว่าผงฟางข้าวอย่างเห็นได้ชัด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ผงเซลลูโลสจากฟางข้าวมาทำการศึกษาต่อไป



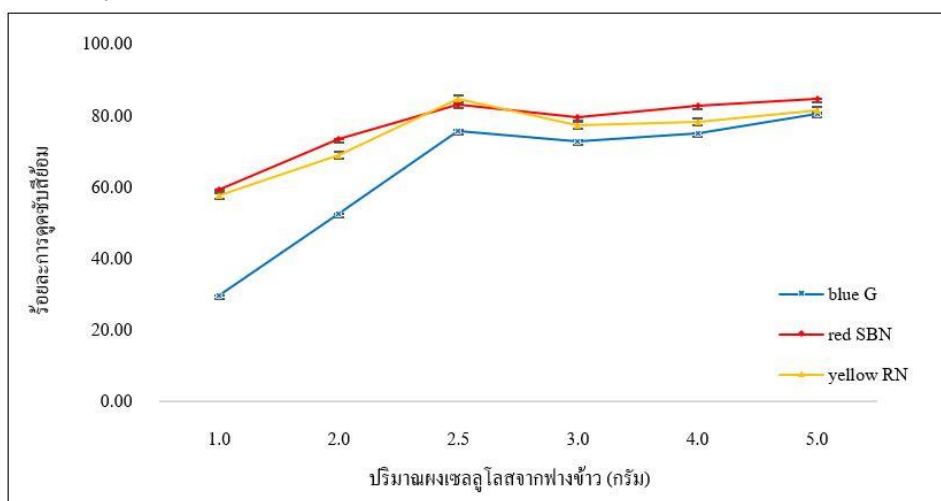
ภาพที่ 2 ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดของผงฟางข้าวและผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยผงเซลลูโลสจากฟางข้าว โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ด้วยผงเซลลูโลสจากฟางข้าว ปัจจัยหลักที่ใช้ในการศึกษา คือ ปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าว ความเข้มข้นสีย้อมรีแอคทีฟ และระยะเวลาสัมผัส

3.1 ปริมาณตัวดูดซับผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

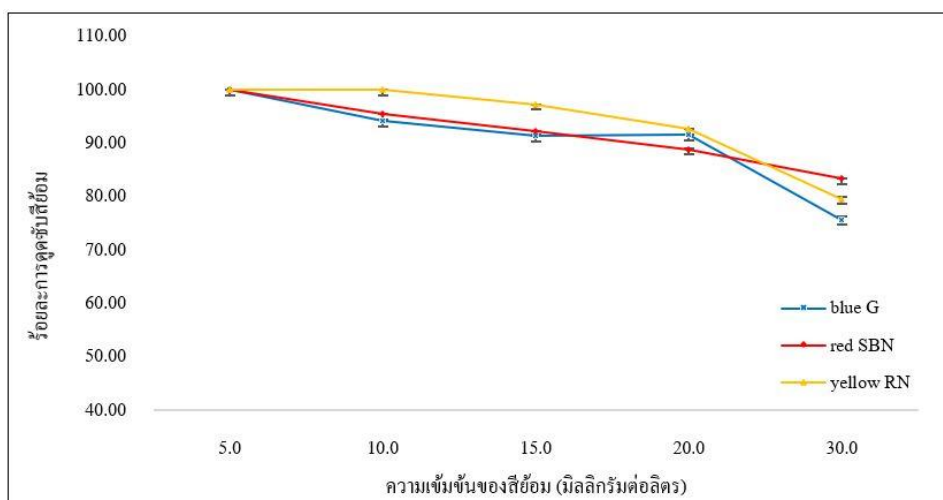
จากการศึกษาโดยใช้ปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เตรียมไว้ในปริมาณที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1.0 ถึง 5.0 กรัม ทดลองกับสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่าปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าวมีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด คือ เมื่อเพิ่มปริมาณทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3 พบว่าผงเซลลูโลสจากฟางข้าวที่มีปริมาณต่างกันมีร้อยละการดูดซับสีย้อม Blue G เท่ากับ 29.61 ± 0.10 , 52.48 ± 0.00 , 72.93 ± 0.10 , 75.05 ± 0.00 และ 80.58 ± 0.27 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสีย้อม Red SBN เท่ากับ 59.40 ± 0.00 , 73.54 ± 0.06 , 79.54 ± 0.06 , 82.73 ± 0.00 และ 84.73 ± 0.06 ตามลำดับ และร้อยละการดูดซับสีย้อม Yellow RN เท่ากับ 57.62 ± 0.01 , 68.93 ± 0.01 , 77.49 ± 0.08 , 78.41 ± 0.08 และ 81.45 ± 0.08 ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณฟางข้าวส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม จากผลการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกใช้ปริมาณดูดซับเท่ากับ 2.5 กรัม ที่ให้ร้อยละการดูดซับแต่ละสีย้อมเท่ากับ 75.70 ± 0.47 , 83.32 ± 0.06 และ 79.57 ± 0.38 ตามลำดับ มาทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 3 ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ 3 ชนิดของผงเซลลูโลสจากฟางข้าวปริมาณ 1.0 – 5.0 กรัม

3.2 ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟ

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษา คือ 5.0 – 30.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และผงเซลลูโลสจากฟางข้าว 2.5 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมมีค่าลดลงและเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น [10] ดังภาพที่ 4

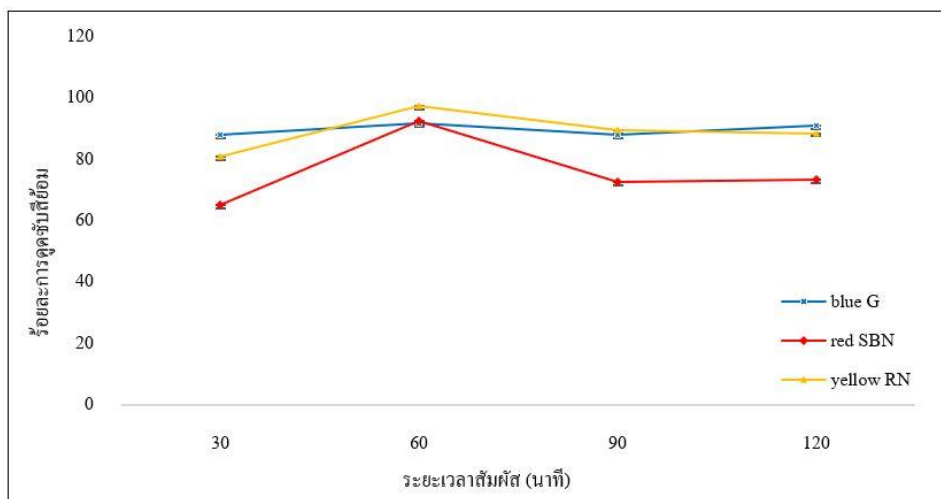


ภาพที่ 4 ร้อยละการดูดซับของสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ที่ความเข้มข้น 5.0 - 30.0 มิลลิกรัมต่อกรัม

จากภาพที่ 4 ร้อยละการดูดซับสีย้อม Blue G เท่ากับ 100.00 ± 0.00 , 94.11 ± 0.31 , 91.37 ± 0.20 , 91.50 ± 0.15 และ 75.70 ± 0.47 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซับสีย้อม Red SBN เท่ากับ 100.00 ± 0.00 , 95.74 ± 0.00 , 92.27 ± 0.00 , 88.82 ± 0.10 และ 83.32 ± 0.06 ตามลำดับ และร้อยละการดูดซับสีย้อม Yellow RN เท่ากับ 100.00 ± 0.00 , 100.00 ± 0.00 , 97.20 ± 0.73 , 92.54 ± 0.50 และ 79.57 ± 0.38 ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารละลายสีย้อมรีแอคทีฟที่ความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นความเข้มข้นสูงสุดที่ผงเซลล์จากฟางข้าว 2.5 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความจุในการดูดซับเท่ากับ 0.27, 0.28 และ 0.29 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และให้ค่าสีย้อม Blue G, Red SBN และ Yellow RN ในหน่วย ADMI เท่ากับ 173, 253 และ 233 ADMI ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานค่าสี ADMI ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมีค่า (ไม่เกิน 300 ADMI)

3.3 ระยะเวลาสัมผัส

จากการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสการดูดซับสีย้อมของผงเซลล์จากฟางข้าวในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 30, 60, 90 และ 120 นาที ได้ผลดังภาพที่ 5 พบว่าสีย้อม Blue G สีย้อม Red SBN และสีย้อม Yellow RN ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 91.37 ± 0.20 , 92.27 ± 0.00 และ 97.20 ± 0.73 ตามลำดับ ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที เหมือนกันและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส เนื่องจากพื้นที่ผิวของผงเซลล์จากฟางข้าวดูดซับสีย้อมจนเต็มพื้นที่เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล และปริมาณผงเซลล์ที่ใช้จำกัดอยู่ที่ 2.5 กรัม ทำให้พื้นที่ผิวที่ดูดซับมีจำกัดไปด้วย [7] สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้นทำให้ตัวถูกดูดซับสัมผัสกับตัวดูดซับได้มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับมีจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ [12] และค่าสีย้อม Blue G, Red SBN และ Yellow RN ในหน่วย ADMI มีค่าต่ำกว่า 300 ADMI ทั้งหมด



ภาพที่ 5 ร้อยละการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ด้วยผงเซลล์ลูโลสจากฟางข้าวที่ 2.5 กรัม ระยะเวลาสัมผัสที่ 30 - 120 นาที

4. จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลล์ลูโลสจากฟางข้าว โดยใช้สมการ Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order [11]

สมการเส้นตรง Pseudo-First Order ดังสมการที่ (1)

$$\text{Log } (q_e - q_t) = \text{Log } q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (1)$$

สมการ Pseudo-First Order ดังสมการที่ (2)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

เมื่อ k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที) q_t หมายถึง ความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับ (adsorbent) ที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) q_e หมายถึง ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

สมการเส้นตรงของ Pseudo Second Order ดังสมการที่ (3)

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \right) t \quad (3)$$

สมการ Pseudo Second Order ดังสมการที่ (4)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

เมื่อ k_2 หมายถึงค่า คงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที) q_t หมายถึง ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) q_e หมายถึง ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) t หมายถึง เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

นำข้อมูลการศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยผงเซลล์ลูโลสจากฟางข้าว มาเขียนกราฟตามสมการ Pseudo-First Order และ Pseudo-Second Order ค่าคงที่ k_1 , k_2 และค่า q_e แสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือค่า R^2 ของสมการ Pseudo-Second Order พบว่ามีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการ Pseudo-First Order จึงอธิบายได้ว่าการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลล์ลูโลสจากฟางข้าวเกิดจากแรงทางเคมี (Chemisorption) คือ แรงยึดเหนี่ยวแบบเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟกับผิวของผงเซลล์ลูโลสจากฟางข้าว

ตารางที่ 1 จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลลูโลสจากฟางข้าว

Native Textile Dyes	Pseudo First Order			Pseudo Second Order		
	q_e (mg/g)	k_1 (1/min)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg·min)	R^2
Blue G	0.01	0.0015	0.9562	0.26	3.80	0.9993
Red SBN	0.09	0.0041	0.9360	0.22	4.57	0.9680
Yellow RN	0.06	0.0075	0.6212	0.23	4.41	0.9848

5. ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟด้วยผงเซลลูโลสจากฟางข้าว เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_e) ใช้อธิบายลักษณะการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลลูโลสจากฟางข้าว [12]

แบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 5

$$q_e = \frac{q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

แบบจำลองไอโซเทอร์มสมการเส้นตรงของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการที่ 6

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_0} + \frac{1}{K_L q_0 C_e} \quad (6)$$

เมื่อ q_0 หมายถึง ปริมาณสูงสุดของสีย้อมรีแอคทีฟที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียวต่อปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าว (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L หมายถึง ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เมื่อนำข้อมูลผลปริมาณผงเซลลูโลสจากฟางข้าวมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ ควรได้กราฟเส้นตรง โดยค่า q_0 หาได้จากจุดตัดแกนตั้ง และความชันของเส้นตรงหาค่า K_L ได้

เมื่อพิจารณาแบบจำลองไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบฟรุนดิช ดังสมการที่ 7

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

แบบจำลองของไอโซเทอร์มสมการเส้นตรงแบบฟรุนดิช ดังสมการที่ 8

$$\text{Log } q_e = \text{log } K_F + \frac{1}{n} \text{log } C_e \quad (8)$$

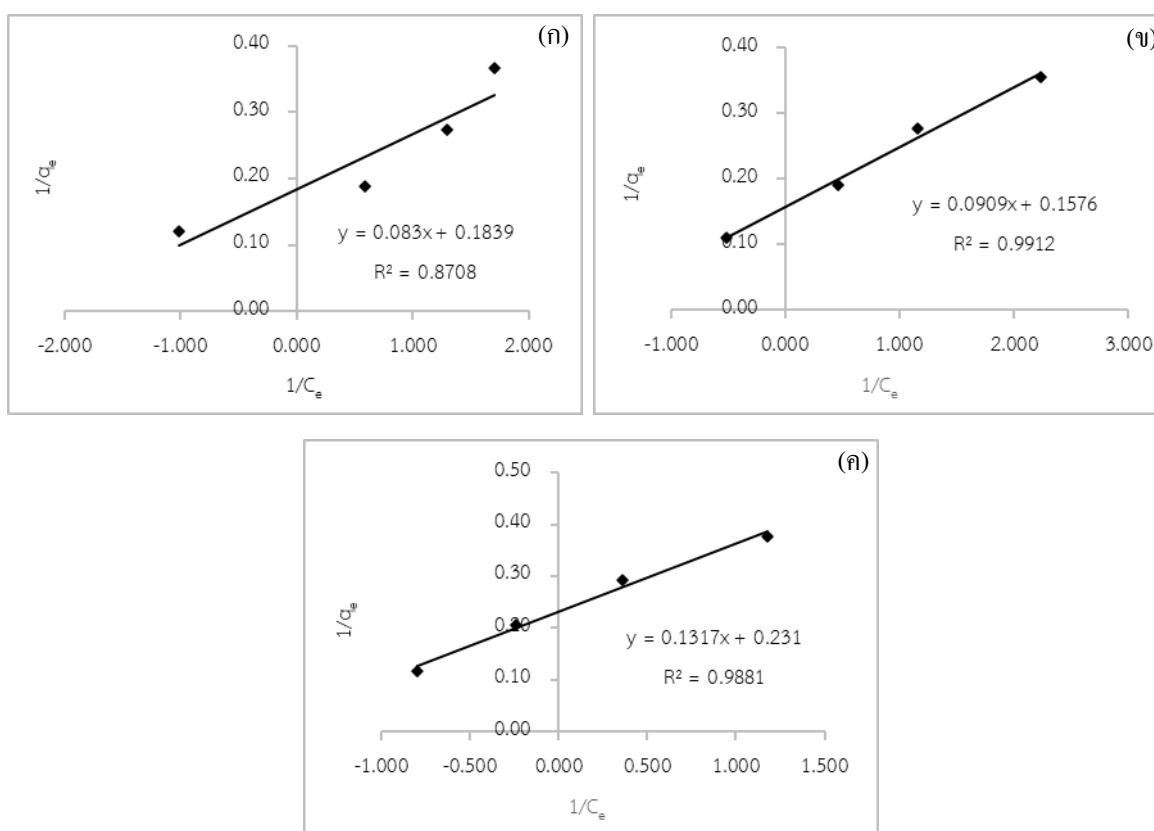
เมื่อ K_F หมายถึง ค่าคงที่ฟรุนดิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ $1/n$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า $n > 1$ แสดงว่ามีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า n เข้าใกล้ 0 แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง

ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ผงเซลลูโลสจากฟางข้าว เมื่อใช้สมการแลงเมียร์ ดังภาพที่ 6 และสมการฟรุนดิช ดังภาพที่ 7 ตามลำดับ ส่วนค่าคงที่ของแลงเมียร์และฟรุนดิช ดังตารางที่ 2 พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการดูดซับสีย้อมมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่ากลไกการดูดซับของผงเซลลูโลสจากฟางข้าวเป็นไปตามสมการของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โดยที่โมเลกุลตัวดูดซับไม่เกิดการ

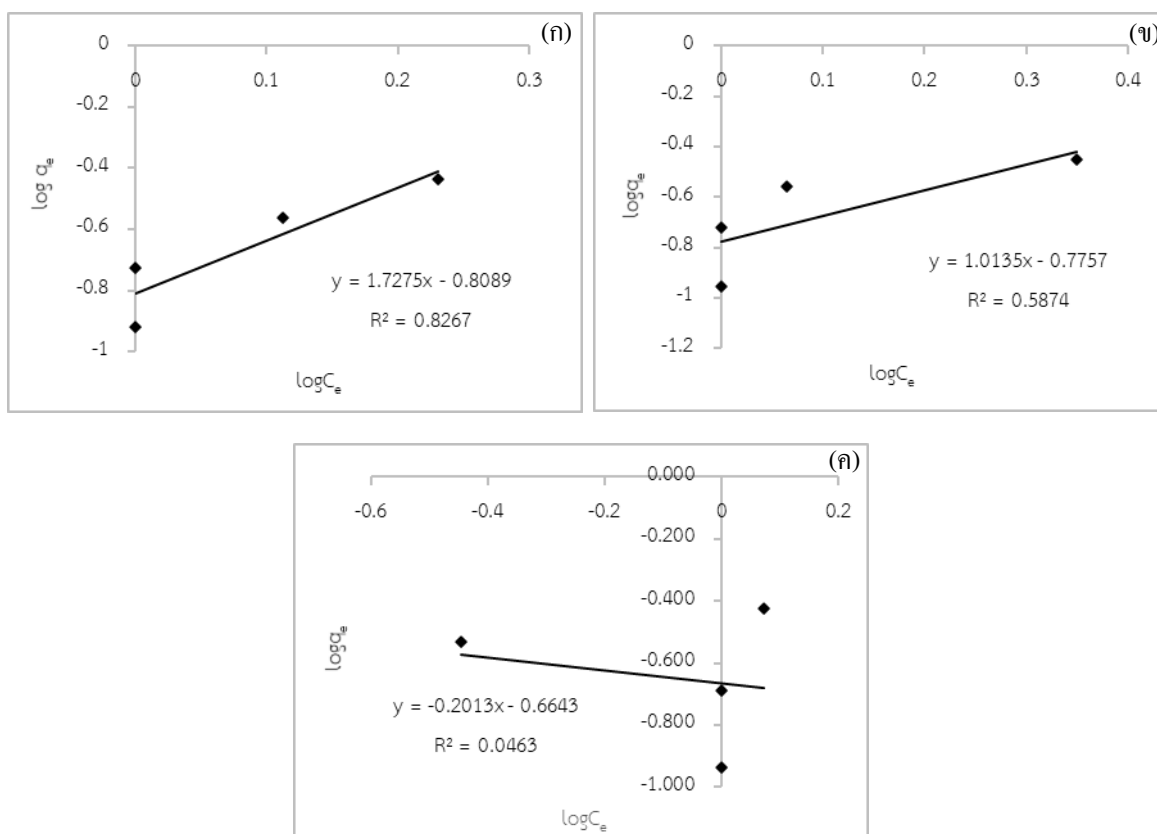
ซ้อนทับกันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม [2] และสอดคล้องกับผลการศึกษาลอนศาสตร์การดูดซับที่พบว่า การดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี [12]

ตารางที่ 2 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลล์ูโลสจากฟางข้าว

Native Textile Dyes	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	$q_{\max}(\text{mg/g})$	$K_L (\text{L/mg})$	R^2	$K_F (\text{mg/g})$	n	R^2
Blue G	12.05	0.1304	0.8708	0.7669	1.728	0.8267
Red SBN	11.00	0.1278	0.9912	0.6687	1.014	0.5874
Yellow RN	7.59	0.1986	0.9881	0.9201	0.201	0.0463



ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Blue G (ก) Red SBN (ข) และ Yellow RN (ค)



ภาพที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Blue G (ก) Red SBN (ข) และ Yellow RN (ค)

6. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมผสม

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแต่ละชนิด นำผลการทดลองในข้อ 3 มาทดลองกับสารละลายสีย้อมผสม ที่มีความเข้มข้นสีย้อมแต่ละชนิดเท่ากับ 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เติมน้ำเซลล์ูโลสจากฟางข้าว 50 กรัม นำไปกวนด้วยเครื่อง JarTest ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และนำไปวัดค่าสี ADMI พบว่าค่าสีของสารละลายสีย้อมผสมก่อนกระบวนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 466 ADMI แต่หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับมีค่าสีเท่ากับ 191 ADMI ซึ่งต่ำกว่า 300 ADMI

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Blue G, Red SBN และ Yellow RN พบว่าผงเซลล์ูโลสจากฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดมากกว่าผงฟางข้าว สภาวะที่เหมาะสมของผงเซลล์ูโลสจากฟางข้าว คือ ผงเซลล์ูโลสจากฟางข้าว 2.5 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟร้อยละการดูดซับเท่ากับ 91.37 ± 0.20 , 92.27 ± 0.00 และ 97.20 ± 0.73 ตามลำดับ ในสารละลายสีย้อมรีแอคทีฟความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที และประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมผสมที่ความเข้มข้น 15.0 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าสีย้อมหลังดูดซับที่ต่ำกว่า 300 ADMI ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานค่าสี ADMI ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 300 ADMI การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟของผงเซลล์ูโลสจากฟางข้าวมีความสอดคล้องกับสมการ Pseudo-Second Order และไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ ในการดำเนินงานวิจัยจนส่งผลให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Announcement of the Ministry of Industry Subject: Determination of standard for control of factory effluent discharge [Internet] 2017 [updated 2017 Jun 7; cited 2020 Apr 12] Available from: <https://www.diw.go.th/hawk/news/11.PDF>
2. Sukadjasakul A. Dye Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater Utilizing Adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2012. Thai.
3. Lellis B, Fávaro-Polonio C, Pamphile J, Polonio J. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*. 2019; 50: 1-16. Brazil.
4. Ruparseart P. The Utilization of Water Hyacinth Stem Bioadsorbent as Growing Material in Constructed Wetland Systems for Dyestuff Removal. [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2015. Thai.
5. Chaijumnong U, Tungkananuruk N, Tungkananuruk K. Treatment of Reactive Dyes in Wastewater from Native Textile House-Hold Factory by Using Constructed Filter Tank with Lignite Fly Ash Adsorbent. *Thai Environmental Engineering Journal*. 2017; 31(1): 45-57. Thai.
6. Chooaksorn W. Color Removal Technology in Industrial Wastewater. *Burapha Sci. J*. 2012; 17(1): 181-191. Thai.
7. Pimpa W, Pimpa C. Synthesis and utilization of the rice straw based adsorbents for wastewater treatment. Bangkok: Science and Technology Infrastructure Databank; 2015. Thai.
8. Sirianusornsak W, Sinbuathong N. Chemical pretreatment of rice straw for a raw material in the production of renewable energy. In: *Proceedings of 51st Kasetsart University Annual Conference: Science, Natural Resources and Environment*; 2013 Feb 5-7; Bangkok. The Thailand Research Fund, Bangkok (Thailand).
9. Maharatchamongkol K. The silane treatment on the surface of cellulose fiber from rice straw as a reinforced material in epoxy resin [MSc thesis]. Bangkok: Silpakorn University; 2015. Thai.
10. Sodsai K. Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater by Hevea brasiliensis and Hevea brasiliensis Charcoal [MSc thesis]. Bangkok: Kasetsart University; 2012. Thai.
11. Lin L, Zhang Y, Xiu P, Xing C, Li J, Ju M. Adsorption Removal of Dyes from Single and Binary Solutions Using a Cellulose-based Bioadsorbent. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2015; 3: 432-442. China.
12. Tungkananuruk N, Tungkananuruk K. Principle of chemical water quality analysis. 1th ed. Bangkok: KASETSART UNIVERSITY PRESS; 2007.