



การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟและดีสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ  
ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก  
Adsorption of Reactive and Disperse Dyes from Wastewater Using  
Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar

ฉัตรสุดา โกศัยกานนท์  
Chatsuda Kosaiyakanon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การดูดซับสีย้อมแอคทีฟและสีย้อมกระจายในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ  
ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก  
Adsorption of Reactive and Disperse Dyes from Wastewater Using  
Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar

ฉัตรสุดา โกศัยกานนท์  
Chatsuda Kosaiyakanon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering  
Prince of Songkla University

2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การดูดซับสีรีแอกทีฟและสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านเปลือกเมล็ด  
กาแฟที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

ผู้เขียน นางสาวฉัตรสุดา โกศัยกานนท์

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี  
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นางสาวฉัตรสุดา โภคัยกานนท์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวฉัตรสุดา โกศัยกานนท์)

นักศึกษา

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

**ผู้เขียน** นางสาวฉัตรสุดา โกศัยกานนท์

**สาขาวิชา** วิศวกรรมเคมี

**ปีการศึกษา** 2561

### บทคัดย่อ

เปลือกเมล็ดกาแฟจัดเป็นวัสดุเหลือทางการเกษตร ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับสีย้อมออกจากน้ำเสียได้ โดยงานวิจัยนี้ นำเปลือกเมล็ดกาแฟมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้ในการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์สออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และนำไปกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากนั้นแล้วนำถ่านดังกล่าวมาปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ที่สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB 7.5 มิลลิโมลต่อลิตร พีเอช 7 ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง ได้เป็นถ่าน MCH (Modified coffee husk biochar) และพบว่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว CTAB เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ จากนั้นแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน คือ

การทดลองส่วนที่หนึ่ง ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟ (สีย้อมชนิดประจุลบ) ได้แก่ สีเหลือง Reactive yellow 145 (RDY145) สีแดง Reactive red 195 (RDR195) และสีน้ำเงิน Reactive blue 222 (RDB222) ด้วยถ่าน MCH พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง RDY145 (ร้อยละ 83.7) มากกว่าสีแดง RDR195 (ร้อยละ 71.1) และสีน้ำเงิน RDB222 (ร้อยละ 59.6) ตามลำดับ โดยสีโมเลกุลขนาดเล็กถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ การดูดซับของสีรีแอกทีฟเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ โดยถ่าน MCH ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC) และถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว CTAB (Modified activated carbon, MAC) ถึง 9 เท่า เนื่องจากขนาดรูพรุนของถ่าน MCH กว้างกว่าถ่าน AC และถ่าน MAC ประมาณ 1.9 องค์กรอม และประจุบวกที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ส่งเสริมการดูดซับสีประจุลบได้ดียิ่งขึ้น

การทดลองส่วนที่สอง คือ ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์ส (สีย้อมชนิดไม่มีประจุ) ได้แก่ สีเหลือง Disperse yellow 3 (DDY3) สีแดง Disperse red 60 (DDR60) และสีน้ำเงิน Disperse blue 56 (DDB56) ด้วยถ่าน MCH โดยประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 (ร้อยละ 79.5) มากกว่าสีแดง DDR60 (ร้อยละ 23.2) และสีน้ำเงิน DDB56 (ร้อยละ 9.7) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดโมเลกุลสี สีขนาดเล็กมีค่าการดูดซับสูงสุด นอกจากนี้พบว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช การดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ประสิทธิภาพในการดูดซับถ่าน MAC (ร้อยละ 85.8) มากกว่าถ่าน AC

(ร้อยละ 84.3) และถ่าน MCH (ร้อยละ 79.5) ตามลำดับ จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ไม่เกิน 10 ทั้งนี้ส่วนหัวที่มีประจุของสารลดแรงตึงผิวอาจขัดขวางการแพร่เพื่อดูดซับของสียสเฟิร์สซึ่งไม่มีประจุเข้าสู่ผิวถ่าน ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้นำถ่าน AC และถ่าน CH มาปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Polyethylene glycol sorbitan monooleate (Tween80) โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิว SDS มีขนาดเล็กกว่า CTAB และ Tween80 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS มีร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 สูงสุด และถ่าน CH ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถ่าน AC ทุกชนิด สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนหัวเล็กและส่วนหางยาวส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาผลของพีเอชในการดูดซับสีเหลือง RDY145 และการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ในช่วงพีเอช 3 - 9 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อการดูดซับ และมีการศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed column) โดยศึกษาการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ถ่าน AC และถ่าน MAC พบว่าคอลัมน์ที่บรรจุด้วยถ่าน MCH ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเหลือง RDY145 สูงสุด ส่วนการดูดซับสีเหลือง DDY3 พบว่าถ่าน AC ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด ซึ่งการศึกษากการดูดซับในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง สอดคล้องกับการดูดซับแบบกะที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

**Thesis Title** Adsorption of Reactive and Disperse Dyes from Wastewater Using Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar  
**Author** Miss Chatsuda Kosaiyakanon  
**Major Program** Chemical Engineering  
**Academic Year** 2018

## ABSTRACT

A solid agricultural waste, coffee husk, was applied as an adsorbent for reactive and disperse dye-polluted wastewater treatment. The coffee husk was pyrolyzed at 450°C and then chemically activated using 50 %wt ZnCl<sub>2</sub> solution. The CH contains higher average pore size but slightly lower surface area than those of commercial activated carbon (AC). The CH was then modified using a cationic surfactant, Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), at 7.5 mM of initial CTAB concentration, pH 7 at 30°C, 170 rpm, and 7.5 h. The adsorption behaviors of CTAB on CH adsorbents suited well with the pseudo-second order adsorption kinetics and the Langmuir isotherm model.

For dye removal, the experiment was divided into two parts. For part 1, the modified coffee husk biochar (MCH) was applied for reactive dyes removal. The selected reactive dyes are reactive yellow 145 (RDY145), reactive red 195 (RDR195), and reactive blue 222 (RDB222). The adsorption kinetics was fit well with the pseudo-second order for all three dyes. The adsorption isotherm was agreed well with the Langmuir isotherm model. The removal efficiency of RDY145 (83.7%) was the highest and followed by RDR195 (71.1%) and RDB222 (59.6%), respectively. The adsorption of RDY145 using MCH was subsequently compared with AC and surfactant-modified activated carbon (MAC). It was found that the dye adsorption using MCH was higher than AC and MAC around 9 folds.

For part 2, the MCH was applied for disperse dyes removal. The selected disperse dyes were disperse yellow 3 (DDY3), disperse red 60 (DDR60), and disperse blue 56 (DDB56). The removal efficiency of DDY3 (79.5 %) was the highest, followed by DDR6 (23.2 %), and DDB56 (9.7 %), respectively. The adsorption kinetics was fit well by a pseudo-first order model and the adsorption isotherms matched well the Freundlich model, for DDY3 and DDB56. Besides, the adsorption kinetics of DDR60 was fit well by a pseudo-second order model and the adsorption isotherms matched well the Langmuir model. In addition, the removal efficiency of DDY3 using



MAC (85.8 %) was higher than AC (84.3 %) and MCH (79.5 %), respectively. The standard deviation was less than 10.

To improve the adsorption of DDY3, the CH and AC were then modified using cationic (CTAB), anionic (Sodium dodecyl sulfate, SDS) or nonionic surfactant (Polyethylene glycol sorbitan monooleate, Tween80). The hydrophilic head group of SDS is smaller than that of CTAB and Tween80, respectively. It was found that the adsorption of DDY3 using SDS-modified was the highest, followed by those of CTAB-modified, and Tween80-modified, respectively. The smaller hydrophilic head group provides the higher adsorption. Additionally, the adsorption efficiency of DDY3 using surfactant-modified CH was higher than those using AC for all conditions.

Additionally, the variation of pH solution provided no effect on reactive and disperse dyes removal efficiency. Moreover, the dye removal using a fixed-bed column was preliminary studied and discussed. The adsorption of RDY145 and DDY3 using MCH, AC, and MAC were observed and compared. The column packed with MCH provided the highest RDY145 removal and that packed with AC provided the highest DDY3 removal.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรัสวดี กังสนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้และเอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำงานวิจัย รวมทั้งแนะนำแนวทางในการแก้ปัญหา กระบวนการคิด ตลอดจนตรวจทานแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ เนรมิตตวงพงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร และ รองศาสตราจารย์ ดร.ลือพงศ์ แก้วศรีจันทร์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลาและให้คำแนะนำ เพื่อใช้ในการแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ถูกต้องมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มกาแพบ้านถ้ำสิงห์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนและอนุเคราะห์วัตถุดิบ ได้แก่ เปลือกเมล็ดกาแพ

ขอขอบพระคุณ บริษัท บริษัท KPT corporation (Thailand) ที่สนับสนุนและอนุเคราะห์วัตถุดิบ ได้แก่ สีรีแอกทีฟ (Reactive yellow 145 สีแดง Reactive red 195 และสีน้ำเงิน Reactive blue 222) และสีดีสเพิร์ส (Disperse yellow 3 สีแดง Disperse red 60 และสีน้ำเงิน Disperse blue 56)

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยและคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้จัดสรรทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สนับสนุนการทำวิจัยและทุนสนับสนุนการศึกษาในระหว่างการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษาโดยตลอด ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ฉัตรสุดา โภคัยกานนท์

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(14)
รายการภาพประกอบ	(20)
คำย่อ	(24)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ตรวจสอบเอกสาร	5
2.1 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	5
2.1.1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม	5
2.1.2 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	6
2.1.3 สีย้อมผ้า (Dyes)	7
2.1.4 ความเป็นพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม	9
2.1.5 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ	10
2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	11
2.2.1 แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น	11
2.2.2 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่าน	11
2.3 ถ่านชีวภาพ (Biochar)	11
2.4 เปลือกเมล็ดกาแฟเหลือทิ้งทางการเกษตร	12
2.4.1 สายพันธุ์กาแฟ	12
2.4.2 ส่วนประกอบของผลกาแฟ	12
2.4.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดกาแฟ	13
2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	14
2.6 การดูดซับ (Adsorption)	15
2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	15
2.6.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)	16
2.7 สารลดแรงตึงผิว	16
2.7.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว	17
2.7.2 สมบัติสำคัญของสารลดแรงตึงผิว	19

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่	
2.8 การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับ	20
2.8.1 ปริมาณการดูดซับบนผิวของแข็ง	20
2.8.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ	21
2.8.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)	21
2.8.4 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.9.1 การดูดซับสีโดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	25
2.9.2 การดูดซับสารลดแรงตึงผิวด้วยตัวดูดซับจากถ่าน	26
2.9.3 การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยตัวดูดซับ (ถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร) ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว	28
2.9.4 การบำบัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไป	30
2.9.5 การบำบัดสีด้วยคอลัมน์แบบเบดนิ่ง	31
3. วิธีการวิจัย	43
3.1 วัสดุ	43
3.2 สารเคมี	43
3.3 อุปกรณ์	50
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย	52
3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับ	52
3.4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	53
3.4.3 ศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)	54
3.4.4 ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์	55
3.4.5 ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์	56
3.4.6 ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80	57
3.4.7 ศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ	58
3.4.8 ศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed column)	58
3.4.9 การประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	59

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่	
4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	61
4.1 การดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์	61
4.1.1 ผลการเตรียมตัวดูดซับ	61
4.1.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยสาร ลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)	63
4.1.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถ ในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ของถ่าน CH	67
4.1.4 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีรีแอกทีฟ	68
4.1.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีรีแอกทีฟ	68
4.1.6 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟ	69
4.1.7 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสีย สังเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH	71
4.2 การดูดซับสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์	75
4.2.1 ผลการเตรียมตัวดูดซับ	75
4.2.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถใน การดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH	77
4.2.3 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีดิสเพิร์ส	77
4.2.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส	78
4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีดิสเพิร์ส	79
4.2.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสีย สังเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH	81
4.2.7 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH และถ่าน AC ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80	85
4.3 ผลการศึกษาพีเอชในการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์ส	86
4.4 ผลการศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง	87
4.4.1 ผลการศึกษาการดูดซับสีเหลือง RDY145	87
4.4.2 ผลการศึกษาการดูดซับสีเหลือง DDY3	89
4.5 การประเมินความเข้มข้นของสียอมตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม	90
4.6 ผลการประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	91
4.6.1 ต้นทุนค่าใช้จ่ายวัสดุและสารเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	91

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4.6.2 การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์	92
5.   สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการทดลอง	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	97
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก	106
ภาคผนวก ข	115
ภาคผนวก ค	129
ภาคผนวก ง	133
ประวัติผู้เขียน	136

## รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ตัวอย่างสีย้อมกับความสามารถในการผนึกของสีบนเส้นใย	7
2-2	มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม	7
2-3	สารองค์ประกอบเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดกาแฟ	13
2-4	สรุปสถานะในขั้นตอนต่างๆ ของการดูดซับแบบกะจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
2-5	สรุปสถานะในขั้นตอนต่างๆ ของการบำบัดสีดีสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
2-6	สรุปสถานะในขั้นตอนต่างๆ ของการดูดซับในคอลัมน์แบบเบดนิ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
3-1	คุณสมบัติของสีรีแอคทีฟ สีดีสเพิร์สและสารลดแรงตึงผิว	45
4-1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของถ่าน CH และถ่าน AC	62
4-2	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง	67
4-3	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีรีแอคทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง	69
4-4	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริชจากการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีรีแอคทีฟ 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	70
4-5	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง	72
4-6	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ	73

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-7	ค่า $q_{max}$ ของการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ จากการทำนายด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	74
4-8	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของถ่าน CH และถ่าน AC	76
4-9	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 36 ชั่วโมง	78
4-10	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริชจากการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ	80
4-11	จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 96 ชั่วโมง	82
4-12	แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ	83
4-13	ค่า $q_e$ ของสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ จากการทำนายด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งหรือสองของการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	84
4-14	ประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดีสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์ กับความเข้มข้นของสีย้อมภายหลังการดูดซับในหน่วย ADMI ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC	90
4-15	ราคาและปริมาณวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC 1 กรัม	91
4-16	ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC	92



### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-17	ประสิทธิภาพและต้นทุนการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC	93
4-18	ความเข้มข้นของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ที่เข้าและออกจากระบบ	93
4-19	ปริมาณถ่านที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3	93
ก-1	ค่าการดูดกลืนแสงของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ	106
ก-2	กราฟมาตรฐานซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ	107
ก-3	ค่าการดูดกลืนแสงของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	108
ก-4	ค่าการดูดกลืนแสงของสีเหลือง RDY145 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	109
ก-5	ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดง RDR195 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	110
ก-6	ค่าการดูดกลืนแสงของสีน้ำเงิน RDB222 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	111
ก-7	ค่าการดูดกลืนแสงของสีเหลือง DDY3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	112
ก-8	ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดง DDR60 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	113
ก-9	ค่าการดูดกลืนแสงของสีน้ำเงิน DDB56 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	114
ข-1	ค่า $q$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 10 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	115
ข-2	ค่า $C$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH และร้อยละการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง	115
ข-3	ค่า $C_e$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และค่า $q_e$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง	116
ข-4	ค่า $C$ ของเหลือง RDY145 บนถ่าน CH ถ่าน MCH และร้อยละการดูดซับของสีเหลือง RDY145 ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	116

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-5	ค่า $q$ ของสีรีแอคทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีรีแอคทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	116
ข-6	ค่า $C_e$ ของสีรีแอคทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) กับค่า $q_e$ ของสีรีแอคทีฟบนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีรีแอคทีฟ 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	117
ข-7	ค่า $q$ ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	118
ข-8	ค่า $C_e$ ของสีเหลือง RDY145 กับค่า $q_e$ ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ	118
ข-9	ค่า $C$ ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน CH ถ่าน MCH และร้อยละการดูดซับของ สีเหลือง DDY3 ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ ถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	119
ข-10	ค่า $q$ ของสีดีสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	119
ข-11	ค่า $C_e$ ของสีดีสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) กับ ค่า $q_e$ ของสีดีสเพิร์สบนถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 4 และ 3 ชั่วโมงสำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ	120
ข-12	ค่า $q$ ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่า ที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	121

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-13	ค่า $C_e$ ของสีเหลือง DDY3 กับค่า $q_e$ ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมงสำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ	122
ข-14	ร้อยละการดูดซับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิว 10 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง	122
ข-15	ค่า C และร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วย สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิว ชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ณ สภาวะ $C_0$ ของ สีเหลือง DDY3 เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและ เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	123
ข-16	ค่า C กับร้อยละการดูดซับของสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน MCH และการดูดซับ สีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 9 ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เท่ากับ 700 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ตามลำดับ	123
ข-17	ค่า $C_e$ ต่อ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์ แบบเบดนิ่ง ด้วยถ่าน AC ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิลิตรต่อนาที	123
ข-18	ค่า $C_e$ ต่อ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์ แบบเบดนิ่ง ด้วยถ่าน MAC ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิลิตรต่อนาที	124
ข-19	ค่า $C_e$ ต่อ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์ แบบเบดนิ่ง ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิลิตรต่อนาที	125

### รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ข-20 ค่า <math>C_e</math> ต่อ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่งด้วยถ่าน AC ณ สภาวะ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้องและอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิตรต่อนาที</p>	126
<p>ข-21 ค่า <math>C_e</math> ต่อ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน MAC ณ สภาวะ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้องและอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิตรต่อนาที</p>	127
<p>ข-22 ค่า <math>C_e</math> ต่อ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ <math>C_0</math> ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิตรต่อนาที</p>	127

## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1-1	4
2-1	9
2-2	9
2-3	12
2-4	13
2-5	16
2-6	17
2-7	17
2-8	18
2-9	18
2-10	19
2-11	19
2-12	20
3-1	43
3-2	47
3-3	48
3-4	49
3-5	50
3-6	50
3-7	50
3-8	51
3-9	51
3-10	51
3-11	52
3-12	53
3-13	54
3-14	54
3-15	56
3-16	57

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
3-17 หน่วยปฏิบัติการคอลลิมน์แบบเบตนิ่ง	58
3-18 แผนผังสรุปวิธีการทดลอง	60
4-1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>CH</u> ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	61
4-2 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>CH</u> หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	61
4-3 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>AC</u> ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	62
4-4 เวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ $C_0$ 10 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	63
4-5 ปริมาณการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH (C) ณ สภาวะ $C_0$ ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง (ข) ร้อยละการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH	65
4-6 ผลของเวลาในการดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	68
4-7 เวลาการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	71
4-8 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>CH</u> ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	75
4-9 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>CH</u> หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	76
4-10 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน <u>AC</u> ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	77
4-11 ผลของเวลาในการดูดซับสีดีสเพิร์สสามชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	78

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า
4-12	81
เวลาการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ $C_0$ ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที	
4-13	85
ร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (ถ่าน + CTAB) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS (ถ่าน + SDS) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 (ถ่าน + Tween80) ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	
4-14	86
ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 9 ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เท่ากับ 700 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ตามลำดับ	
4-15	88
กราฟเบรคทรูจ์การดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้องและอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิลิตรต่อนาที	
4-16	89
กราฟเบรคทรูจ์การดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ $C_0$ ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้องและอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิลิตรต่อนาที	
ก-1	106
กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB	
ก-2	107
กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS	
ก-3	108
กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80	
ก-4	109
กราฟมาตรฐานของสีเหลือง RDY145	
ก-5	110
กราฟมาตรฐานของสีแดง RDR195	
ก-6	111
กราฟมาตรฐานของสีน้ำเงิน RDB222	
ก-7	112
กราฟมาตรฐานของสีเหลือง DDY3	
ก-8	113
กราฟมาตรฐานของสีแดง DDR60	
ก-9	114
กราฟมาตรฐานของสีน้ำเงิน DDB56	
ง-1	133
ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่	หน้า	
ง-2	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	134
ง-3	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	134
ง-4	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย $ZnCl_2$ ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	134
ง-5	ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน AC ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า	135



**คำย่อ**

AC	=	Activated carbon
ADMI	=	American Dye Manufacturers Institute
BET	=	Surface area and porosity analyzer (BET)
CH	=	Coffee husk biochar
CTAB	=	Cetyltrimethylammonium bromide
DDB56	=	Disperse blue 56
DDR60	=	Disperse red 60
DDY3	=	Disperse yellow 3
HCl	=	Hydrochloric acid
MAC	=	Modified activated carbon
MCH	=	Modified coffee husk biochar
N <sub>2</sub>	=	Nitrogen gas
NaOH	=	Sodium hydroxide
RDB222	=	Reactive blue 222
RDR195	=	Reactive red 195
RDY145	=	Reactive yellow 145
SDS	=	Sodium dodecyl sulfate
SEM	=	Scanning Electron Microscope
Tween80	=	Polyethylene glycol sorbitan monooleate
ZnCl <sub>2</sub>	=	Zinc chloride

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 บทนำต้นเรื่อง

การเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ก่อให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจมหาศาล แต่ในขณะเดียวกันก็ก่อให้เกิดของเสียจากกระบวนการซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในขั้นตอนการฟอกสีหรือการย้อมผ้าซึ่งต้องอาศัยการใช้น้ำเป็นปริมาณมากในกระบวนการ อันก่อให้เกิดมลพิษกระทบต่อแหล่งน้ำบริเวณใกล้โรงงาน ทั้งการปนเปื้อนของโลหะหนักและสีย้อม การขาดการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อมนุษย์ ตลอดจนพืชหรือสัตว์ที่อยู่อาศัยบริเวณดังกล่าวและสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงโรงงาน ก่อให้เกิดผลเสียทั้งทางด้านสุขภาพ สังคม และเศรษฐกิจ

สีย้อมที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ สีย้อมชนิดประจุลบ อาทิ สีแอสิด (Acid dyes) สีไดเรกต์ (Direct dyes) และ สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นต้น สีย้อมชนิดประจุบวก อาทิ สีเบสิก (Basic dyes) เป็นต้น และสีย้อมชนิดไม่มีประจุ อาทิ สีดีสเพิร์ส (Dispersed dyes) เป็นต้น (Ghazi Mokri และคณะ, 2015) ซึ่งน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีสีย้อมปนเปื้อนมากับน้ำ จำเป็นต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมมีความเป็นพิษสูงหรือเป็นสารที่อาจก่อโรคมะเร็งได้ โดยเฉพาะสีรีแอคทีฟและสีดีสเพิร์ส ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกและพันธะอะโซ (Azo, -N=N-) (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2560)

การบำบัดสีย้อมเหล่านี้ในน้ำเสียอาจทำได้หลายวิธี อาทิ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation) การบำบัดด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment) การใช้โอโซนบำบัด (Ozone treatment) และการกรองด้วยเมมเบรน (Membrane technology) เป็นต้น (พงษ์ศักดิ์, 2555) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดสีย้อมได้หมดในการบำบัดเพียงครั้งเดียว เนื่องจากสีย้อมมีคุณสมบัติละลายน้ำได้สูงและย่อยสลายตามธรรมชาติได้ยาก และเป็นการบำบัดที่ใช้ต้นทุนสูง

ปัจจุบันกระบวนการดูดซับนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูง ใช้ต้นทุนในการบำบัดต่ำกว่าแบบอื่นที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สารดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) แต่ในการนำมาใช้งานยังมีข้อจำกัด เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และยังมีการนำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีการศึกษาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ขุยมะพร้าว ฟางข้าว หรือถ่านจากการเผาชีวมวลมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อทดแทนถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะการนำชีวมวลมาผ่านการเผา ได้เป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมสำหรับการเป็นตัวดูดซับ คือ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง ทำให้ถ่านชีวภาพเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารพิษ ไอออนโลหะหนัก หรือสีย้อมได้ดี (Salleh และคณะ, 2011)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการใช้ประโยชน์จากถ่านชีวภาพซึ่งได้จากการเผาเปลือกเมล็ดกาแฟมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีรีแอคทีฟและสีดีสเพิร์สในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม

พอกย์อม เนื่องจากในประเทศไทยมีการปลูกกาแฟเป็นจำนวนมากถึง 30,000 ตันต่อปี (Sirichai, 2561) โดยเฉพาะภาคใต้ของไทยปลูกมากถึงร้อยละ 98 ของกาแฟที่ปลูกในประเทศไทย ทำให้เปลือกกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก (อดุลย์, 2554) รวมทั้งองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดกาแฟ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงถึงร้อยละ 40 และปริมาณเถ้าต่ำถึงร้อยละ 1.5 เป็นต้น องค์ประกอบดังกล่าวทำให้เปลือกเมล็ดกาแฟเหมาะที่จะนำไปผลิตถ่านเพื่อทำการดูดซับได้ดี (Gonçalves และคณะ, 2013)

นอกจากนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟสามารถทำได้โดยการนำถ่านมาผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวซึ่งไม่มีขั้ว (ไม่ชอบน้ำ) สามารถดูดซับถ่านในส่วนที่ไม่มีขั้ว ตลอดจนสารไม่มีขั้ว เช่น สีสฟีนีลในสารละลายได้ และส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นส่วนมีขั้ว (ประจุบวก) สามารถดูดซับสารที่มีประจุได้ดี เช่น สีรีแอคทีฟซึ่งเป็นสีย้อมชนิดประจุลบ ทำให้การปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอคทีฟและสีดีสเพิร์สออกจากน้ำเสียให้ดียิ่งขึ้นได้ อีกทั้งวิธีการนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟและสารลดแรงตึงผิวสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Puasa และคณะ, 2018)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจนำถ่าน ซึ่งได้จากการเผาเปลือกเมล็ดกาแฟ มาปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก และทำการดูดซับสีย้อม 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสีรีแอคทีฟ ได้แก่ สีเหลือง Reactive yellow 145 (RDY145) สีแดง Reactive red 195 (RDR195) และสีน้ำเงิน Reactive blue 222 (RDB222) เป็นต้น และกลุ่มสีดีสเพิร์ส ได้แก่ สีเหลือง Disperse yellow 3 (DDY3) สีแดง Disperse red 60 (DDR60) และสีน้ำเงิน Disperse blue 56 (DDB556) ซึ่งเป็นกลุ่มสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพอกย์อมคิดเป็นร้อยละ 60 ของอุตสาหกรรมพอกย์อมทั้งหมด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) พร้อมทำการศึกษาคณสมบัติเบื้องต้นของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟทั้งก่อนและหลังปรับปรุงสภาพ ตลอดจนศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีทั้งสองกลุ่มกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า และทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พร้อมอธิบายกลไกการดูดซับด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาการดูดซับสีย้อมเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed column)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการดูดซับสีย้อม 2 กลุ่ม ได้แก่ สีรีแอคทีฟ และสีดีสเพิร์ส ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านซึ่งได้จากการเผาเปลือกเมล็ดกาแฟ
2. เพื่อศึกษาคณสมบัติเบื้องต้นของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟทั้งก่อนและหลังการกระตุ้นรูพรุนถ่านด้วยวิธีเชิงเคมี (Chemical activation)
3. ศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟหลังกระตุ้นด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้งสองกลุ่มกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า พร้อมประเมินจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและกลไกการดูดซับด้วยเส้นสมการไอโซเทอมของการดูดซับ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟก่อนและหลังกระตุ้นโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และถ่านกัมมันต์ทางการค้า ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET) รวมทั้งศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่านจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

2. ศึกษาเวลาและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) เพื่อการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ และถ่านกัมมันต์ทางการค้า พร้อมประเมินจลนพลศาสตร์และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับของสารลดแรงตึงผิว

3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม 2 กลุ่ม ได้แก่ สีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) และสีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) ของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ได้แก่ เวลาในการดูดซับ ความเข้มข้นของสีย้อมและค่าพีเอช (pH) พร้อมประเมินจลนพลศาสตร์และแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ

4. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 กลุ่ม ของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟก่อนและหลังที่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก และถ่านกัมมันต์ทางการค้า

5. ศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟและถ่านกัมมันต์ทางการค้า ในการดูดซับสีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ สีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เป็นต้น

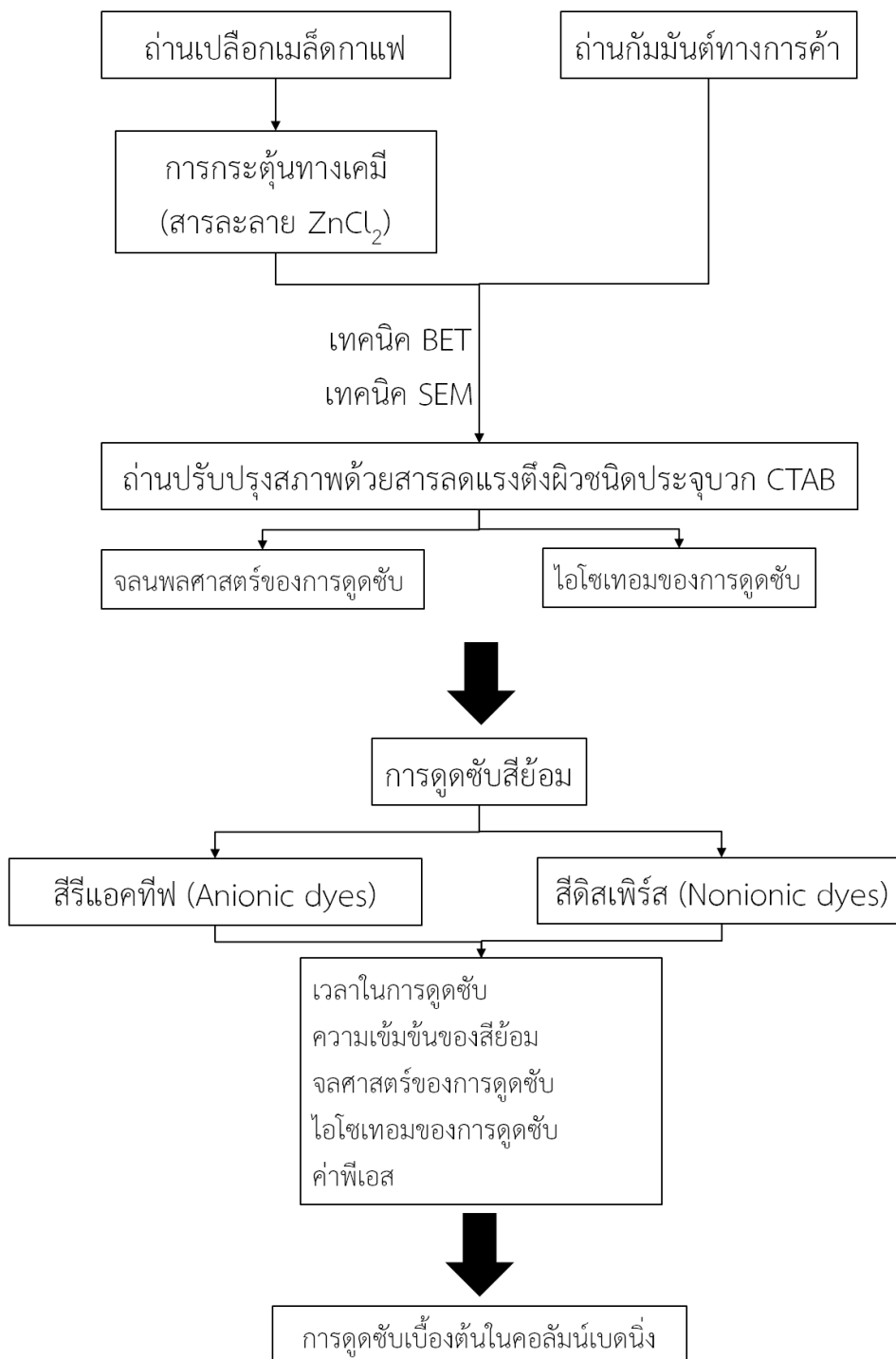
แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัยแสดงดังภาพประกอบที่ 1-1

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการนำเปลือกเมล็ดกาแฟมาดัดแปลงเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำ

2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ โดยเฉพาะในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม

### แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัย



ภาพประกอบที่ 1-1 แผนผังสรุปขอบเขตของงานวิจัย

## บทที่ 2

### ตรวจสอบเอกสาร

#### 2.1 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

น้ำเสีย คือ น้ำที่มีสารปนเปื้อนหรือสิ่งปนเปื้อนที่ไม่พึงปรารถนาปนเปื้อนอยู่ ทำให้คุณสมบัติของน้ำเปลี่ยนไปจนไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำนั้นได้ แหล่งที่มาของน้ำเสียสามารถแบ่งเป็น 2 แหล่ง ได้แก่ แหล่งน้ำเสียจากชุมชน และแหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นแหล่งน้ำเสียร้อยละ 25 ของปริมาณน้ำเสียทั้งหมดที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม แม้จะไม่มากแต่สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียเป็นพวกสารพิษหรือสารเคมีพวกโลหะหนักและสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง (พงษ์ศักดิ์, 2555) และโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นโรงงานที่มีมากถึงร้อยละ 50 ของโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหมด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) ดังนั้นแหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มาจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอก็เป็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอเป็นโรงงานที่ใช้ น้ำเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต โดยอาจมากถึง 1,300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ไพฑิพย์ และคณะ, 2544) โดยน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต แสดงดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมในอุตสาหกรรม (สายรุ้ง, 2554) ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอน มีการใช้น้ำในการดำเนินการ ทำให้มีน้ำเสียเกิดขึ้นในกระบวนการเป็นจำนวนมาก

##### 2.1.1.1 กระบวนการเตรียมผ้าก่อนย้อม

เป็นขั้นตอนที่ช่วยกำจัดสิ่งปนเปื้อนในเส้นใย ทำให้เส้นใยสะอาดมากขึ้น ในกระบวนการนี้ประกอบด้วย

- การเผาขน (Singeing) เส้นด้ายที่โผล่เหนือพื้นผิวด้วยเปลวแก๊ส
- การลอกแป้ง (Desizing) ที่เคลือบเส้นใยเนื่องจากแป้งมีผลต่อการดูดซึมน้ำและสารเคมีต่างๆ ในกระบวนการฟอกย้อม
- การกำจัดสิ่งสกปรก (Scouring) ได้แก่ ไขมันหรือสารปนเปื้อนต่างๆ เพื่อให้การดูดซึมน้ำดีขึ้น ทำให้การดูดติดสีย้อมเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ
- การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการกำจัดสีที่ติดมากับเส้นใยด้วยกระบวนการทางเคมี ทำให้เส้นใยขาวขึ้น เมื่อนำไปย้อมสีอ่อนทำให้สีติดได้ดี
- การซุบมัน (Mercerization) เพื่อกำจัดไขมันหรือแป้งออกให้หมด เส้นใยเป็นเงามันสามารถดูดซึมน้ำและย้อมติดสีได้ดีขึ้น

ขั้นตอนนี้ทำให้เกิดน้ำเสีย 150 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่อัตราการเกิดน้ำเสีย 5 ลูกบาศก์เมตรต่อผ้าพื้นหลา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

### 2.1.1.2 กระบวนการย้อมสี (Dyeing)

เป็นการใช้สารเคมีทำให้เกิดสีบนเส้นใยอย่างถาวร เป็นขั้นตอนที่เกิดน้ำเสีย 220 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่อัตราการเกิดน้ำเสีย 7.4 ลูกบาศก์เมตรต่อผ้าพื้นหลา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

### 2.1.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

เป็นการเพิ่มคุณสมบัติให้กับเส้นใยภายหลังการฟอกย้อม เช่น ความเงามัน และความนุ่มของเส้นใย เป็นต้น ขั้นตอนนี้ทำให้เกิดน้ำเสีย 3 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ที่อัตราการเกิดน้ำเสีย 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อผ้าพื้นหลา (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการฟอกย้อมดังกล่าว ก่อนเข้าสู่กระบวนการบำบัดจะมีลักษณะของน้ำเสียแสดงดังต่อไปนี้

### 2.1.2 ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ มีสารเคมีปนเปื้อนจากการใช้สารเคมีในกระบวนการฟอกย้อม ซึ่งน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจะมีการตรวจวัดค่าต่างๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ได้แก่

- ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) เป็นค่าที่บอกถึงความสกปรกของน้ำเสีย ซึ่งคิดจากปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน ส่วนใหญ่มาจากกระบวนการลอกแป้ง ซึ่งค่าบีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีค่าประมาณ 110 - 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) เป็นค่าที่บอกถึงความสกปรกของน้ำเสีย คิดจากปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจาก สีย้อม แป้ง เส้นใย และสารตกแต่ง เป็นต้น ซึ่งค่าซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีค่าประมาณ 300 - 713 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) เป็นปริมาณของแข็งทั้งหมด เช่น เศษเส้นใย ที่ได้จากการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Whatman GC/C) ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอมีค่าประมาณ 43 - 140 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เกิดจากการใช้กรดและด่าง ได้แก่ กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เป็นต้น ในขั้นตอนการทำมาดสะอาด การฟอกขาวหรือย้อมสี ซึ่งค่านี้มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำ น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีค่าพีเอชประมาณ 7 - 9

- สีในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยที่ใช้ในการย้อม เนื่องจากสีแต่ละชนิดมีความสามารถในการผนึกกับเส้นใยที่ต่างกัน ถ้าสีสามารถย้อมติดบนเส้นใยได้ดี จะมีปริมาณสีในน้ำเสียต่ำ ตัวอย่างสีย้อมกับความสามารถในการผนึกของสีบนเส้นใยแสดงดังตารางที่

**ตารางที่ 2-1** ตัวอย่างสีย้อมกับความสามารถในการผนึกของสีบนเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

ชนิดของสีย้อม	ร้อยละของความสามารถในการผนึกของสีกับเส้นใย	ร้อยละของสีในน้ำเสีย
สีดีสเพิร์ส (Disperse dyes)	80 - 92	8 - 20
สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes)	50 - 80	20 - 50
สีไดเรกต์ (Direct dyes)	70 - 95	5 - 30
สีแอซิด (Acid dyes)	80 - 93	7 - 20
สีเบสิก (Basic dyes)	97 - 98	2 - 3

ปัจจุบันกรมโรงงานอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษ ได้กำหนดมาตรฐานสีในน้ำทิ้งของประเทศไทย โดยมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ แสดงดังตารางที่ 2-2

**ตารางที่ 2-2** มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560)

ดัชนีวิเคราะห์	มาตรฐานน้ำทิ้งปัจจุบัน
บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 20
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 120
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้อยกว่า 50
พีเอช	5.5 - 9
ปริมาณสี (ADMI)	300

โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอแต่ละแห่งมีการใช้สีย้อมที่ต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินงาน ทำให้สีย้อมที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอแบ่งออกได้หลายชนิด แสดงดังต่อไปนี้

### 2.1.3 สีย้อมผ้า (Dyes)

สีย้อมเป็นสารเคมีที่ผ่านการสกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินได้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน (Benzene) ไซลีน (Xylene) โทลูอีน (Toluene) แอนทราซีน (Anthracene) และพาราฟิน (Paraffin) เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวจะถูกนำมาเปลี่ยนด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อนำไปทำสีย้อมต่อไป ประเภทของสีย้อมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามแหล่งกำเนิดของสีย้อม (พงษ์ศักดิ์, 2555) คือ

**2.1.3.1 สีย้อมธรรมชาติ** เป็นสีย้อมที่ได้จากธรรมชาติ ได้จากส่วนประกอบของพืชหรือสัตว์ เช่น สีแดงจากส่วนของเปลือกสีฟริกสด เป็นต้น

**2.1.3.2 สีย้อมสังเคราะห์** เป็นสีย้อมที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นทางเคมี สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชนิด ตามประจุที่แสดงบนสีย้อม (Ghazi Mokri และคณะ, 2015) คือ



### สีย้อมชนิดประจุบวก (Cationic dyes) ได้แก่

- **สีเบสิก (Basic Dyes)** เป็นเกลือของด่างอินทรีย์สามารถละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส ต้องใช้สารช่วยติด (Mordant) เพื่อให้เส้นใยเซลลูโลสก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน สารช่วยติดจึงเป็นเสมือนสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สีเบสิกเป็นสีที่มีความสดใส แต่ไม่ทนแสง (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2018)

### สีย้อมชนิดประจุลบ (Anionic dyes) ได้แก่

- **สีแอซิด (Acid Dyes)** เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งเกิดจากสารประกอบอินทรีย์สีประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน สามารถใช้ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่เป็นกรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น เส้นใยโพลีเอไมด์ (Polyamide) ป่าน และปอ เป็นต้น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2018)

- **สีไดเรกต์ (Direct Dyes)** บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย เนื่องจากสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด มีมวลโมเลกุลสูง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (Azo) มีหมู่กรดซัลโฟนิคทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2018)

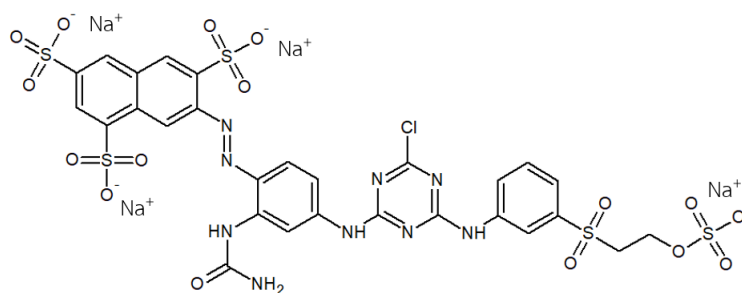
- **สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)** เป็นสีที่สามารถละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีความเป็นด่าง เป็นสีย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุดโดยโมเลกุลของสีจะจับกับหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลสสีรีแอคทีฟแบ่งเป็นกลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิ (Temperature, T) สูง 70 - 75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ให้สีที่สดใสติดทนนานในทุกสภาวะ โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอคทีฟ ประกอบด้วย 4 กลุ่ม ตามกลุ่มโครงสร้างทางเคมีในสีย้อม (พงษ์ศักดิ์, 2555) ได้แก่

- กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophoric group) เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และเป็นกลุ่มที่สร้างแรงยึดเกาะกับเส้นใยเซลลูโลส

- กลุ่มเคมีรีแอคทีฟ (Reactive group) เป็นกลุ่มที่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับกลุ่มไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) ในเส้นใย

- กลุ่มเคมีที่เป็นตัวเชื่อม (Bridging group) เป็นกลุ่มที่เชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟและโครโมฟอร์ ได้แก่ หมู่  $-\text{NH}$ ,  $-\text{NHCO}$ ,  $-\text{SO}_2$ ,  $-\text{NCH}_3$  และ  $-\text{NHSO}_3$  เป็นต้น

- กลุ่มเคมีที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง (Solubilising group) เป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์ โดยทั่วไปจะเป็นสารกลุ่มซัลโฟนิค ( $-\text{SO}_3\text{Na}$ ) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสี Reactive yellow145 แสดงดังภาพประกอบที่ 2-1

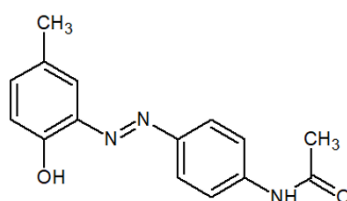


ภาพประกอบที่ 2-1 สีเหลือง Reactive yellow 145

(ที่มา: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/157317#section=Top>, สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2561)

### สีย้อมชนิดไม่มีประจุ (Nonionic dyes) ได้แก่

- สีดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose acetate) ไนลอน และใช้ย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ได้ด้วย เนื่องจากเส้นใยดังกล่าวดูดน้ำได้น้อย คุณสมบัติของสีดิสเพิร์ส เป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดีหากถูกควั่นหรือก๊าชบางชนิดจะทำให้สีซีดได้ง่าย และเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมาก ลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ที่เหมาะสม สามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น โครงสร้างทางเคมีของสีดิสเพิร์สประกอบด้วย 2 กลุ่ม ตามกลุ่มโครงสร้างทางเคมีในสีย้อม ได้แก่ กลุ่มอะโซ (Azo, -N=N-) และกลุ่มอะมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ทั้งสองกลุ่มเป็นอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanolamine,  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสีดิสเพิร์ส (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-2 สีเหลือง Disperse yellow 3

(ที่มา: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/disperseyellow326930283240811?lang=en&region=TH>, สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2561)

#### 2.1.4 ความเป็นพิษของสีย้อมต่อสิ่งแวดล้อม

การปล่อยสีย้อมที่ปล่อยออกจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอส่วนใหญ่มีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งระดับความเข้มข้นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ที่ 0.1 - 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร สีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แม้จะมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำน้อย แต่การปล่อยสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำทำให้แหล่งน้ำสกปรกเนื่องจากสีย้อมจะคอยขัดขวางทางเดินของแสงในน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่ได้รับการสังเคราะห์ด้วยแสง และทำให้ค่าออกซิเจนในน้ำลดลง ทั้งพืชและสัตว์ที่

อาศัยในแหล่งน้ำขาดออกซิเจนเกิดการตายและเน่าเปื่อย ทำให้เกิดความไม่สวยงามด้านทัศนียภาพของแหล่งน้ำ (พงษ์ศักดิ์, 2555)

นอกจากนั้นของเสียยังมีโลหะบางชนิดที่ปนเปื้อนในเสีย เช่น ตะกั่ว ทองแดง โครเมียม และสังกะสี เป็นต้น (พงษ์ศักดิ์, 2555) ถึงแม้จะมีไม่มาก แต่ก็ส่งผลกระทบต่อความไม่เหมาะสมในการดำรงชีวิตในแหล่งน้ำ ดังนั้นโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้งแม้จะมีความเป็นพิษน้อยก็ตาม

สีรีแอคทีฟและสตีสเพิร์สเป็นเสียนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งมีวงอะโรมาติก (Aromatic) และพันธะอะโซ (-N=N-) ทำให้การบำบัดเสียดังกล่าวทำได้ยากเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ที่ค่อนข้างจำเพาะ ใช้พลังงานในการดำเนินงานสูงหรือต้องมีการควบคุมสภาวะของระบบให้ดำเนินการอย่างคงที่ หากการกำจัดที่ไม่ถูกต้องอาจเกิดของเสียเพิ่มขึ้นได้ (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2560) ดังนั้นเสียทั้งสองชนิดจึงเป็นสีที่จำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ

### 2.1.5 การกำจัดเสียในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ

การกำจัดเสียในน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า ในโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ไม่ว่าจะเป็นการบำบัดทางเคมี หรือการบำบัดทางชีวภาพ ได้แก่

**2.1.5.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical coagulation)** เป็นการบำบัดที่ต้องใช้สารเคมีหรือสารสร้างตะกอน (Coagulant) เช่น สารส้ม สารโพลูอิเล็กโทรไลต์ และปูนขาว เป็นต้น เมื่อควนผสมสารดังกล่าวกับน้ำเสียที่มีตะกอนแขวนลอยต่างๆ ทำให้เกิดการรวมตะกอน (Flocculation) ระหว่างสารเคมีกับตะกอนแขวนลอยจนตะกอนมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) การกำจัดสีด้วยวิธีการนี้เหมาะกับการกำจัดสีที่ละลายน้ำได้ยาก เช่น สตีสเพิร์ส ซึ่งการกำจัดด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพให้การกำจัดสูงร้อยละ 90 – 98 แต่การกำจัดทำให้เกิดกากตะกอน ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อกำจัดกากตะกอนดังกล่าว และไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของเสียสูง (สายรุ้ง, 2554)

**2.1.5.2 การบำบัดด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment)** เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดี นิยมใช้กำจัดสีรีแอคทีฟ เนื่องจากสามารถใช้บำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้ และเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยแต่เป็นการสิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดตะกอนเหล็กออกไซด์ (สายรุ้ง, 2554)

**2.1.5.3 การใช้โอโซนบำบัด (Ozone treatment)** เป็นการกำจัดเสียในน้ำเสียโดยใช้โอโซน ( $O_3$ ) เป็นตัวออกซิไดซิงเอเจนต์ในการทำปฏิกิริยากับเสีย การบำบัดใช้เวลาตั้งแต่โอโซนเป็นสารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (สายรุ้ง, 2554)

**2.1.5.4 การกรองด้วยเมมเบรน (Membrane technology)** เป็นการบำบัดด้วยแผ่นเยื่อกระดาษ (Membrane) กรองแยกสิ่งสกปรกขนาดเล็ก ซึ่งการกรองดังกล่าวมีวิธี เช่น การกรองผ่านเยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับ การกรองผ่านเยื่อกรองอัลตราฟิลเตรชัน การกรองผ่านเยื่อกรองไมโครฟิลเตรชัน การกรองผ่านเยื่อกรองนาโนฟิลเตรชัน เป็นต้น การบำบัดด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงแต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูงเช่นกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

**2.1.5.5 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์** เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดเนื่องจากใช้ต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพแต่การนำถ่านกลับมาใช้ใหม่อาจต้องฟื้นฟูด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

การกำจัดน้ำเสียมีหลายวิธี ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น หนึ่งในวิธีดังกล่าวที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากใช้ต้นทุนในการดำเนินการต่ำ ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การดูดซับ (Adsorption) โดยใช้ถ่านกัมมันต์

## 2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ คือ ถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ซึ่งโดยทั่วไปผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีสภาพไม่มีขี้ว ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่ได้จากการนำวัตถุดิบทางธรรมชาติที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มาผ่านการก่อกัมมันต์เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น (ศิษฏาภรณ์, 2550) ชนิดของถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งได้หลายหลักเกณฑ์ ดังนี้

### 2.2.1 แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นถ่านที่ใช้ก๊าซในการกระตุ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และออกซิเจน เป็นต้น

- การกระตุ้นทางเคมี เป็นถ่านที่ใช้สารเคมีในการกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

### 2.2.2 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่าน

- ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง นิยมใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับก๊าซ เช่น การดูดซับก๊าซ

- ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ นิยมใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับของเหลว เช่น การบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการผลิตถ่านจากชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรแทนถ่านกัมมันต์ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากขึ้นเนื่องจากการช่วยลดค่าใช้จ่ายและสร้างมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งอีกด้วย

## 2.3 ถ่านชีวภาพ (Biochar)

ถ่านชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อนโดยไม่ใช้ออกซิเจน โดยเป็นวัสดุที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นหลักร้อยละ 30 - 50 นอกจากนั้นเป็นสารระเหยร้อยละ 20 - 30 และเศษเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.5 - 5 ถ่านมีค่าความร้อนเฉลี่ย 28 - 33 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สามารถนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิง และมีความพรุนสูงจึงสามารถนำไปเป็นวัสดุดูดซับ อาทิ การดูดซับสีย้อมในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ สามารถใช้ถ่านชีวภาพในการจัดการของเสียแทนถ่านกัมมันต์ได้ ตัวอย่างถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ฟางข้าวโพด ขุยมะพร้าว ทะลายปาล์มและอื่นๆ เป็นต้น (Cao และคณะ, 2011)

ดังนั้นงานวิจัยจึงสนใจนำถ่านชีวภาพมาใช้เป็นตัวดูดซับในการศึกษากระบวนการบำบัด สีย้อม ได้แก่ สีรีแอกทีฟและสีดีสเพิร์ส เป็นต้น ถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นถ่านที่ได้จากการเผาเปลือกเมล็ด กาแฟ

## 2.4 เปลือกเมล็ดกาแฟเหลือทิ้งทางการเกษตร

### 2.4.1 สายพันธุ์กาแฟ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่นิยมปลูกกันทั่วโลก ผลผลิตกาแฟทั่วโลกจะอยู่ที่ประมาณ 8 ล้านตันต่อปี และในประเทศไทยมีผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 30,000 ตันต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสายพันธุ์ โรบัสต้าที่ปลูกมากทางภาคใต้ คิดเป็นร้อยละ 98 ของกาแฟในประเทศไทยทั้งหมด (อดุลย์, 2554; Sirichai, 2561) และสายพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมี 2 สายพันธุ์ คือ

**2.4.1.1 โรบัสต้า (Robusta)** เป็นสายพันธุ์ที่ดูแลง่าย เจริญเติบโตได้ทุกสภาพ อากาศ ทนแดดทนฝน และเติบโตได้ดีในพื้นที่ราบซึ่งทางภาคใต้ประเทศไทยนิยมปลูกกันมาก ผล กาแฟสายพันธุ์นี้จะมีรูปทรงกลมและเส้นตรงกลางตรง

**2.4.1.2 อราบิก้า (Arabica)** เป็นสายพันธุ์ที่หาได้ยาก การปลูกและดูแลยุ่งยาก กว่าสายพันธุ์โรบัสต้า ต้องปลูกในแถบอากาศหนาวที่อุณหภูมิไม่เกิน 24 องศาเซลเซียส บนที่ราบสูง ซึ่งสูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง 1,300 เมตรขึ้นไป ผลกาแฟจะมีรูปทรงรี เส้นตรงกลางคด ลักษณะ ผลกาแฟทั้ง 2 สายพันธุ์ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-3

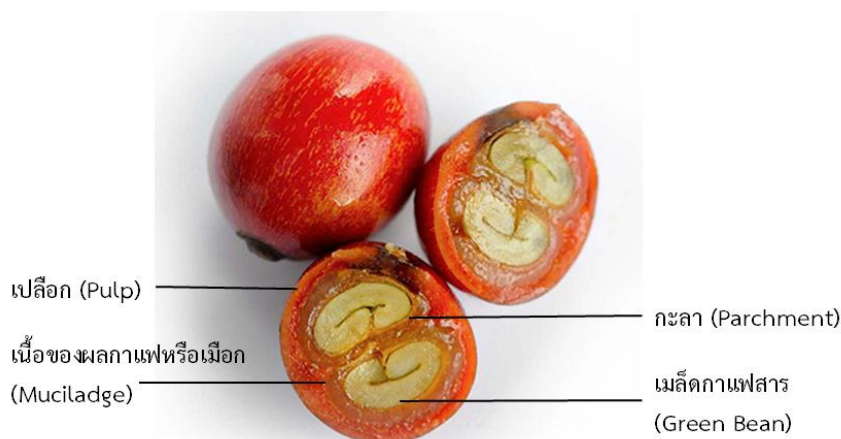


ภาพประกอบที่ 2-3 ผลกาแฟสายพันธุ์อราบิก้าและโรบัสต้า

(ที่มา: <http://pollards.com/difference-between-arabica-and-robusta-coffee-beans/>, สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2561)

### 2.4.2 ส่วนประกอบของผลกาแฟ

ผลกาแฟ หรือ ผลเชอร์รี่ ประกอบด้วย 4 ส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เปลือก (Pulp) เนื้อของผลกาแฟหรือเมือก (Mucilage) กะลา (Parchment) และเมล็ดกาแฟสาร (Green Bean) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-4



ภาพประกอบที่ 2-4 ส่วนประกอบของผลกาแฟ

(ที่มา: <http://suzuki-coffee.com>, สืบค้นเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2561)

เมล็ดกาแฟสารคือส่วนที่นำไปผลิตกาแฟ แต่ส่วนเปลือกกาแฟและส่วนอื่นๆ เป็นส่วนที่ทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากส่วนที่เรียกว่า เปลือกของกาแฟ (สายพันธุ์โรบัสต้า)

### 2.4.3 คุณสมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดกาแฟ

คุณสมบัติเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดกาแฟ ได้แก่ คาร์บอนคงตัว ปริมาณไฮโดรเจน ปริมาณออกซิเจนและปริมาณเถ้า แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สารองค์ประกอบเบื้องต้นของเปลือกเมล็ดกาแฟ (Gonçalves และคณะ, 2013)

สารองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดกาแฟ	ร้อยละ
คาร์บอนคงตัว	40.0
ไฮโดรเจน	6.0
ออกซิเจน	50.0
เถ้า	1.5
สารระเหยอื่นๆ	2.5

จากตารางที่ 2-3 เปลือกเมล็ดกาแฟมีปริมาณคาร์บอนคงตัวที่สูงและปริมาณเถ้าต่ำ จึงเหมาะที่จะนำไปผลิตถ่านชีวภาพได้ แต่การผลิตถ่านชีวภาพดังกล่าวจำเป็นต้องนำมาผ่านการก่อกัมมันต์ (Activation) ก่อนที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากถ่านชีวภาพยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะยังคงมีน้ำ มันทิน (Tar) ตกค้างอยู่ในช่องว่างของรูพรุน หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปทำการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างให้มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากขึ้น โดยสามารถทำได้ด้วยกระบวนการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ (ปริญทร, 2551) ขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพสามารถดำเนินการได้ด้วยวิธีเช่นเดียวกับการผลิตถ่านกัมมันต์ แสดงดังหัวข้อต่อไป

## 2.5 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านที่ต้องการ กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน (ศิษฏาภรณ์, 2550) ดังนี้

### ขั้นตอนที่ 1 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่เกิดภายใต้ระบบอับอากาศ (ปราศจากออกซิเจน) เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนในวัตถุดิบหรือสารอินทรีย์อื่นๆ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของชาร์ (Char) โดยชาร์จะมีลักษณะเป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันทาร์ (Tar) และก๊าซ ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของการแตกตัวทางเคมีของโครงสร้างสารที่ไม่ใช่คาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซ (ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน) และของเหลว (แอมโมเนีย น้ำ และน้ำมันทาร์) และคาร์บอนอิสระที่อยู่ในโครงสร้างจะรวมตัวกันกลายเป็นถ่านชาร์ และเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขึ้น ถ่านชาร์ที่ได้ควรมีลักษณะคือ เป็นสีดำตลอด ผิวมันเงา ไม่เป็นฝุ่นหรือขี้เถ้า หลัจากผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วถ่านชาร์จะยังคงมีความสามารถในการดูดซับต่ำมาก เนื่องจากในขั้นตอนนี้ทำการเผาที่อุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำมันทาร์ยังคงตกค้างอยู่ภายในรูพรุนหรือเกาะอยู่บนผิวถ่าน ดังนั้นถ่านที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแล้วต้องนำไปผ่านการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

### ขั้นตอนที่ 2 การกระตุ้น (Activation)

คือ กระบวนการที่ทำให้ถ่านหรือคาร์บอนมีคุณสมบัติในการดูดซับมากขึ้น กล่าวคือการกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ ทำให้โมเลกุลบางชนิดหลุดออกและเกิดส่วนที่มีอำนาจในการดูดซับขึ้นมาแทน อาจกล่าวได้ว่า เป็นการทำให้พื้นผิวมีความว่องไวมากขึ้นเนื่องจากอะตอมคาร์บอนบนถ่านมีพลังงานศักย์มากขึ้น เกิดการจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่และทำให้เกิดความว่องไวในการดูดซับ ในกระบวนการกระตุ้นเป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากผิวถ่าน ซึ่งเป็นบริเวณสำคัญที่ทำหน้าที่ในการดูดซับ โดยทั่วไปการกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

#### - การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

คือ การกระตุ้นที่ทำให้พื้นผิวคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ กล่าวคือ เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน โดยการกระตุ้นจะใช้ก๊าซออกซิไดซ์ ผ่านไปยังวัตถุดิบโดยตรงร่วมกับการใช้ความร้อน ตัวอย่างก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และอากาศ เป็นต้น ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพ คือ จะไม่มีสารเคมีตกค้างบนถ่าน ข้อด้อยคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 800 - 1000 องศาเซลเซียส ในการกระตุ้น

#### - การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

คือ การกระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับคาร์บอนบนผิวถ่าน สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารเคมีประเภทเกลือ อาทิ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl<sub>2</sub>) สารเคมีประเภทกรด อาทิ กรดฟอสฟอริก (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) และสารเคมีประเภทด่าง อาทิ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น ข้อดี

ของการกระตุ้นทางเคมี คือ อุณหภูมิที่ใช้การกระตุ้นไม่สูงมากอยู่ในช่วง 400 – 600 องศาเซลเซียส ข้อดีคือ มีสารเคมีตกค้างบนถ่านดังนั้นต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในการล้างสารเคมี และการกระตุ้นด้วยวิธีนี้ใช้สารเคมีที่เป็นสารกัดกร่อน ดังนั้นต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อนได้

ถ่านชีวภาพที่เลือกใช้ในงานวิจัยมาจากเปลือกเมล็ดกาแฟ งานวิจัยได้นำถ่านไปผ่านกระบวนการการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือ (ซิงค์โครไรต์) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากซิงค์โครไรต์เป็นสารที่ช่วยในการย่อยสลายแป้ง เซลลูโลส และสารอินทรีย์ต่างๆ ในถ่านได้ดี รวมทั้งไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการเผากระตุ้น (ชิตววรรณ นาคฤทธิ์, 2554) เพื่อให้พื้นที่ผิวมีความเหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้น และทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อม แสดงดังต่อไปนี้

## 2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการดึงดูดหรือบรรจุโมเลกุลของสสารหรือสารแขวนลอยที่ละลายอยู่ในสารละลาย โดยสสารอาจอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ สามารถถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวหรือผิวหน้า (Interface) ของสสารอีกชนิด ที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือของแข็ง ทำให้เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองสถานะใดๆ ได้แก่ ก๊าซกับของเหลว (Gas-Liquid Interface) ของแข็งกับของแข็ง (Solid-Solid Interface) ของเหลวกับของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ก๊าซกับของแข็ง (Gas-Solid Interface) หรือของเหลวกับของเหลว (Liquid-Liquid Interface) เป็นต้น ทำให้ความเข้มข้นของโมเลกุลบริเวณพื้นผิวดังกล่าวสูงขึ้น สสารที่เข้าไปดูดซับบริเวณพื้นผิวดูดซับเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และสสารที่เป็นพื้นผิวให้ตัวถูกดูดซับเข้ามาดูดซับเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) (Singhal และคณะ, 2017)

ในงานวิจัยการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการกระตุ้นนี้ เป็นการดูดซับที่เกิดระหว่างตัวถูกดูดซับที่อยู่ในสถานะของเหลวบนตัวดูดซับที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดซับโมเลกุลของสสารในสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นจนถึงจุดสมดุลแล้วจึงหยุด ความเข้มข้นของโมเลกุลสสารในน้ำจะเหลือน้อยลงเนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะบนตัวดูดซับ

การดูดซับแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

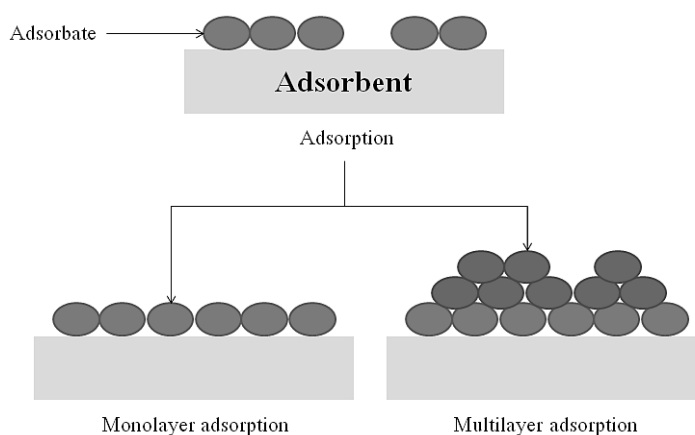
### 2.6.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เป็นการดูดซับของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal's forces) ซึ่งการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นได้ง่าย กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible reaction) การดูดซับมีการคายความร้อนออกมาน้อยประมาณ 5 กิโลแคลอรีต่อโมล สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-5



## 2.6.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เป็นการดูดซับของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม และการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยาก กล่าวคือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible reaction) การดูดซับมีการคายความร้อนออกมาค่อนข้างสูงประมาณ 80 - 400 กิโลแคลอรีต่อโมล การดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น แสดงดังภาพประกอบที่ 2-5

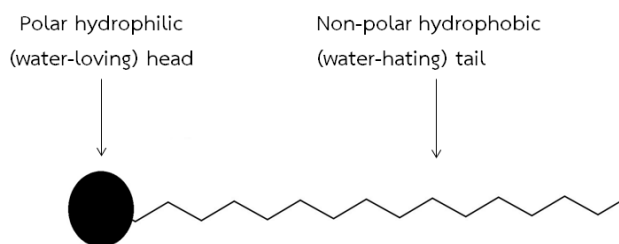


ภาพประกอบที่ 2-5 การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และหลายชั้น (Multilayer)  
(ที่มา: Singhal และคณะ, 2017)

การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมหรือการเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยได้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกในการปรับสภาพพื้นผิวของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งรายละเอียดของสารลดแรงตึงผิวแสดงดังต่อไปนี้

## 2.7 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Holmberg และคณะ, 2003) หรือ Surfactant (Surface active agent) คือ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เติมเข้าไปกระตุ้นผิวหรือระหว่างผิวของสสารแล้วทำให้แรงตึงผิวบริเวณดังกล่าวลดลง โครงสร้างทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยสองส่วนหลัก แสดงดังภาพประกอบที่ 2-6 คือ ส่วนหัวที่มีขั้ว มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic head) และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบไขมัน (Hydrophobic tail)



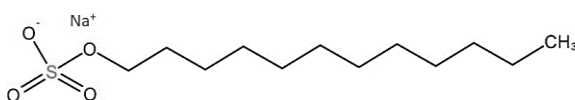
ภาพประกอบที่ 2-6 ส่วนประกอบหลักของสารลดแรงตึงผิว  
(ที่มา: Holmberg และคณะ, 2003)

### 2.7.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ตามชนิดโครงสร้างของส่วนหัว

#### 2.7.1.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวแสดงประจุลบ สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้นิยมนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง เช่น น้ำยาซักผ้า น้ำยาล้างจานชนิดเหลว และน้ำยาสระผม เป็นต้น (The essential chemical industry, 2013) สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีความสามารถในการกำจัดสิ่งปรกได้ดี ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ได้แก่ Sodium dodecyl sulfate (SDS) โครงสร้างทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-7



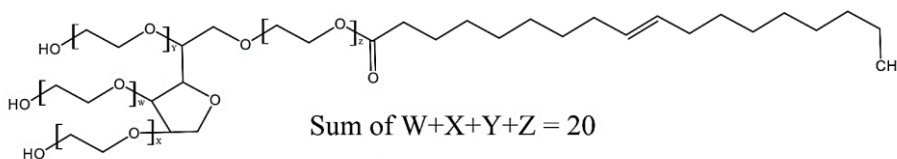
ภาพประกอบที่ 2-7 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS

(ที่มา: [https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/SIAL/436143?lang=en&region=TH&gclid=CjwKCAjwkYDbBRB6EiwAR0T\\_-jgux6aypQxmla9g51NdGYsvg\\_jb83-YmCuPvgrbnIECpHTPAvdvZxoCNVsQAvD\\_BwE](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/SIAL/436143?lang=en&region=TH&gclid=CjwKCAjwkYDbBRB6EiwAR0T_-jgux6aypQxmla9g51NdGYsvg_jb83-YmCuPvgrbnIECpHTPAvdvZxoCNVsQAvD_BwE), สืบค้นเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม 2561)

#### 2.7.1.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวมีขั้วแต่ไม่มีประจุ แม้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้จะไม่มีการประจุแต่ก็เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวชอบน้ำ โดยอะตอมออกซิเจนของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมไฮโดรเจนของน้ำได้ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ได้แก่ Tween80 (The essential chemical industry, 2013) โครงสร้างทางเคมีของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ แสดงดังภาพประกอบที่ 2-8

สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้มีความไวในการกระตุ้นและเกิดอิมัลชันได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเดียวกัน แต่ในระบบที่เป็นน้ำร้อนสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ละลายน้ำได้น้อยกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้เกิดฟองน้อย แต่มีความสามารถในการกำจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกประเภทสารอินทรีย์ได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ

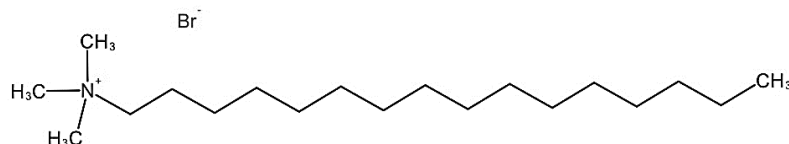


### ภาพประกอบที่ 2-8 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

(ที่มา: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/p1754?lang=en&region=TH>,  
สืบค้นเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม 2561)

#### 2.7.1.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวแสดงประจุบวก ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มเอมีน ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ได้แก่ Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพประกอบที่ 2-9 สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ไม่สามารถใช้ที่พีเอชสูงได้ นอกจากนั้นยังเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดที่สามารถดูดซับบนผิวของสารได้ดีกว่าชนิดอื่น สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้นิยมนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น สารหล่อลื่น สารเคลือบ น้ำยาปรับผ้านุ่ม และครีมนวดผม เป็นต้น (สารพัดเคมีคอล, 2017; Holmberg และคณะ, 2003)

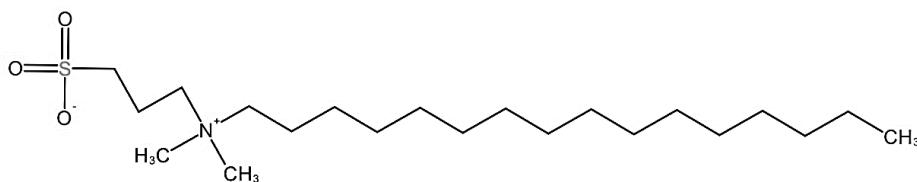


### ภาพประกอบที่ 2-9 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

(ที่มา: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5974#section=Top>,  
สืบค้นเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม 2561)

#### 2.7.1.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic surfactant)

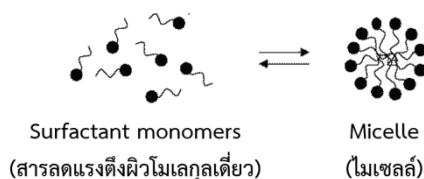
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวจะแสดงทั้งประจุบวกและลบ มีโครงสร้างที่โครงสร้างเล็กที่สุด ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดหรือเบส อ่อนโยนต่อผิว ดังนั้นจึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ประเภทยาสระผม หรือประเภททำความสะอาดร่างกายอื่นๆ ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกและลบ ได้แก่ Zwittergent 3-16 (Holmberg และคณะ, 2003) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพประกอบที่ 2-10



**ภาพประกอบที่ 2-10** สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกและลบ Zwittergent 3-16  
(ที่มา: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3-N-N-Dimethylpalmitylammonio\\_propanesulfonate#section=Top](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3-N-N-Dimethylpalmitylammonio_propanesulfonate#section=Top),  
สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2561)

## 2.7.2 สมบัติสำคัญของสารลดแรงตึงผิว

**2.7.2.1 ความเข้มข้นวิกฤติ (Critical Micelle Concentration, CMC)** คือ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สารลดแรงตึงผิวสามารถฟอร์มตัวเป็นไมเซลล์ (Micelle) ได้ (Holmberg และคณะ, 2003) โครงสร้างของไมเซลล์เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวมาเกาะรวมกลุ่มกันกลายเป็นไมเซลล์ การเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว แสดงดังภาพประกอบที่ 2-11

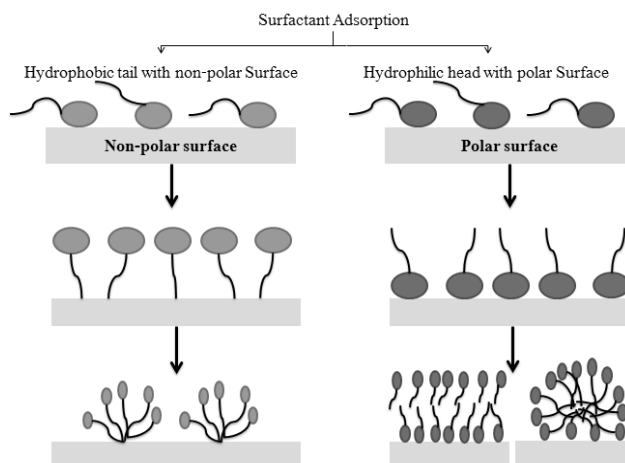


**ภาพประกอบที่ 2-11** การเกิดไมเซลล์ในสารละลายของสารลดแรงตึงผิว  
(ที่มา: Rangel-Yagui และคณะ, 2005)

ในสารละลายมีขี้ว เช่น น้ำ การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวที่รวมกลุ่มเป็นไมเซลล์ จะเป็นการเรียงตัวโดยหันส่วนหางขี้วเข้าด้านในและหันส่วนหัวขี้วออกด้านนอก เป็นกลุ่มทรงกลมเรียกว่า ไมเซลล์แบบปกติ (Normal micelle) โดยในการดูดซับบนพื้นผิวของแข็งไมเซลล์ในสารละลาย ถือเป็นส่วนที่ทำหน้าที่กักเก็บโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว เพื่อเตรียมนำไปใช้ในการดูดซับบนผิวของแข็ง (Holmberg และคณะ, 2003)

### 2.7.2.2 กระบวนการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนผิวของแข็ง

เกิดขึ้นได้โดยเป็นผลมาจากแรงกระทำอันเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างส่วนหางที่ไม่มีขี้ว ของสารลดแรงตึงผิวกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ในกรณีที่พื้นผิวของตัวดูดซับแสดงสมบัติไม่มีขี้ว และในกรณีตรงกันข้ามหากพื้นผิวของตัวดูดซับแสดงสมบัติมีขี้ว สารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับบนผิวของแข็งนั้นได้ด้วยแรงกระทำระหว่างส่วนหัวที่มีขี้ว กับพื้นผิวนั้น (Holmberg และคณะ, 2003) แสดงดังภาพประกอบที่ 2-12



ภาพประกอบที่ 2-12 พฤติกรรมการดูดซับระหว่างสารลดแรงตึงผิวกับพื้นผิวตัวดูดซับ  
(ที่มา: Holmberg และคณะ, 2003)

งานวิจัยนี้นำถ่านมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB เพื่อใช้ในการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์ส โดยการดูดซับดังกล่าวทำให้เกิดแรงกระทำ 2 รูปแบบ (Puasa และคณะ, 2018) คือ แรงกระทำระหว่างส่วนที่ไม่มีขั้ว อันเกิดจากพื้นผิวถ่านซึ่งแสดงสมบัติไม่มีขั้ว กับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกซึ่งไม่มีขั้วเช่นกัน ทำให้เข้าดูดซับบนถ่านได้ และอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถเกิดได้ในการดูดซับคือ แรงกระทำระหว่างส่วนที่มีขั้ว โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกซึ่งหันออกจากผิวถ่านสามารถจับกับอนุภาคที่มีขั้วด้วยกัน งานวิจัยนี้จึงสังเกตเห็นว่า สีรีแอกทีฟซึ่งมีลักษณะเป็นประจุลบ สามารถถูกดูดซับได้ด้วยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB ซึ่งอยู่บนผิวถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพแล้ว และสีดิสเพิร์สซึ่งเป็นสีชนิดไม่มีประจุสีดังกล่าวสามารถแพร่ผ่านส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB และเข้าดูดซับบริเวณหางของสารลดแรงตึงผิวได้ การศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน และประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สามารถประเมินได้ด้วยทฤษฎีต่อไปนี้

## 2.8 การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับ

การประเมินประสิทธิภาพการดูดซับของสารถูกดูดซับ ซึ่งกรณีนี้ คือ สีย้อมรีแอกทีฟ สีดิสเพิร์ส หรือสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB บนผิวตัวดูดซับของแข็ง คือ ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ สามารถประเมินได้ด้วยทฤษฎีดังต่อไปนี้ (Franco และคณะ, 2017)

### 2.8.1 ปริมาณการดูดซับบนผิวของแข็ง

สามารถแสดงถึงปริมาณการดูดซับตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยคำนวณได้ดังสมการที่ 1

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

เมื่อ	q	คือ จำนวนตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
โมลต่อลิตร)	C <sub>0</sub>	คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวถูกดูดซับ ณ เวลาเริ่มต้น (มิลลิ
	C <sub>t</sub>	คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิ
โมลต่อลิตร)	M	คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)
	V	คือ ปริมาตรสารละลายตัวถูกดูดซับ (ลิตร)

### 2.8.2 ประสิทธิภาพการดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับ (Amin, 2008) หาได้จากการคำนวณร้อยละการดูดซับซึ่งแสดงดังสมการที่ 2

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

เมื่อ	C <sub>0</sub>	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นก่อนการดูดซับ (มิลลิโมลต่อลิตร)
โมลต่อลิตร)	C <sub>e</sub>	คือ ความเข้มข้น ณ สมดุล ของสารละลายหลังการดูดซับ (มิลลิ

### 2.8.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับใช้สำหรับอธิบายอัตราเร็วในการดูดซับสสารบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยแสดงในรูปของสมการคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) และสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second order) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.8.3.1 แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ อยู่บนสมมติฐานที่ว่าเป็นการดูดซับทางทางภาพ ปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้ (Mi และคณะ, 2016; Ibrahim และคณะ, 2010) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งได้ดังสมการที่ 3

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (\text{สมการที่ 3})$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 3 ขอบเขตตั้งแต่วิธีเท่ากับ 0 ถึง t และที่  $q_t$  เท่ากับ 0 ถึง  $q_t$  จะได้สมการ 4

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = k_1 t \quad (\text{สมการที่ 4})$$

จากสมการที่ 4 จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 5

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (\text{สมการที่ 5})$$

เมื่อ	$q_t$	คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_e$	คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$k_1$	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที <sup>-1</sup> )
	t	คือ เวลาใดๆ (นาที)

จากสมการที่ 5 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-k_1$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\ln q_e$

### 2.8.3.2 แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ อยู่บนสมมติฐานที่ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ และการดูดซับเกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (Ghazi Mokri และคณะ, 2015; Ibrahim และคณะ, 2010) และการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (จิรภัทร์ และคณะ, 2557) สามารถหาอัตราเร็วของการดูดซับได้ด้วยสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับอธิบายได้ดังสมการที่ 6

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{สมการที่ 6})$$

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 6 ขอบเขตตั้งแต่วิธีเท่ากับ 0 ถึง t และที่  $q_t$  เท่ากับ 0 ถึง  $q_t$  จะได้ดังสมการที่ 7

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (\text{สมการที่ 7})$$

จากสมการที่ 7 จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (\text{สมการที่ 8})$$

เมื่อ นาที่)	$q_t$	คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_e$	คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$k_2$	คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิโมล-นาที่)
	$t$	คือ เวลาใดๆ (นาที่)

จากสมการที่ 8 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_e}$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

#### 2.8.4 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

การศึกษาแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นถึงขอบเขตของการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับในเชิงปริมาณ แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้เพื่อพัฒนาการดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสำหรับระบบของแข็งและของเหลว ได้แก่

##### 2.8.4.1 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm model)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายการดูดซับของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียว การดูดซับแบบนี้เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) (Mi และคณะ, 2016) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์อธิบายได้ดังสมการที่ 9 คือ

$$\frac{q_e}{q_{\max}} = \frac{k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (\text{สมการที่ 9})$$

เมื่อ	$q_e$	คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุลหรือปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$q_{\max}$	คือ ปริมาณที่ดูดซับได้สูงสุด (มิลลิโมลต่อกรัม)
	$k_L$	คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิโมล) และเป็นค่าที่บอกถึงพลังงานพันธะหรือความแข็งแรงในการดูดซับบนผิวระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ยิ่งค่ามากจะมีความแข็งแรงในการดูดซับมาก (Markandeya และคณะ, 2017)
	$C_e$	คือ ความเข้มข้นสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อลิตร)

จากสมการที่ 9 จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 10 คือ



$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (\text{สมการที่ 10})$$

จากสมการที่ 10 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_e}{q_e}$  และ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_{\max}}$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{k_L q_{\max}}$

#### 2.8.4.2 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช (Freundlich isotherm model)

เป็นแบบจำลองที่อธิบายการดูดซับของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) (Mi และคณะ, 2016) เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กับการดูดซับสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ (สายรุ้ง, 2554) แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับนี้สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 11 คือ

$$q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (\text{สมการที่ 11})$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุลหรือปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)

$n$  คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดริช เป็นค่าที่บอกถึงพลังงานพันธะหรือความแข็งแรงในการดูดซับ (Markandeya และคณะ, 2017)

$k_F$  คือ ค่าคงที่การดูดซับของฟรุนดริช (มิลลิโมลต่อกรัม (ลิตรต่อมิลลิโมล)<sup>1/n</sup>) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความจุในการดูดซับของตัวดูดซับ (Markandeya และคณะ, 2017)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อลิตร)

จากสมการที่ 11 จัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงโดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการได้ดังสมการที่ 12 คือ

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{สมการที่ 12})$$

จากสมการที่ 12 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log k_F$

โครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ในการปรับสภาพพื้นผิวของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของตัวดูดซับของแข็งด้วยสารลดแรงตึงผิวเพื่อการดูดซับสีย้อมได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างแพร่หลายและต่อเนื่องดังต่อไปนี้

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 การดูดซับสีโดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

#### 2.9.1.1 การดูดซับสีรีแอคทีฟ

Sun และคณะ (2013) ศึกษาการดูดซับสีรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ สีแดง Reactive Red 23 (RR23) สีน้ำเงิน Reactive Blue 171 (RB171) และสีน้ำเงิน Reactive Blue 4 (RB4) ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* และผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 28 ผลการทดลองพบว่าถ่านสามารถกำจัดสีย้อมได้ดีในช่วงพีเอช 4.5 - 6.0 ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส การดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน การดูดซับสีย้อมทั้งสามชนิดบนถ่านเป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช ปริมาณการดูดซับสีแดง RR23 สีน้ำเงิน RB171 และสีน้ำเงิน RB4 มีค่าเท่ากับ 59.88 71.94 และ 131.93 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน ตามลำดับ และจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

Rachakornkij และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัดสีรีแอคทีฟ 3 ชนิด คือ สีดำ Remazol Black B (RBB) สีน้ำเงิน Remazol Brilliant Blue R (RBBR) และสีแดง Remazol Brilliant Red F3B (RBRF3B) ด้วยถ่านลอยชานอ้อย โดยถ่านลอยชานอ้อยเตรียมจากการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการคัดขนาด 150 ไมโครเมตร การทดลองมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ อาทิ ค่า  $C_0$  ของสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และค่าพีเอชของระบบ การดำเนินงานทำที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่ดูดซับสีย้อมได้สูงสุด คือ  $C_0$  ของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5 และเป็นเวลา 240 300 และ 240 นาที สำหรับ สีดำ RBB สีน้ำเงิน RBBR และสีแดง RBRF3B ตามลำดับ ปริมาณการดูดซับสีดำ RBB สีน้ำเงิน RBBR และสีแดง RBRF3B มีค่าเท่ากับ 16.42 32.47 และ 18.28 ตามลำดับ การดูดซับสีย้อมทั้งสามชนิดเป็นแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

Ghazi Mokri และคณะ (2015) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีแดง C.I. Acid Red 97 (AR97) ด้วยเปลือกถั่ววอลนัท โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเร็วรอบในการดูดซับ เวลาในการดูดซับ ค่าพีเอชของระบบ และอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าสีแดง AR97 สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 73.33 จาก  $C_0$  ของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.45 ที่อุณหภูมิ 291 เคลวิน เขย่าที่ความเร็วรอบ 140 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช การศึกษาทางเทอร์โมไดนามิกส์พบว่าการดูดซับเป็นแบบคายความร้อน

Moazzam และคณะ (2017) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีน้ำเงิน Reactive dye blue 221 (RB221) จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านชีวภาพที่ผลิตจากฟางข้าว ผลการทดลองพบว่า สีน้ำเงิน RB221 สามารถกำจัดได้ถึงร้อยละ 90.4 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6-8 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช

#### 2.9.1.2 การดูดซับสีดีสเพิร์ส

Halbus และคณะ (2013) ศึกษาไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดีสเพิร์ส ได้แก่ สีน้ำเงิน Disperse blue 26 (DB26) บนถ่านกัมมันต์จากเมล็ด Iraqi date (Zahdidate

seeds, ZDS) ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกร้อยละ 40 รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ค่าพีเอช และเวลาในการดูดซับ จากการทดลองพบว่าการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด 8.13 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ  $C_0$  ของสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยถ่าน ZDS ปริมาณ 0.3 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ร้อยละ 66.47 เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่สามารถดูดซับได้ร้อยละ 54.33

Kisku และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue (DB) และสีส้ม Disperse orange (DO) โดยใช้ซีลัลลอย การทดลองดำเนินการที่สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม 0.0001 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอช 6 ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้ถ่าน 3 กรัม เวลาที่ความเร็รรอบ 140 รอบต่อนาที พบว่าการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด คือ 1.55 และ 1.7 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับการดูดซับสีน้ำเงิน DB และสีส้ม DO ตามลำดับ

Wang (2013) ศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุ ได้แก่ สีแดง Disperse Red 167 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยกรดฟอสฟอริกและถ่านกัมมันต์ทางการค้า การทดลองศึกษา ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร พีเอช 3 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้ถ่าน 12 กรัม และเวลาที่ความเร็รรอบ 180 รอบต่อนาที ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช ซึ่งมีปริมาณการดูดซับสีแดง Disperse Red 167 คือ 1.79 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่ และ 2.37 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Jadhav และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 และสีแดง Disperse red 156 โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ซีลัลลอย ซีลัลลอยโพลีเมอร์ และถ่านจากซีลัลลอย การทดลองดำเนินการที่สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อมที่ต่างกัน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอชเป็นกลาง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด แล้วนำไปเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช

## 2.9.2 การดูดซับสารลดแรงตึงผิวด้วยตัวดูดซับจากถ่าน

Lin และคณะ (2013) ศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนถ่านกัมมันต์โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับในสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก 5 ชนิด ได้แก่ Cetylpyridinium chloride monohydrate (CPC), Hexadecyltrimethylammonium bromide (HDTMA), Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC), Myristyltrimethylammonium bromide (MTAB) และ Decyltrimethylammonium bromide (DTAB) มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ อาทิ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิว (0.1 - 20 มิลลิโมลต่อลิตร) อัตราส่วนระหว่างถ่านกัมมันต์ต่อปริมาตรสารละลายสารลดแรงตึงผิว และค่าพีเอช (2-11) ผลการทดลองพบว่าปริมาณสารลดแรงตึงผิวสูงสุดที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ คือ 0.65, 0.61, 0.31 และ 0.28 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPC, HDTMA, CTAC และ MYAB ตามลำดับ แต่สารลดแรงตึงผิว

ชนิดประจุบวก DTAB ไม่สามารถหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวสูงสุดที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นวิกฤตสูงกว่าค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในช่วงที่ศึกษา โดยถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณของรูพรุนสูงสุดสามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวได้มากที่สุด และสารลดแรงตึงผิวที่มีขนาดโมเลกุล เล็กจะถูกดูดซับได้ง่ายกว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับจะอยู่ในช่วง 6 - 7 ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

Osman และคณะ (2010) ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกบนผ้าที่ผสมด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon cloth, ACC) โดยศึกษาสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก 8 ชนิด ในตัวทำละลายน้ำ ได้แก่ Benzyltrimethylammonium chloride (BTMACl), Benzyltriethylammonium chloride (BTEACl), Benzyltributylammonium chloride (BTBACl), Benzyl dimethyldecyl ammonium chloride (BDMDACl), Benzyl dimethyltetradecyl ammonium chloride (BDMTDACl), Benzyl dimethylhexadecyl ammonium chloride (BDMHDACl), N-dodecylpyridinium chloride (N-DPCL) และ N-cetylpyridinium chloride (CPCL) จากการทดลองพบว่าจลพลศาสตร์การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก BTMACl, BTEACl, BTBACl, BDMDACl, BDMTDACl, BDMHDACl, N-DPCL และ CPCL เป็นแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก N-DPCL และ CPCL สามารถดูดซับลงบนผ้า ACC ได้มากกว่า BTBACl, BDMDACl, BDMHDACl  $\approx$  BDMTDACl, BTEACl และ BTMACl ตามลำดับ เนื่องจากสมบัติ Hydrophobicity ยิ่งมากส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวมากขึ้นด้วย ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.8 - 5.91 ความเร็วรอบในการผสมถ่าน ACC กับสารลดแรงตึงผิว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นอกจากนี้การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกทั้ง 8 ชนิด มีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของฟรอนดริช อันแสดงถึงการดูดซับเป็นแบบหลายชั้นและพื้นผิวของแข็งไม่เป็นผิวเรียบ

Krivova และคณะ (2013) ศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนสารประกอบคาร์บอน 3 ชนิด ซึ่งมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 0.56 - 0.77 นาโนเมตร ได้แก่ เส้นใยคาร์บอน (AUTMI) ถ่านไม้ (OUA) และแร่ถ่านกัมมันต์ (TH90) ซึ่งถ่าน TH90 ผ่านกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 2 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำถ่านทั้ง 3 ชนิด มาทำการปรับสภาพโดยเปรียบเทียบกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ( $C_n$ TABr) 4 ชนิด ได้แก่  $C_{16}$ TABr  $C_{14}$ TABr  $C_{12}$ TABr และ  $C_{10}$ TABr กับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) ดำเนินการที่ค่าพีเอช 7 รวมทั้งศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวในช่วง 30 - 60 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกบนถ่านเกิดขึ้นได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่ถูกดูดซับได้มากที่สุด คือ  $C_{16}$ TABr >  $C_{14}$ TABr >  $C_{12}$ TABr >  $C_{10}$ TABr ตามลำดับ การดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนผิวถ่าน TH90 พบว่าสามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก  $C_{16}$ TABr ได้สูงสุด และยังพบว่าการดูดซับสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นสูงจะเกิดการดูดซับภายในรูพรุนระดับเมโซพอร์ (Mesoporous) และแมโครพอร์ (Macroporous) ได้ดีกว่าภายในรูพรุนระดับไมโครพอร์ (Microporous) และผลการทดลอง

ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 - 60 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อการดูดซับสารลดแรงตึงผิว และการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

### 2.9.3 การดูดซับสีรีแอคทีฟด้วยตัวดูดซับ (ถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร) ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว

Mi และคณะ (2016) ศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบ (สีส้ม Orange II, ORII) โดยใช้ถ่านจากซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของซังข้าวโพดด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) และศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุทั้งสองชนิดในการดูดซับสีส้ม ORII มีการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและอันดับสอง และศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช เป็นต้น การเตรียมถ่านจากซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ทำโดยนำถ่านซังข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมาลดขนาดโดยใช้ขนาดเมช 40 (0.425 มิลลิเมตร) และนำมากระตุ้รุกรูพรุนด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมง กรองแยกถ่านออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำล้างของถ่านมีพีเอชเท่ากับ 7 และทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตลอดคืน จากนั้นนำถ่าน 1 กรัม เติลงในสารละลายสารลดแรงตึงผิวเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการแยกถ่านออกมาด้วยการกรองและนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ถ่านที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีส้ม ORII คือ พีเอช 7 ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน โดยซังข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับสีส้ม ORII ได้ร้อยละ 46.9 ซึ่งต่ำกว่าถ่านจากซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่สามารถดูดซับได้ถึงร้อยละ 99.7 การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช

Oei และคณะ (2009) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสารที่มีประจุลบ อาทิ สีน้ำเงิน Acid blue 40 และสีดำ Reactive black 5 ที่ปนเปื้อนในสารละลาย โดยใช้ฟางข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cetylpyridiniumchloride, CPC) รวมทั้งศึกษาค่าพีเอช แบบจำลองจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมในการดูดซับ จากการทดลองพบว่า การปรับปรุงสภาพฟางข้าวบาร์เลย์ด้วย CPC 0.1 กรัม เทในสีน้ำเงิน Acid blue 40 หรือสีดำ Reactive black 5 ที่ปนเปื้อนในสารละลาย ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วนำไปเขย่า 170 รอบต่อนาที พบว่าฟางข้าวบาร์เลย์สามารถดูดซับสีน้ำเงิน Acid blue 40 และสีดำ Reactive black 5 ได้  $1.02 \times 10^{-4}$  และ  $2.54 \times 10^{-5}$  โมลต่อกรัม ตามลำดับ และที่ค่าพีเอชน้อยกว่า 5 มีความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงิน Acid blue 40 และสีดำ Reactive black 5 ได้ดี การดูดซับสีทั้งสองเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

Zhang และคณะ (2014) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบ ได้แก่ สีแดง Congo red โดยใช้ Wheat straw ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB

และศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองของ Elovich แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและอันดับสอง เป็นต้น รวมทั้งศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรุนดริชและเทมคิน (Tempkin) เป็นต้น ซึ่งในการเตรียม Wheat straw ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ทำโดยการนำ Wheat straw มาล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้งและตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน แล้วนำมาผ่านการลดขนาดด้วยตะแกรงขนาดเมช 40 - 60 เต็ม Wheat straw 5 กรัม ลงในสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่  $C_0$  ร้อยละ 1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง 293 เคลวิน แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แยก Wheat straw ออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อชะล้างสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ส่วนที่เหลือออก Wheat straw ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตลอดคืน จะได้ Wheat straw ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB การทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับสีแดง Congo red ทำโดยการนำ Wheat straw ที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว CTAB 0.01 กรัม เต็มในสารละลายสีแดง Congo red ที่  $C_0$  ของสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ณ เวลาต่างๆ สารละลายสีแดง Congo red ที่เหลือออกภายหลังการดูดซับนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Spectrophotometric method ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ พีเอช 4 - 5 ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน ซึ่งสามารถดูดซับสีย้อมได้ถึง 71.2 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

Zhao และคณะ (2017) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีเขียว Light green (LG) ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดประจุลบในสารละลาย โดยใช้เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก Hexadecylpyridinium bromide (CPB) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองของ Elovich แบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและอันดับสอง เป็นต้น และศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช เป็นต้น การวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร การเตรียมเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก CPB ทำโดยการนำเปลือกถั่วลิสงมาล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้งและตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วนำมาผ่านการลดขนาดด้วยตะแกรงขนาดเมช 20 - 40 นำเปลือกถั่วลิสง 5 กรัม เต็มลงในสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB ที่  $C_0$  ร้อยละ 0.5 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง 303 เคลวิน แล้วเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และแยกเปลือกถั่วลิสงออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อชะล้างสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB ส่วนที่เหลือออก เปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการปรับสภาพแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน ตลอดคืน จะได้เปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB การทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับสีเขียว LG ทำโดยการนำเปลือกถั่วลิสงที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB 0.012 กรัม เต็มในสารละลายสีเขียว LG ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน แล้วเขย่าด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ จากนั้นนำสารละลายสีเขียว LG ที่เหลือหลังการดูดซับมา

วิเคราะห์หาความเข้มข้น พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ 2 - 4 ที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน การดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งปริมาณการดูดซับสีเขียว LG คือ 146.2 มิลลิกรัมต่อกรัม

Ibrahim และคณะ (2010) ศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมในการดูดซับการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบสองชนิด ได้แก่ สีย้อม Acid blue 40 (AB40) และสีย้อม Reactive Blue 4 (RB4) โดยใช้ฟางข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร และผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Hexadecyl pyridinium chloridemonohydrate (CPC) 2.5 มิลลิโมลต่อลิตร การทดลองดูดซับสีย้อมทำโดยการนำฟางข้าวบาร์เลย์ 2 กรัม ผสมกับสีย้อมปริมาตร 1 ลิตร ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม AB40 และสีย้อม RB4 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 5.6 - 5.8 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งมีปริมาณการดูดซับสีย้อม AB40 และสีย้อม RB4 สูงสุด 51.95 และ 31.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

การบำบัดสีดิสเพิร์สโดยใช้ถ่านที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวยังมีการศึกษาค่อนข้างน้อย โดยงานวิจัยส่วนใหญ่นิยมศึกษาบำบัดสีดิสเพิร์สออกจากราน้ำเสียด้วยวิธีอื่น ดังต่อไปนี้

#### 2.9.4 การบำบัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไป

Dhale และคณะ (2000) ศึกษาการบำบัดสีดิสเพิร์ส Disperse dye CI 79 ด้วยวิธีการบำบัดผ่านแผ่นเยื่อกระดาษ (Membrane) ซึ่งมีขนาดรูพรุนประมาณ 50 ไมโครเมตร มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ ค่าพีเอชในน้ำเสีย 2 - 12 อุณหภูมิในการบำบัด (160 - 225 องศาเซลเซียส) ความดันย่อยของออกซิเจน (0.69 - 1.38 เมกกะพาสกาล) เวลาในการบำบัด (0 - 120 นาที) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า ซีไอของน้ำเสีย 3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 3.5 ที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ความดันย่อยของออกซิเจน 0.69 เมกกะพาสกาล ที่เวลา 30 นาที วิธีดังกล่าวสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 99

Kim และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดสีดิสเพิร์ส ได้แก่ สีย้อม Disperse blue 106 และสีเหลือง Disperse yellow 54 ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี ได้แก่ เกลือของเหล็ก ( $FeCl_3$ ) ที่ความเข้มข้น 0 - 2 มิลลิโมลต่อลิตร และศึกษาค่าพีเอชในช่วง 4 - 9 พบว่าการบำบัดใช้สารละลาย  $FeCl_3$  0.15 มิลลิโมลต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อม Disperse blue 106 และสีเหลือง Disperse yellow 54 ได้สูงสุดร้อยละ 71.7 (พีเอช 6) และ 93.9 (พีเอช 5) ตามลำดับ

Arslan (2001) ศึกษาการบำบัดสีดิสเพิร์ส ซึ่งเป็นสีผสมระหว่างสีม่วง CI disperse violet 93:1 ร้อยละ 5-15 กับสีย้อม CI disperse blue 291 ร้อยละ 5-15 ด้วยวิธีการที่ต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ โคแอกกูเลชันด้วยไอออน (Ferrous iron coagulation) การใช้โอโซนบำบัด (Ozonation) และการใช้โอโซนบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไอออน (Ferrous iron-catalyzed ozonation) มีการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดช่วง 3 - 13 รวมทั้งศึกษาปริมาณเหล็กไอออนในช่วง 0.09 - 18 มิลลิโมลต่อลิตร สำหรับการบำบัดด้วยวิธีที่มีการใช้เหล็ก พบว่าการบำบัดด้วยวิธีโคแอกกูเลชัน

ด้วยไอออนสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดร้อยละ 97 ณ สภาวะพีเอช 11 ปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ 18 มิลลิโมลต่อลิตร และเมื่อใช้ปริมาณไอออนเท่ากับ 2300 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการบำบัดด้วยไอออนสามารถดูดซับสีย้อมที่มีค่าซีไอที 3784 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงสุดร้อยละ 77 ณ สภาวะพีเอช 3 และการใช้ไอออนบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไอออน สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุดร้อยละ 95 ณ สภาวะพีเอช 3 ปริมาณเหล็กไอออนที่ใช้ 3.6 มิลลิโมลต่อลิตร

### 2.9.5 การบำบัดสีด้วยคอลัมน์แบบเบตนิ่ง

Obaid และคณะ (2017) ศึกษาการดูดซับสีส้อม Reactive orange 16 และสีแดง Acid red 114 ด้วยเส้นใยปอแก้ว (Kenaf) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 125 กรัมต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และปรับปรุงสภาพด้วย Trimethyl-chloro-bilateral-hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อม การทดลองดำเนินการในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ซึ่งมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่  $C_0$  ของสีย้อม (25 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) อัตราการไหลของสีย้อมเข้าสู่คอลัมน์ (10 – 18 มิลลิลิตรต่อนาที) และความสูงของเบตนิ่ง (2.5 – 7.5 เซนติเมตร) พบว่าอัตราการไหลของสีย้อมน้อยๆ ความสูงของเบตนิ่งที่มากและความเข้มข้นสีย้อมต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น และประสิทธิภาพการดูดซับสีส้อม Reactive orange 16 และสีแดง Acid red 114 สูงสุดที่สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของสีย้อม 10 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยปริมาณเส้นใยปอแก้ว 3.25 กรัม (ความสูงของเบตนิ่ง 7.5 เซนติเมตร)

Ahmad และคณะ (2010) ศึกษาการดูดซับสีดำ C.I. Reactive Black 5 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกรานอลาในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง การทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่  $C_0$  ของสีย้อม (50 – 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (10 – 30 มิลลิลิตรต่อนาที) และความสูงของเบตนิ่ง (40 – 80 มิลลิเมตร) เป็นต้น พบว่าถ่านสามารถดูดซับได้สูงสุด 39.02 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่สภาวะ  $C_0$  ของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยอัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที และความสูงของเบตนิ่งเท่ากับ 80 มิลลิเมตร

Han และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Methylene blue โดยใช้ผงใบฟักทองในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง การทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่  $C_0$  ของสีย้อม (30 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (5 8 และ 12 มิลลิลิตรต่อนาที) และความสูงของเบตนิ่ง (10 15 และ 30 เซนติเมตร) เป็นต้น โดยการทดลองดำเนินการที่พีเอช 7.4 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมากขึ้นเมื่อ  $C_0$  ของสีย้อม (30 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (5 มิลลิลิตรต่อนาที) น้อย ความสูงของเบตนิ่งมาก (30 เซนติเมตร) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับในคอลัมน์ดีขึ้น

จักรกฤษณ์ และคณะ (2560) ศึกษาการดูดซับสีดำ Reactive black 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา ในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง การทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่  $C_0$  ของสีย้อม (200 – 450 มิลลิกรัมต่อลิตร) อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (1 – 5 มิลลิลิตรต่อนาที) และความสูงของเบตนิ่ง (4 – 8 เซนติเมตร) พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อ ความสูงของเบตนิ่งและอัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้น และปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อ



$C_0$  ของสีย้อมเพิ่มขึ้น และปริมาณการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 16.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ 5 มิลลิลิตร ต่อนาที และความสูงของเบตนิ่ง 6 เซนติเมตร

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องได้สรุปสภาวะในขั้นตอนต่างๆ ของการดูดซับแบบกะ (Batch) การบำบัดสีดีสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไป และการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง แสดงดังตารางที่ 2-4 ถึง 2-6

ตารางที่ 2-4 สรุปสถานะในขั้นตอนต่างๆ ของการดูดซับแบบกะจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
<b>2.9.1 การดูดซับสีโดยใช้ตัวดูดซับจากถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร</b>										
<b>2.9.1.1 การดูดซับสีรีแอกทีฟ</b>										
Sun และคณะ (2013)	- ถ่านกัมมันต์จากสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i>	- กระตุ้นทางเคมี: ZnCl <sub>2</sub> 28%	- สีย้อมชนิดประจุลบ 1. Reactive Red 23 2. Reactive Blue 171 3. Reactive Blue 4 (C <sub>0</sub> = 600 mg/L)	4.5 -	27 6	150	- Reactive Red 23: q <sub>e</sub> = 59.88 mg/g - Reactive Blue 171: q <sub>e</sub> = 71.94 mg/g - Reactive Blue: q <sub>e</sub> = 131.93 mg/g	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง	ฟรุนดริช	
Rachakorn kij และคณะ (2004)	- ถ้ำลอยซานอ้อย	-	- สีย้อมชนิดประจุลบ 1. Remazol Black B 2. Remazol Brilliant Blue R 3. Remazol Brilliant Red F3B (C <sub>0</sub> = 50 mg/L)	5	30	125	- Remazol Black B: q <sub>max</sub> = 16.42 mg/g - Remazol Brilliant Blue R: q <sub>max</sub> = 32.47 mg/g - Remazol Brilliant Red F3B: q <sub>max</sub> = 18.282 mg/g	-	แลงเมียร์	

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
Ghazi Mokri และคณะ(2015)	- เปลือกถั่ววอลนัท	-	- สีย้อมชนิดประจุลบ C.I. Acid Red 97 (C <sub>0</sub> = 50 mg/L)	5.4 5	18	140	- C.I. Acid Red 97: q <sub>e</sub> = 2.823 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับสอง	ฟรุนดริช	
Moazzam และคณะ (2017)	- ถ่านจากฟางข้าว	- กระตุ้นทางเคมี: MgCl <sub>2</sub> 0.4 M	- สีย้อมชนิดประจุลบ Reactive blue 221 (C <sub>0</sub> = 30 mg/L)	6- 8	30	200	- Reactive blue 221: q <sub>e</sub> = 25.3 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับหนึ่ง	ฟรุนดริช	
<b>2.9.1.2 การดูดซับสีย้อมสีย้อม</b>										
Halbus และคณะ (2013)	- ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดIraqidate	- กระตุ้นทางเคมี: H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 40%	- สีย้อมชนิดไม่มีประจุ Disperse blue 26 (C <sub>0</sub> = 20 mg/L)	5.5	25	-	- Disperse blue 26: q <sub>max</sub> = 8.31 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับสอง	แลงเมียร์	
Wang (2013)	- ถ่านกัมมันต์ต้นไผ่ - ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	- กระตุ้นทางเคมี: ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่ + H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	- สีย้อมชนิดไม่มีประจุ Disperse Red 167 (C <sub>0</sub> = 50 mg/L)	3	50	180	- Disperse Red 167: q <sub>e</sub> = 1.79 mg/g ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่ q <sub>e</sub> = 2.37 mg/g ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับหนึ่ง	ฟรุนดริช	

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
Kisku และคณะ (2015)	- ซีโอไลท์	-	- สีย้อมชนิดไม่มีประจุ 1. Disperse blue 2. Disperse orange ( $C_0 = 0.0001 \text{ M}$ )	6	45	140	- Disperse blue: $q_{\max} = 1.55 \text{ mg/g}$ - Disperse orange: $q_{\max} = 1.7 \text{ mg/g}$	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง	แลงเมียร์	
Jadhav และคณะ (2004)	- ซีโอไลท์ - ซีโอไลท์โพลีเมอร์ - ถ่านซีโอไลท์	-	- สีย้อมชนิดไม่มีประจุ 1. Disperse blue 26 2. Disperse red 156	7	30	-	- Disperse blue 26 $q_e = 0.376 \text{ mg/g}$ ซีโอไลท์, $0.364 \text{ mg/g}$ ซีโอไลท์โพลีเมอร์, $0.0.410 \text{ mg/g}$ ถ่านซีโอไลท์ - Disperse red 156 $q_e = 0.868 \text{ mg/g}$ ซีโอไลท์, $0.450 \text{ mg/g}$ ซีโอไลท์โพลีเมอร์, $0.807 \text{ mg/g}$ ถ่านซีโอไลท์	-	ฟรุนดริช	

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
<b>2.9.2 การดูดซับสารลดแรงตึงผิวด้วยตัวดูดซับจากถ่าน</b>										
Lin และคณะ (2013)	- ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (ถ่านหิน, ไม้ และเปลือกไม้)	-	- สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก 1. CPC 2. HDTMA 3. MTAB 4. CTAC 5. DTAB ( $C_0 = 0.1 - 20 \text{ mM}$ )	6 - 7	30	120	- CPC: $q_{\text{max}} = 22.99 \text{ mmol/g}$ - HDTMA: $q_{\text{max}} = 21.14 \text{ mmol/g}$ - CTAC: $q_{\text{max}} = 21.31 \text{ mg/g}$ - MTAB: $q_{\text{max}} = 29.59 \text{ mg/g}$	-	แลงเมียร์	
Osman และคณะ (2010)	-ถ่านกัมมันต์	-	- สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก: 1. BTMACl 2. BTEACl 3. BTBACl 4. BDMDACl 5. N-DPCL 6. BDMTDACl 7. CPCL 8. BDMHDACl ( $C_0 = 0.1 \text{ mM}$ )	5.8 - 5.9 1	30	150	$N\text{-DPCL} \approx CPCL > BTBACl > BDMDACl > BDMHDACl \approx BDMTDACl > BTEACl > BTMACl$	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับสอง	ฟรุนดริช	

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
Krivova และคณะ (2013)	-ถ่าน 1. เส้นใยคาร์บอน (AUTMI) 2. ถ่านไม้ (OUA) 3. แร่ถ่านกัมมันต์ (TH90)	- กระตุ้นทางเคมี: ถ่าน TH90 + 2 M HCl	- สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก 1. C <sub>16</sub> TABr 2. C <sub>14</sub> TABr 3. C <sub>12</sub> TABr 4. C <sub>10</sub> TABr (C <sub>0</sub> = 3.3 mM) - สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ: SDBS	7	30 - 60	-	- C <sub>16</sub> TABr q <sub>max</sub> = 0.90 mmol/g TH90, 0.67 mmol/g AUTMI 0.61 mmol/g OUA - C <sub>14</sub> TABr q <sub>max</sub> = 0.85 mmol/g TH90, 0.66 mmol/g AUTMI 0.63 mmol/g OUA - C <sub>12</sub> TABr q <sub>max</sub> = 0.83 mmol/g TH90, 0.67 mmol/g AUTMI 0.59 mmol/g OUA - C <sub>10</sub> TABr q <sub>max</sub> =	-	แลงเมียร์	

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม				ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)			
							0.76 mmol/g TH90, 0.72 mmol/g AUTMI 0.50 mmol/g OUA		
<b>2.9.3 การดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยตัวดูดซับ (ถ่านหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร) ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว</b>									
Mi และคณะ (2016)	- ถ่านจากชั่งข้าวโพด	- กระตุ้นทางเคมี: HCl 4 mol/L  - สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1%	- สีย้อมชนิดประจุลบ Orangell ( $C_0 = 10 - 15 \text{ mg/L}$ )	7	25	120	- Orangell : $q_e = 15.2 \text{ mg/g}$	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง	ฟรุนดริช
Oei และคณะ (2009)	- ฟางข้าวบาร์เลย์	-สารลดแรงตึงผิวประจุบวก: CPC 2.5 mmol/L	-สีย้อมชนิดประจุลบ 1. Acid blue 40: ( $C_0 = 2.58 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ ) 2. Reactive black 5: ( $C_0 = 8.27 \times 10^{-5} \text{ mol/L}$ )	6	25	170	- Acid blue 40: $q_{\max} = 1.02 \times 10^{-4} \text{ mol/g}$  - Reactive black 5: $q_{\max} = 2.54 \times 10^{-5} \text{ mol/g}$	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง	แลงเมียร์

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	การปรับสภาพตัวดูดซับ	สภาวะการดูดซับที่เหมาะสม					ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้	จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับ
			ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับ	pH	T (°C)	อัตราการเขย่า (rpm)				
Zhang และคณะ (2014)	- ฟางข้าว สาาลี	- สารลดแรงตึงผิวประจุบวก: CTAB 1%	- สีย้อมชนิดประจุลบ Congo red (C <sub>0</sub> = 30 mg/L)	4-5	60	100	- Congo red: q <sub>max</sub> = 71.2 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับหนึ่ง	แลงเมียร์	
Zhao และคณะ (2017)	- เปลือกถั่ว ลิสง	- สารลดแรงตึงผิวประจุบวก: CPB 0.5%	- สีย้อมชนิดประจุลบ light green (C <sub>0</sub> = 100 mg/L)	2-4	30	100	- Light green: q <sub>max</sub> = 146.2 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับหนึ่ง	แลงเมียร์	
Ibrahim และคณะ (2010)	- ฟางข้าว บาร์เลย์	- กระตุ้นทางเคมี: NaOH 0.05 mol/L - สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก: CPC 2.5 mmol/L	- สีย้อมชนิดประจุลบ 1. Acid blue 2. Reactive Blue 4 (C <sub>0</sub> = 100 mg/L)	5.6 - 5.8	25	170	- Acid blue: q <sub>max</sub> = 51.95 mg/g - Reactive Blue 4: q <sub>max</sub> = 31.5 mg/g	อัตราเร็ว ปฏิกิริยาเทียม อันดับสอง	แลงเมียร์	



ตารางที่ 2-5 สรุปสถานะในขั้นตอนต่างๆ ของการบำบัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไปจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	วิธีการบำบัด	สีย้อมที่ใช้ในการบำบัด	สถานะที่ศึกษา	สถานะที่เหมาะสม
<b>2.9.4 การบำบัดสีดิสเพิร์สด้วยวิธีโดยทั่วไป</b>				
Dhale และคณะ (2000)	การกรองด้วยเมมเบรน	- สีย้อมชนิดไม่มีประจุ: Disperse dye CI 79	1. pH (2 – 12) 2. T (160 – 225 °C) 3. ความดันย่อยของออกซิเจน (0.69 – 1.38 MPa)	1. pH = 3.5 2. T = 225 °C 3. ความดันย่อยของออกซิเจน = 0.69 MPa 4. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 99
Kim และคณะ (2004)	การตกตะกอนด้วยสารเคมี: FeCl <sub>3</sub>	- สีย้อมชนิดไม่ประจุ: 1. Disperse blue 106 2. Disperse yellow 54	1. FeCl <sub>3</sub> (0 – 2 mmol/L) 2. pH (4 – 9)	- Disperse blue 106 1. FeCl <sub>3</sub> = 0.15 mmol/L 2. pH = 3.5 3. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 71.7 - Disperse yellow 54 1. FeCl <sub>3</sub> = 0.15 mmol/L 2. pH = 5 3. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 93.9
Arslan (2001)	1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี: ไอออน (Fe <sup>2+</sup> ) 2. การใช้โอโซนบำบัด 3. การใช้โอโซนบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไอออน (Fe <sup>2+</sup> )	- สีย้อมชนิดไม่ประจุ: 1. CI disperse violet 93: 1 2. CI disperse blue 291	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม (5 - 15 mM) 2. pH (3 - 13) 3. สารละลายไอออน (0.09 – 18 mM)	- การตกตะกอนด้วยสารเคมี 1. pH = 11 2. สารละลายไอออน = 18 mmol/L 3. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 97.0 - การใช้โอโซนบำบัด 1. pH = 3 2. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 77.0

งานวิจัย	วิธีการบำบัด	สีย้อมที่ใช้ในการบำบัด	สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
				- การใช้โอโซนบำบัดร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาไอออน 1. pH = 3 2. สารละลายไอออน = 3.6 mmol/L 3. กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 95

ตารางที่ 2-6 สรุปสภาวะในขั้นตอนต่างๆ ของการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
<b>2.9.5 การบำบัดสีด้วยคอลัมน์แบบเบตนิ่ง</b>				
Obaid และคณะ (2017)	เส้นใยปอแก้ว	- สีย้อมชนิดประจุบวก: 1. Reactive orange 16 2. Acid red 114	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม (25 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2. อัตราการไหลของสีย้อมเข้าสู่คอลัมน์ (10 - 18 มิลลิลิตรต่อนาที) 3. ความสูงของเบตนิ่ง (2.5 - 7.5 เซนติเมตร)	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. อัตราการไหลของสีย้อมเข้าสู่คอลัมน์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที 3. ความสูงของเบตนิ่ง 7.5 เซนติเมตร
Ahmad และคณะ (2010)	ถ่านกัมมันต์จากกราโนล่า	- สีย้อมชนิดประจุบวก: C.I. Reactive Black 5	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม (50 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (10 - 30 มิลลิลิตรต่อนาที) 3. ความสูงของเบตนิ่ง (40 - 80 มิลลิเมตร)	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที 3. ความสูงของเบตนิ่ง 80 มิลลิเมตร
Han และคณะ (2009)	ผงใบฟักทอง	- สีย้อมชนิดประจุบวก: Methylene blue	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม (30 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (5 - 12 มิลลิลิตรต่อนาที) 3. ความสูงของเบตนิ่ง (10 - 30 เซนติเมตร)	1. C <sub>0</sub> ของสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที 3. ความสูงของเบตนิ่ง 30 เซนติเมตร

งานวิจัย	ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	สภาวะที่ศึกษา	สภาวะที่เหมาะสม
จักรกฤษณ์ และคณะ (2560)	ถ่านกัมมันต์ จากผักตบชวา	- สีย้อมชนิดประจุบวก: Reactive black 5	1. $C_0$ ของสีย้อม (200 – 450 มิลลิกรัมต่อลิตร) 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ (1 – 5 มิลลิลิตรต่อนาที) 3. ความสูงของเบตนิ่ง (4 – 8 เซนติเมตร)	1. $C_0$ ของสีย้อม 200 มิลลิกรัมต่อลิตร 2. อัตราการไหลของสีย้อมผ่านคอลัมน์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที 3. ความสูงของเบตนิ่ง 6 เซนติเมตร

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ

เปลือกเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสต้า (Robusta coffee) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 ได้รับความอนุเคราะห์จากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มกาแฟบ้านถ้ำสิงห์ จังหวัดชุมพร มีขนาดโดยเฉลี่ย 2.0 - 2.5 เซนติเมตร



ภาพประกอบที่ 3-1 ลักษณะเปลือกเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสต้า

#### 3.2 สารเคมี

##### 3.2.1 สารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด

1) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), ความบริสุทธิ์ 100%, ชื่อจากบริษัท Ajax Finechem

2) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ Sodium dodecyl sulfate (SDS), ความบริสุทธิ์ 100%, ชื่อจากบริษัท Sigma-Aldrich

3) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Polyethylene glycol sorbitan monooleate (Tween80) ชื่อจากบริษัท Sigma-Aldrich

3.2.2 สีย้อมสีฟ ได้แก่ สีเหลือง Reactive yellow 145 (RDY145), สีแดง Reactive red 195 (RDR195) และสีน้ำเงิน Reactive blue 222 (RDB222) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคพีที คอร์ปอเรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด

3.2.3 สีย้อมสีฟ ได้แก่ สีเหลือง Disperse yellow 3 (DDY3), สีแดง Disperse red 60 (DDR60) และสีน้ำเงิน Disperse blue 56 (DDB56) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เคพีที คอร์ปอเรชั่น (ไทยแลนด์) จำกัด

3.2.4 ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas, N<sub>2</sub>), ความบริสุทธิ์ 99%, ชื่อจากบริษัท เซ้าท์เทิร์นลิควิดอ็อกซิเจน จำกัด

3.2.5 ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride,  $ZnCl_2$ ), ความบริสุทธิ์ 100%, ซื้อจากบริษัท Ajax Finechem

3.2.6 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl), ความบริสุทธิ์ 35.4%, ซื้อจากบริษัท LOBA Chemie

3.2.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH), ความบริสุทธิ์ 98%, ซื้อจากบริษัท Univar

3.2.8 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI)

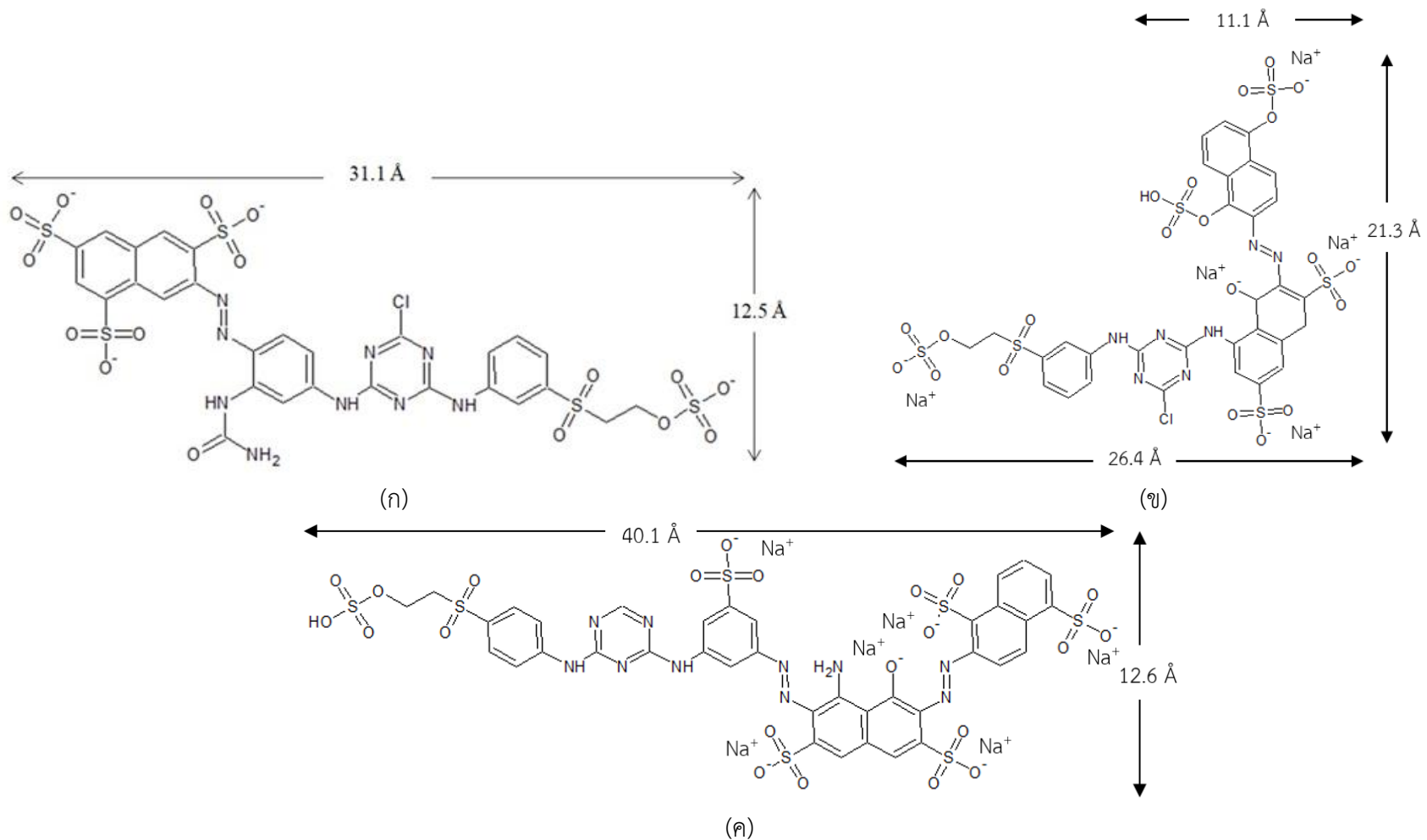
นอกจากนี้สมบัติของสารลดแรงตึงผิว ซีรีแอกทีฟและสดีสเพิร์ส ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ซี้อย่อ ซีอทางเคมี มวลโมเลกุล สูตรทางเคมี และความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสง UV-Visible spectrophotometer ( $\lambda$ , นาโนเมตร) แสดงดังตารางที่ 3-1 รวมทั้งโครงสร้างของซีรีแอกทีฟ สดีสเพิร์สและสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพประกอบที่ 3-2 ถึง 3-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของสียรีแอกทีฟ สีสเพิร์สและสารลดแรงตึงผิว\*

สาร	ชื่อย่อ	ชื่อทางเคมี	สูตรทางเคมี	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	$\lambda_{\max}$ (นาโนเมตร)
<b>สียรีแอกทีฟ</b>					
1. Reactive yellow 145	RDY145	Tetrasodium;7-[[2-(carbamoylamino)-4-[[4-chloro-6-[3-(2-sulfonatoxyethylsulfonyl)anilino]-1,3,5-triazin-2-yl]amino]phenyl]diazenyl]naphthalene-1,3,6-trisulfonate	$C_{28}H_{20}ClN_9Na_4O_{16}S_5$	1025.5	417
2. Reactive red 195	RDR195	Pentasodium;5-[[4-chloro-6-[3-(2-sulfonatoxyethylsulfonyl)anilino]-1,3,5-triazin-2-yl]amino]-4-oxido-3-[[5-sulfonatoxy-1-sulfooxynaphthalen-2-yl]diazenyl]naphthalene-2,7-disulfonate	$C_{31}H_{21}ClN_7Na_5O_{21}S_6$	1169.5	541
3. Reactive blue 222	RDB222	hexasodium;5-amino-3-[[1,5-disulfonatonaphthalen-2-yl]diazenyl]-4-oxido-6-[[3-sulfonato-5-[[4-[4-(2-sulfooxyethylsulfonyl)anilino]-1,3,5-triazin-2-yl]amino]phenyl]diazenyl]naphthalene-2,7-disulfonate	$C_{37}H_{24}N_{10}Na_6O_{22}S_7$	1322.0	614
<b>สีสเพิร์ส</b>					
1. Disperse yellow 3	DDY3	N-[4-(2-Hydroxy-5-methylphenylazo)phenyl]acetamide	$C_{15}H_{15}N_3O_2$	269.0	350
2. Disperse red 60	DDR60	1-Amino-4-hydroxy-2-phenoxyanthraquinone	$C_{20}H_{13}NO_4$	331.0	590
3. Disperse blue 56	DDB56	1,5-Diaminobromo-4,8-dihydroxyanthraquinone	$C_{14}H_9BrN_2O_4$	348.9	555

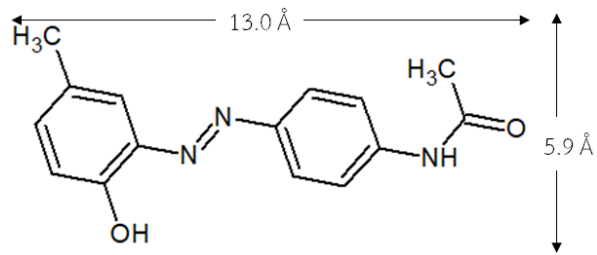
สาร	ชื่อย่อ	ชื่อทางเคมี	สูตรทางเคมี	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	$\lambda_{\max}$ (นาโนเมตร)
<b>สารลดแรงตึงผิว</b>					
1. CTAB	CTAB	Cetyltrimethylammonium bromide	$C_{19}H_{42}BrN$	364.5	195
2. SDS	SDS	Sodium dodecyl sulfate	$C_{12}H_{25}NaO_4S$	288.4	-
3. Tween80	Tween80	2-[2-[3,4-bis(2-hydroxyethoxy)oxolan-2-yl]-2-(2-hydroxyethoxy)ethoxy]ethyl octadec-9-enoate	$C_{64}H_{124}O_{26}$	1310.0	230

(\*) หมายเหตุ ที่มา: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov> (สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2561) และ <https://www.sigmaaldrich.com> (สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2561)

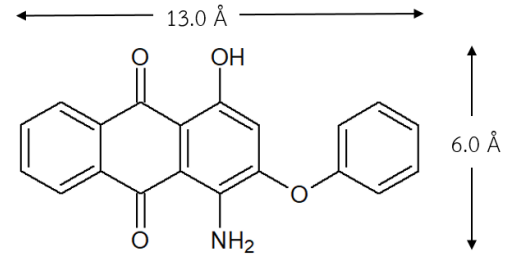


ภาพประกอบที่ 3-2 โครงสร้างของ (ก) สีเหลือง RDY145 (ข) สีแดง RDR195 และ (ค) สีน้ำเงิน RDB222  
 (ที่มา: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>, สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 2561)

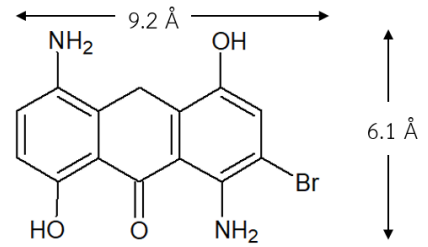




(ก)

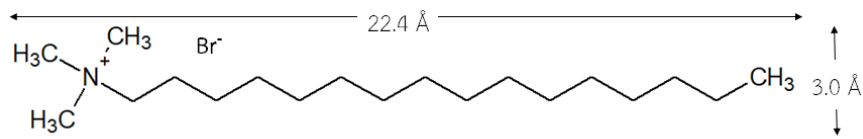


(ข)

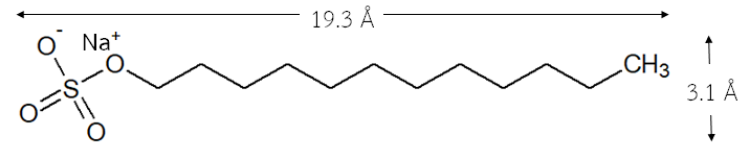


(ค)

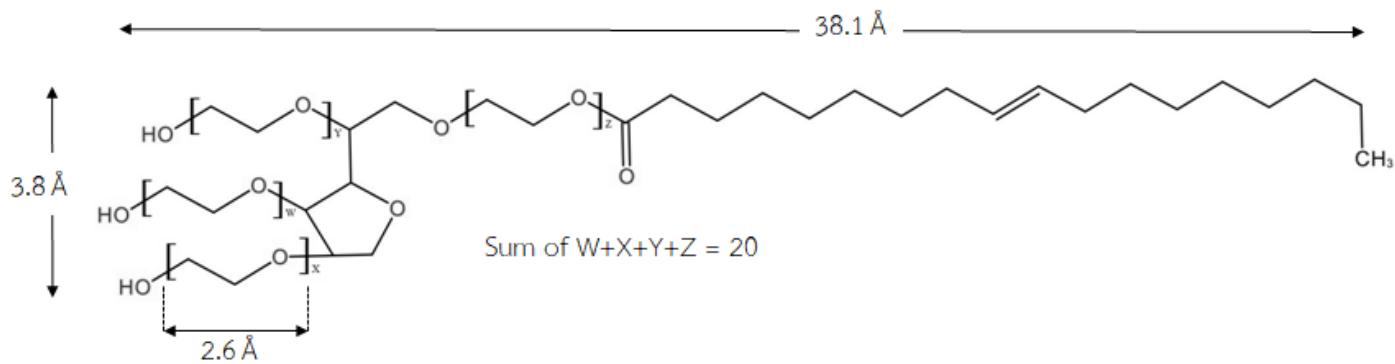
ภาพประกอบที่ 3-3 โครงสร้างของ (ก) สีเหลือง DDY3 (ข) สีแดง DDR60 และ (ค) สีนํ้าเงิน DDB56  
 (ที่มา: <https://www.sigmaaldrich.com>, สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2561)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบที่ 3-4 โครงสร้างของ (ก) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (ข) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS

และ (ค) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

(ที่มา: <https://www.sigmaaldrich.com>, สืบค้นเมื่อวันที่ 9 กรกฎาคม 2561)

### 3.3 อุปกรณ์

#### 3.3.1 เตาเผาแบบทรงกระบอก (Tube furnace) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-5



ภาพประกอบที่ 3-5 เตาเผาแบบทรงกระบอก

#### 3.3.2 ตู้อบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น 100-800 แสดงดังภาพประกอบที่ 3-6



ภาพประกอบที่ 3-6 ตู้อบ

#### 3.3.3 ชุดตะแกรงร่อนตามมาตรฐานไทเลอร์ (ขนาดเมช 12 และ 28) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-7



ภาพประกอบที่ 3-7 ชุดตะแกรงร่อนตามมาตรฐานไทเลอร์ (ขนาดเมช 12 และ 28)

3.3.4 โถดูดความชื้น (Desiccators)

3.3.5 Syringe filter Nylon ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

3.3.6 เครื่องวัด pH (pH meter)

3.3.7 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Incubator Shaker) ยี่ห้อ LabTech รุ่น LSI-3016R แสดงดังภาพประกอบที่ 3-8



ภาพประกอบที่ 3-8 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ

3.3.8 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) ยี่ห้อ Agilent รุ่น HP 8453 แสดงดังภาพประกอบที่ 3-9



ภาพประกอบที่ 3-9 เครื่อง UV-Vis ยี่ห้อ Agilent รุ่น HP 8453

3.3.9 ป้อนดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ (Peristaltic pump) ยี่ห้อ Cole-Parmer รุ่น Masterflex<sup>®</sup> L/S แสดงดังภาพประกอบที่ 3-10



ภาพประกอบที่ 3-10 ป้อนดูดจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ ยี่ห้อ Cole-Parmer รุ่น Masterflex<sup>®</sup> L/S

- 3.3.10 เครื่องกวนสาร Hotplate Stirrer
- 3.3.11 เครื่องชั่ง (Weighing machine)
- 3.3.12 ซ้อนตักสาร
- 3.3.13 ผ้าขาวบางมีสลิน
- 3.3.14 แม่เหล็กกวน (Magnetic bar)
- 3.3.15 ปีเปต
- 3.3.16 กระจกบอทวง
- 3.3.17 ขวดปรับปริมาตร (Volumetric flask)
- 3.3.18 หลอดทดลอง
- 3.3.19 ปีกเกอร์
- 3.3.20 ขวดฝาเกลียวขนาด 8 ออนซ์

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

การเตรียมตัวดูดซับทำโดยการนำเปลือกเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสต้า แสดงดังภาพประกอบที่ 3-11 มาผึ่งแดดเป็นเวลา 4 วัน จากนั้นนำมาเผาด้วยเตาเผาแบบทรงกระบอก อนุกรม 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.25 ลิตร ต่อนาที ถ่านที่ได้จากเปลือกเมล็ดกาแฟจะนำไปลดขนาดต่อไป (Ahmad และคณะ, 2014)



ภาพประกอบที่ 3-11 เปลือกเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสต้า

เมื่อผ่านการลดขนาดและนำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาดเมช 28 ( $D = 0.60 \text{ mm}$ ) และขนาดเมช 12 ( $D = 1.41 \text{ mm}$ ) ได้ถ่านที่มีขนาดในช่วง  $0.60 - 1.41$  มิลลิเมตร จากนั้นนำถ่านไปกระตุ้นด้วยสารละลาย  $\text{ZnCl}_2$  เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ณ อัตราส่วนถ่านต่อสารละลายเท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยการแช่ถ่านในสารละลาย  $\text{ZnCl}_2$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบที่ 3-12 จากนั้นนำถ่านไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อระเหยน้ำออกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำถ่านไปเผากระตุ้นด้วยเตาเผาแบบทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดย

เผาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 0.25 ลิตรต่อนาที (บุญชัย, 2537)



ภาพประกอบที่ 3-12 ถ่านที่แช่ด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$

ถ่านที่ได้จากการเผากระตุ้นจะถูกนำมาล้างด้วยน้ำร้อนและน้ำอุณหภูมิปกติสลับกัน เพื่อล้างฝุ่นและล้างสารละลายเกลือจนพีเอชน้ำล้างเป็นกลาง ถ่านที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วนำมา ระบายน้ำออกที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ (Coffee husk biochar, CH) เก็บรักษาโดยใส่ภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในกิจกรรมถัดไป และทำการ แบ่งตัวอย่างถ่านมาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และวิเคราะห์พื้นที่ผิว จำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยและปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ของถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟก่อนและ หลังการทำการกระตุ้น พร้อมเปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ทางการค้า (Activated carbon, AC) ซึ่งมีขนาด 0.60 – 1.41 มิลลิเมตร เช่นเดียวกัน

### 3.4.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 สีย้อมชนิดประจุลบ ได้แก่ สีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) และกลุ่มที่ 2 สีย้อม ชนิดไม่มีประจุ ได้แก่ สีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) การเตรียมน้ำ เสียสังเคราะห์เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำได้โดยการผสมสีย้อม 1 กรัมต่อน้ำกลั่น 1 ลิตร เป็น สารละลายตั้งต้น ทำการปรับความเข้มข้นของสารละลายทำได้โดยการเจือจางด้วยน้ำกลั่น (Zhang และคณะ, 2014) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-13



ภาพประกอบที่ 3-13 ตัวอย่างการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ สีแดง RDR195

นำน้ำเสียสังเคราะห์ของแต่ละสีมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสง UV-Vis และสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของสีย้อม ด้วยเครื่อง UV-Vis โดยค่าความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสง UV-Vis ( $\lambda$ ) ของกลุ่มสีรีแอคทีฟและกลุ่มสีดีสเพิร์ส แสดงดังตารางที่ 3-1

### 3.4.3 ศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)

#### 3.4.3.1 ศึกษาเวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

นำถ่าน CH ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ปริมาณ 1 กรัม มาบรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เติมสารละลายสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่  $C_0$  10 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3-14 จากนั้นนำขวดบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาทุกๆ 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มากรองแยกถ่าน CH ออกจากของเหลว แล้วนำของเหลวที่ได้ไปกรองด้วย Syringe filter Nylon ขนาด 0.45 ไมโครเมตร และวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวเพื่อหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่ยังคงเหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis พร้อมทั้งทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (Lin และคณะ, 2013)



ภาพประกอบที่ 3-14 ขวดตัวอย่างการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

### 3.4.3.2 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ในการดูดซับบนผิวถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.3.1 โดยเปลี่ยน  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB เป็น 1 4 6 7 8 และ 9 มิลลิโมลต่อลิตร เก็บตัวอย่าง ณ เวลาที่เหมาะสม (ได้จากการทดลองที่ 3.4.3.1) พร้อมทั้งทำนายไอโซเทอมการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (Krivova และคณะ, 2013)

### 3.4.3.3 การเตรียมถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

นำถ่าน CH ที่ผ่านการกระตุ้นและถ่าน AC มาทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.3.2 โดยใช้  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่เหมาะสม (ได้จากการทดลองที่ 3.4.3.1) ในการเก็บตัวอย่าง ภายหลังจากการเก็บตัวอย่างที่เวลาดังกล่าว นำตัวอย่างมากรองด้วยผ้าขาวบาง นำถ่านไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิท (Zhao และคณะ, 2017) เพื่อใช้ในการทดลองการดูดซับสี โดยถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB เรียกว่า ถ่าน Modified coffee husk biochar (MCH) และถ่าน Modified activated carbon (MAC)

## 3.4.4 ศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียดังเคราะห์

### 3.4.4.1 ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ของถ่าน CH

นำถ่าน CH และถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม บรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เติมสีเหลือง RDY145 ที่  $C_0$  700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำขวดบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มากรองแยกถ่านออกจากของเหลวด้วยผ้าขาวบางและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวเพื่อหาความเข้มข้นของสีเหลือง RDY145 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis พร้อมคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด (Oei และคณะ, 2009)

### 3.4.4.2 ศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีรีแอกทีฟ

นำถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม มาบรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เติมสีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 หรือสีน้ำเงิน RDB222) ที่  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองแยกแต่ละสี ภาพตัวอย่างแสดงดังภาพประกอบที่ 3-15 จากนั้นนำขวดบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างของเหลวไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสีคงเหลือทุกๆ 10 นาที โดยนำตัวอย่างที่ได้มากรองแยกถ่านออกจากของเหลวด้วยผ้าขาวบางและนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis ดำเนินการทดลองจนความเข้มข้นสีคงเหลือคงที่ บันทึกเวลา จากนั้นนำผลการทดลองไปทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีรีแอกทีฟ (Mi และคณะ, 2016)





ภาพประกอบที่ 3-15 ขวดตัวอย่างการดูดซับสีเหลือง RDY145

### 3.4.4.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.2 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นสีรีแอกทีฟเป็น 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่าง ณ เวลาที่เหมาะสม (ได้จากการทดลองที่ 3.4.4.2) พร้อมทั้งทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟ (Zhang และคณะ, 2014)

### 3.4.4.4 ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และ ถ่าน MCH

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.2 และ 3.4.4.3 โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่าน AC และถ่าน MAC ในการดูดซับสีเหลือง RDY145 จากน้ำเสียสังเคราะห์ พร้อมทั้งทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับและไอโซเทอมการดูดซับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับระหว่างถ่าน MCH กับถ่าน AC และถ่าน MAC

### 3.4.5 ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.4.5.1 ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH

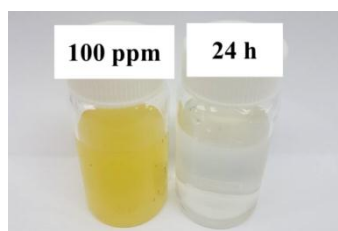
ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4.1 ในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH และถ่าน MCH ที่  $C_0$  200 มิลลิกรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่าง ณ เวลา 24 ชั่วโมง

#### 3.4.5.2 ศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีดิสเพิร์ส

นำถ่าน CH ปริมาณ 1 กรัม มาบรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เต็มสีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 หรือสีน้ำเงิน DDB56) โดยทำการทดลองแยกแต่ละสี ที่  $C_0$  ของสีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรสารละลาย 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำขวดทดลองบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างของเหลวไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสีคงเหลือทุกๆ 10 นาที โดยนำตัวอย่างที่ได้มากรองแยกถ่านออกจากของเหลวด้วยผ้าขาวบางและนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสีดิสเพิร์สคงเหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis ดำเนินการทดลองจนความเข้มข้นสีคงเหลือคงที่ บันทึกเวลาจากนั้นนำผลการทดลองไปทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส (Wang, 2013)

### 3.4.5.3 ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสปีดิสเพิร์ส

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.5.2 แต่เปลี่ยน  $C_0$  ของสปีดิสเพิร์สเป็น 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่าง ณ เวลาที่เหมาะสม (ได้จากการทดลองที่ 3.4.5.2) พร้อมทั้งทำนายไอโซเทอมการดูดซับสปีดิสเพิร์ส ตัวอย่างภายหลังการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH (Kisku และคณะ, 2015) แสดงดังภาพประกอบที่ 3-16



ภาพประกอบที่ 3-16 สารละลายสีเหลือง DDY3 ที่  $C_0$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ซ้าย) และขวดตัวอย่างภายหลังการดูดซับสีเหลือง DDY3 (ขวา) ด้วยถ่าน CH

### 3.4.5.4 ศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4.5.2 และ 3.4.5.3 แต่ใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC ดูดซับสีเหลือง DDY3 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ พร้อมทั้งทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับและทำนายไอโซเทอมการดูดซับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง DDY3 ระหว่างถ่าน MCH กับถ่าน AC และถ่าน MAC

### 3.4.6 ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

การปรับปรุงสภาพถ่าน CH และถ่าน AC ด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 โดยนำถ่านแต่ละชนิดปริมาณ 1 กรัม มาดูดซับสารลดแรงตึงผิวแต่ละประเภท ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิว 10 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างที่เวลาดังกล่าว นำตัวอย่างมากรองด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นนำถ่านไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิท (Osman และคณะ, 2010) เพื่อใช้ในการทดลองการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองการดูดซับสีเหลือง DDY3 ทำโดยการนำถ่าน CH และถ่าน AC ทั้งก่อนและหลังปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวปริมาณ 1 กรัม มาบรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เติมน้ำสีเหลือง DDY3 ที่  $C_0$  200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำขวดบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้มากรองแยกถ่านออกจากของเหลวด้วยผ้าขาวบางและวิเคราะห์

ตัวอย่างของเหลวเพื่อหาความเข้มข้นของสีเหลือง DDY3 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis พร้อมคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสารลดแรงตึงผิวของตัวดูดซับแต่ละชนิด

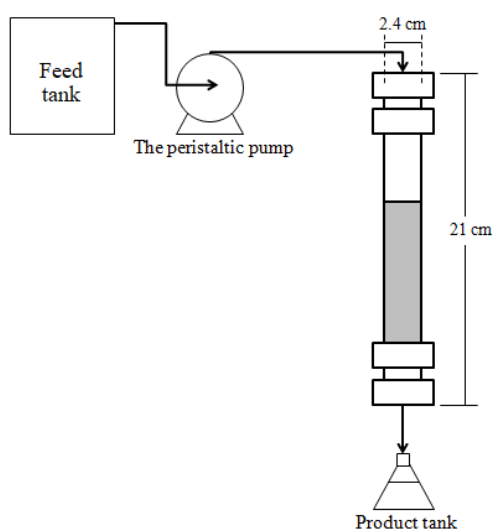
### 3.4.7 ศึกษาผลของพีเอชต่อการดูดซับ

สำหรับสีรีแอคทีฟ นำถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม มาบรรจุในขวดขนาด 240 มิลลิลิตร เติมสีเหลือง RDY145 ที่  $C_0$  700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าพีเอชเป็น 3 6 และ 9 ตามลำดับ ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลิตร (Ghazi Mokri และคณะ, 2015) จากนั้นนำขวดบรรจุลงในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มารองแยกถ่านออกจากของเหลวด้วยผ้าขาวบางและวิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวเพื่อหาความเข้มข้นของสีเหลือง RDY145 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Vis พร้อมคำนวณค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (Zhao และคณะ, 2017)

สำหรับสตีติสเฟิร์ส ทำการทดลองด้วยวิธีเดียวกันนี้โดยใช้ถ่าน MCH ดูดซับสีเหลือง DDY3 ที่  $C_0$  200 มิลลิกรัมต่อลิตร เก็บตัวอย่างที่เวลา 24 ชั่วโมง

### 3.4.8 ศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed column)

หน่วยปฏิบัติการคอลัมน์แบบเบดนิ่ง แสดงดังภาพประกอบที่ 3-17 ประกอบด้วยคอลัมน์แก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก 2.4 และ 2.8 เซนติเมตร ตามลำดับ สูง 21 เซนติเมตร คอลัมน์บรรจุถ่านด้วยอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงถ่าน เท่ากับ 1: 3 ด้านบนคอลัมน์เชื่อมต่อกับปั๊มดูดจ่ายของเหลวแบบปริสติก เพื่อป้อนสารละลายสีย้อมเข้าคอลัมน์ (Reynolds และคณะ, 1996)



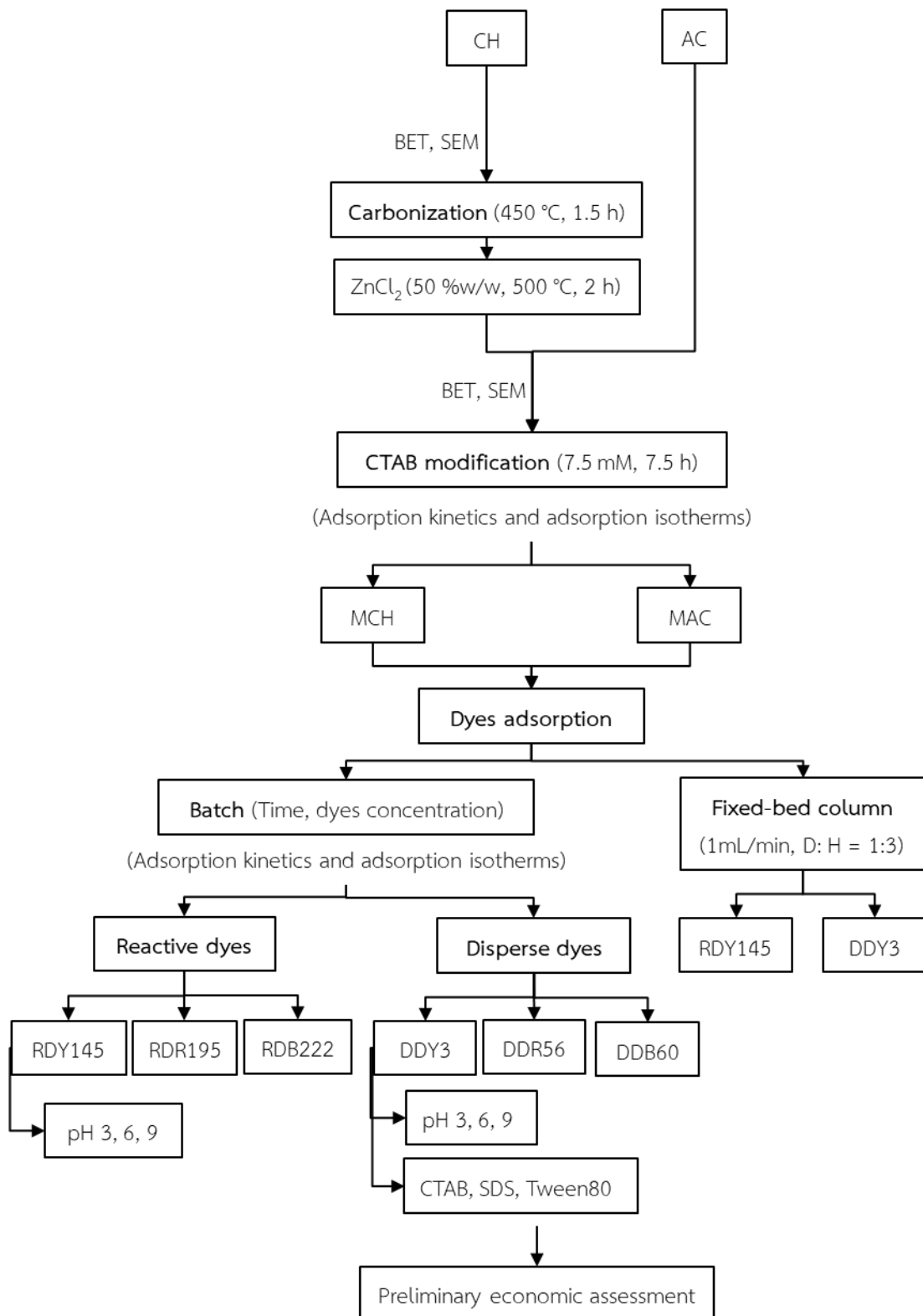
ภาพประกอบที่ 3-17 หน่วยปฏิบัติการคอลัมน์แบบเบดนิ่ง

สำหรับการทดลอง ให้สีเหลือง RDY145 เป็นตัวแทนสีรีแอคทีฟและสีเหลือง DDY3 เป็นตัวแทนสีดีสเพิร์สในการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง ทำการเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างถ่าน AC ถ่าน MAC ถ่าน MCH การทดลองดำเนินการโดยใช้ความเข้มข้นสารละลายสีเหลือง RDY145 ที่  $C_0$  700 มิลลิกรัมต่อลิตร และสีเหลือง DDY3 ที่  $C_0$  200 มิลลิกรัมต่อลิตร ป้อนสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิเมตรต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เข้าทางด้านบนของคอลัมน์ จับเวลาและเก็บตัวอย่างที่ทางออกด้านล่างทุกๆ 10 นาที และนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความเข้มข้นสีด้วยเครื่อง UV-Vis จนกระทั่งน้ำตัวอย่างที่ทางออกมีความเข้มข้นสีย้อมคงที่ (Ahmad และคณะ, 2010)

### 3.4.9 การประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดสีรีแอคทีฟ (สีเหลือง RDY145) กับสีดีสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3) ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ (ถ่าน CH และถ่าน MCH) พร้อมทั้งเปรียบเทียบต้นทุนที่ได้กับถ่าน AC ณ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ พร้อมทำการประเมินความเข้มข้นของสีย้อมทั้งสองกลุ่มภายหลังการดูดซับ เทียบกับมาตรฐานสีในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

จากวิธีการทดลองดังกล่าวข้างต้น ได้สรุปเป็นแผนผัง แสดงดังภาพประกอบที่ 3-18



ภาพประกอบที่ 3-18 แผนผังสรุปวิธีการทดลอง

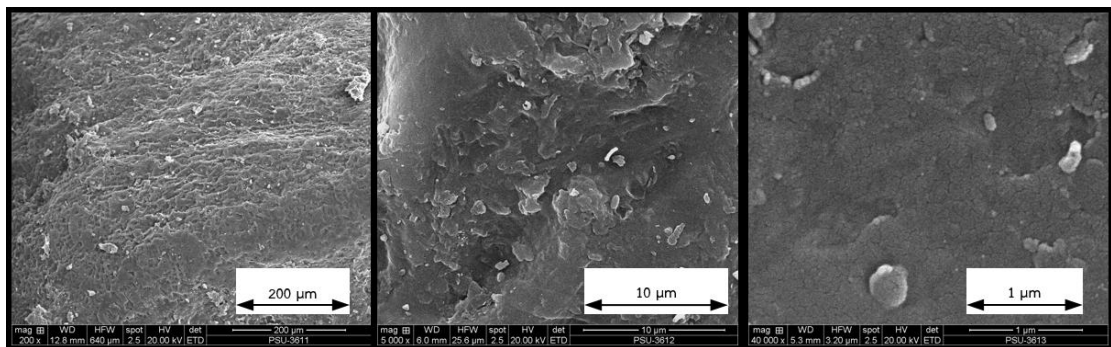
## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การดูดซับสรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์

##### 4.1.1 ผลการเตรียมตัวดูดซับ

ถ่าน CH ผ่านการคาร์บอนไอเซชันที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารระเหยอินทรีย์ต่างๆ และกระตุ้นการเกิดรูพรุน คุณสมบัติถ่านก่อนและหลังการกระตุ้นของถ่าน CH และถ่าน AC ซึ่งมีขนาดโดยเฉลี่ย 0.60 - 1.41 มิลลิเมตร ถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM แสดงดังภาพประกอบที่ 4-1 ถึง 4-3 และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET แสดงดังตารางที่ 4-1

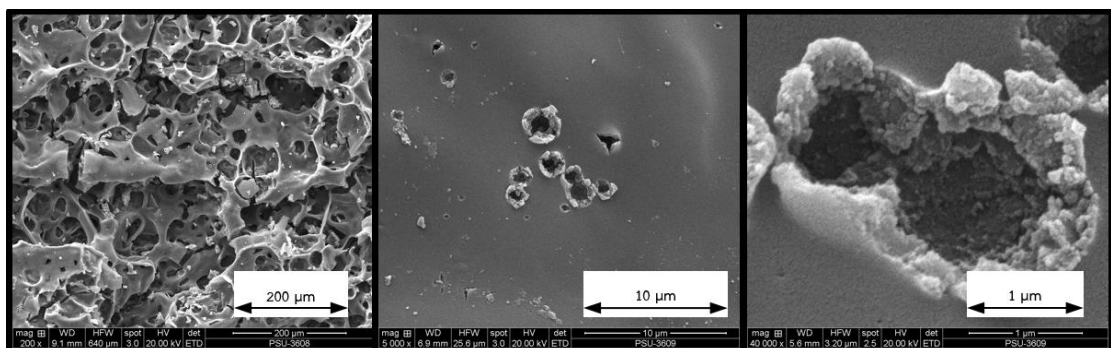


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

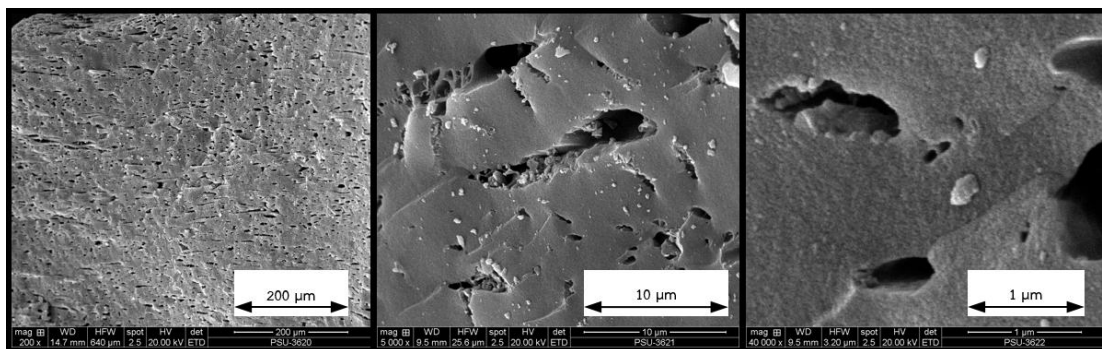


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-2 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-3 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน AC ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของถ่าน CH และถ่าน AC

พารามิเตอร์	ถ่าน AC	ถ่าน CH	
		ก่อนกระตุ้น	หลังกระตุ้น
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	1099.8	0.5	750.1
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	17.0	43.4	18.9
ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.4684	0.0006	0.3541

จากภาพประกอบที่ 4-1 และ 4-2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH พบว่าถ่าน CH มีโครงสร้างพื้นผิวเป็นรูพรุนมากขึ้นเมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  และจากภาพประกอบที่ 4-2 และ 4-3 เมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน AC พบว่าที่ระดับกำลังขยายเดียวกัน ถ่าน CH มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าถ่าน AC นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าถ่าน CH เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  จะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กลง โดยก่อนกระตุ้นขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ในระดับเมโซพอร์ส (Mesoporous) หรือมีขนาดอยู่ในช่วง 20 – 500 อังสตรอม (Mook และคณะ, 2016) และเมื่อผ่านการกระตุ้น รูพรุนเฉลี่ยมีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับไมโครพอร์ส (Microporous) หรือมีขนาดน้อยกว่า 20 อังสตรอม (Mook และคณะ, 2016) ทั้งนี้เนื่องจากการกระตุ้นเป็นการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ซึ่งสามารถซึมเข้าสู่โครงสร้างและกำจัดสิ่งตกค้างภายในรูพรุนหรือผิวของถ่าน เช่น เถ้า และน้ำมันห่าน ซึ่งอาจตกค้างภายหลังการคาร์บอนไนเซชัน ถ่านจึงมีความเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น (ศิษฏาภรณ์, 2550)

จากผลการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับถ่าน AC พบว่าถ่าน CH มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าและมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าถ่าน AC ซึ่งเป็นถ่านที่ได้มาจากการเผากระตุ้นกะลามะพร้าวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อันเป็นการกระตุ้นทางกายภาพ ทำให้หมู่คาร์บอนิลหลุดออกมาจำนวนมาก ทำให้ถ่าน AC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง แม้ว่าถ่าน CH จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนที่น้อย แต่ขนาดรูพรุนเฉลี่ยกว้างกว่าถ่าน AC เล็กน้อยอาจส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ เนื่องจากขนาดรูพรุนที่กว้างขึ้นทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ง่ายและดีขึ้น และยังถ่านมีปริมาตร

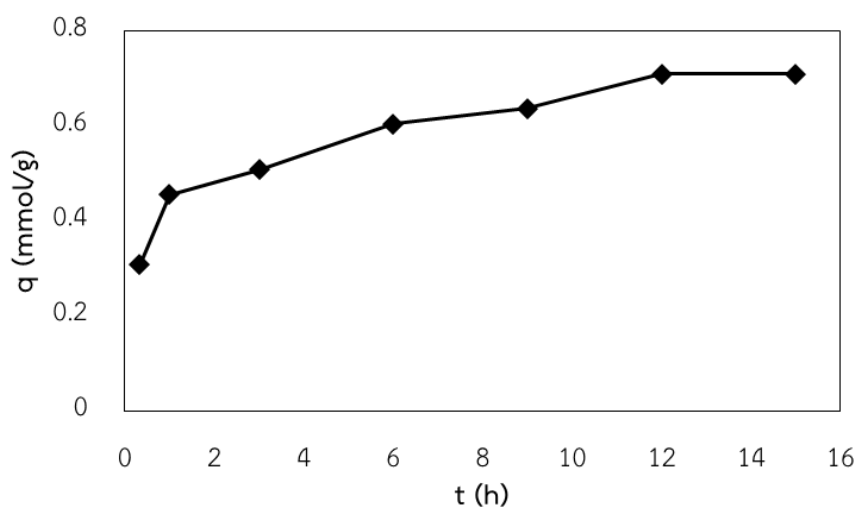
พูนมากหรือความลึกของถ่านสูง ช่วยให้ความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน (Vijayaraghavan และคณะ, 2009)

อย่างไรก็ตามจากรายงานผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถ่านที่ใช้เป็นตัวดูดซับสีส่วนใหญ่ มีพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ในช่วง 600 - 900 ตารางเมตรต่อกรัม เช่น งานวิจัยของ Sun และคณะ (2013) ศึกษาการดูดซับสีรีแอคทีฟ (สีแดง Reactive red 23 และสีน้ำเงิน Reactive blue 4) โดยใช้ถ่านจากสาหร่ายทะเลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก พบว่าถ่านที่ใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 683 ตารางเมตรต่อกรัม หรืองานวิจัยของ Mook และคณะ (2016) ศึกษาการดูดซับสีรีแอคทีฟ (สีดำ Reactive black 5) โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ถ่านมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 760 ตารางเมตรต่อกรัม และงานวิจัยของ Vijayaraghavan และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสีด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากขี้เลื่อย และถ่านหินธรรมชาติ ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีค่าประมาณ 900 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าถ่าน CH จากเปลือกเมล็ดกาแฟ มีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วงที่เหมาะสมและมีแนวโน้มที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นตัวดูดซับเพื่อทดแทนถ่าน AC ได้

#### 4.1.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)

##### 4.1.2.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

การทดลองทำโดยนำถ่าน CH ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  มาปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB โดยผลการศึกษาเวลาในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB 10 มิลลิโมลต่อลิตร ต่อปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1-15 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบที่ 4-4



ภาพประกอบที่ 4-4 เวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ  $C_0$  10 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที



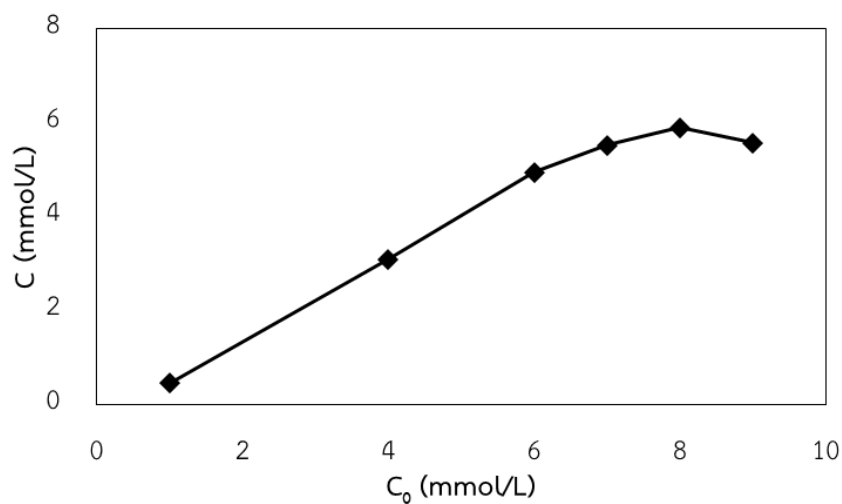
ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่านเพิ่มขึ้น และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง โดยถ่าน CH สามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ได้ 6.05 มิลลิโมลต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการดูดซับ 60.5 ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ 7.5 ชั่วโมง มาศึกษา  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่เหมาะสมในการดูดซับต่อไป

#### 4.1.2.2 ผลการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ในการดูดซับบนผิวถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ

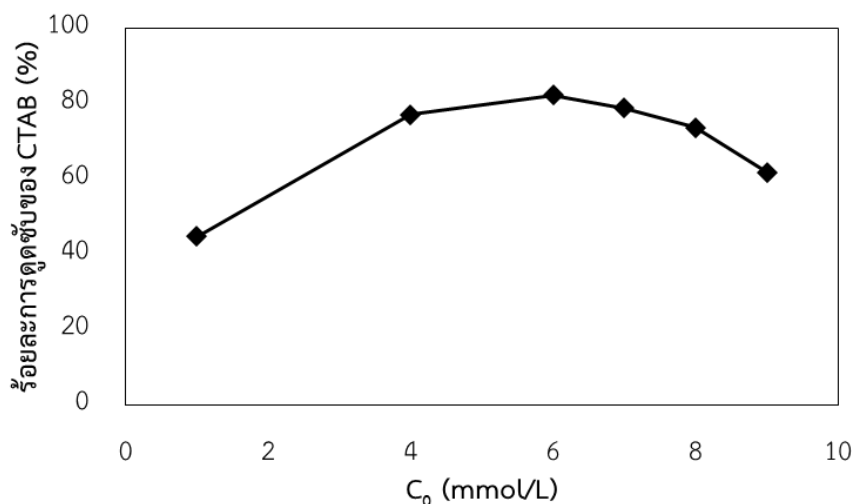
การทดลองดำเนินการโดยศึกษา  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณถ่าน CH 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง (ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้น ทุกความเข้มข้นสามารถเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ก่อนเวลา 7.5 ชั่วโมง) ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและบนผิวถ่าน CH ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ดังภาพประกอบที่ 4-5

ผลการทดลองพบว่าเมื่อ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB เพิ่มขึ้น การดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH เพิ่มขึ้นและมีปริมาณการดูดซับสูงสุด ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 7 มิลลิโมลต่อลิตร โดยสามารถดูดซับบนผิวถ่านได้สูงถึง 5.5 มิลลิโมลต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 78.6 ดังนั้นงานวิจัยได้เลือก  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 7.5 มิลลิโมลต่อลิตร ณ อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เวลา 7.5 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงสภาพถ่าน CH ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

นอกจากนี้การศึกษากการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน AC ด้วยการทดลองทำนองเดียวกัน พบว่าถ่าน AC สามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB ได้ร้อยละ 25.4 ดังนั้นความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ของถ่าน CH มากกว่าถ่าน AC ทั้งนี้อาจเนื่องจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน CH มีขนาดใหญ่กว่าถ่าน AC (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4-1) ทำให้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB แพร่ผ่านรูพรุนเข้าดูดซับได้ง่ายกว่าถ่าน AC ส่งผลให้ปริมาณการดูดซับในถ่าน CH สูงกว่าถ่าน AC



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 4-5 (ก) ปริมาณการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH (C) ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง (ข) ร้อยละการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้สภาวะที่เหมาะสมในปรับปรุงสภาพถ่าน CH และถ่าน AC สำหรับการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟ คือ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 7.5 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง

#### 4.1.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

##### CTAB

จากการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่านด้วยถ่าน CH ผลการทดลองการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ซึ่งอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ และการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH มีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (Ibrahim และคณะ, 2010; จิรภัทร์ และคณะ, 2557) ซึ่งค่า  $q_e$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน ณ สมดุล พบว่ามีค่าการดูดซับ 0.667 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ งานวิจัยของ Osman และคณะ (2010) ซึ่งศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก 8 ชนิด อาทิ Benzyltrimethyl ammonium chloride (BTMACl), Benzyltriethyl ammonium chloride (BTEACl), Benzyltributyl ammonium chloride (BTBACl), Benzyltrimethyldecyl ammonium chloride (BDMDACl), Benzyltrimethyltetradecyl ammonium chloride (BDMTDACl), Benzyltrimethylhexadecyl ammonium chloride (BDMHDAcL), N-dodecylpyridiniumchloride (N-DPCL) และ N-cetylpyridinium chloride (CPCL) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผลิตจากเส้นใยพอลิเมอร์ (Phenolic polymer fibers) หรืองานวิจัยของ Choi และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetylpyridinium chloride, CPC) บนถ่านกัมมันต์จากกราโนลา รวมทั้งงานวิจัยของ Ran และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Dimethylpabamidopropyl laurdimonium tosylate (DDABDT) บนเส้นผมของคน โดยงานวิจัยดังกล่าวได้รายงานผลการทดลองสอดคล้องกันว่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกบนผิวถ่านเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

#### 4.1.2.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก

##### CTAB

จากการศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณถ่าน CH 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง มาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่

**ตารางที่ 4-2** แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง

แบบจำลอง ไอโซเทอม การดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช		
	$q_{max}$ (mmol/g)	$k_L$ (L/mmol)	$R^2$	$k_F$ (mmol/g (L/mmol) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
ค่าตัวแปร	0.627	4.2647	0.988	0.5	8.41	0.635

จากตารางที่ 4-2 เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่าสมการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยสามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH ได้ว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Mi และคณะ, 2016) และจากการประเมินไอโซเทอมการดูดซับดังกล่าวพบว่าค่า  $q_{max}$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB คือ 0.627 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (0.667 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน) และผลการทดลองดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานวิจัย ได้แก่ งานวิจัยของ Krivova และคณะ (2013) ซึ่งศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก  $C_n$ TABr ด้วยตัวดูดซับสามชนิด คือ เส้นใยคาร์บอน ถ่านไม้ และแร่คาร์บอน รวมทั้งงานวิจัยของ Yakout และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่านกัมมันต์จากซักข้าวโพดซึ่งงานวิจัยดังกล่าวรายงานสอดคล้องกันว่าการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวประจุบวกบนผิวตัวดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

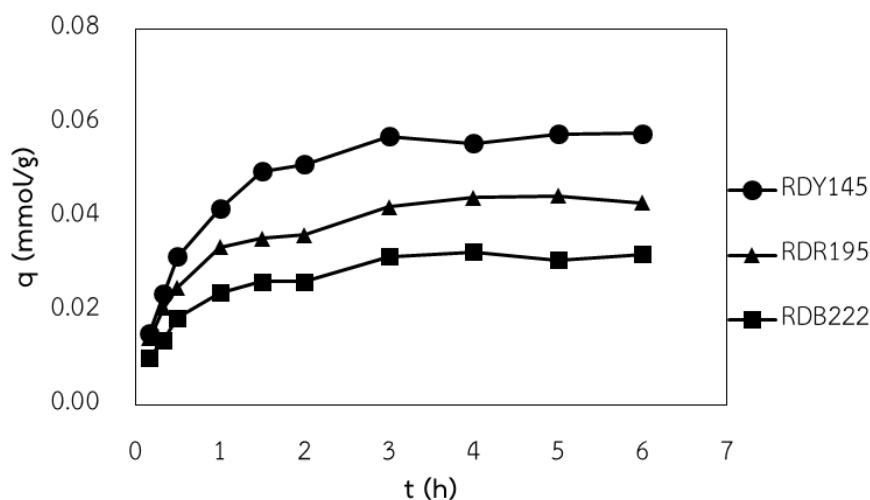
#### 4.1.3 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ของถ่าน CH

การทดลองการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการศึกษาโดยใช้ถ่าน CH โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพด้วย สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ดำเนินการทดลอง ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ผลการทดลองพบว่าถ่าน CH และถ่าน MCH สามารถดูดซับสีเหลือง RDY145 ได้ร้อยละ 21.1 และ 83.7 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่าน MCH สามารถดูดซับสีเหลือง RDY145 ได้มากกว่าถ่าน CH ถึง 4 เท่า เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหาง (Hydrophobic tail) ซึ่งแสดงสภาพไม่มีขั้วสามารถดูดซับลงบนพื้นผิวถ่านในส่วนที่ไม่มีขั้ว และส่วนหัว (Hydrophilic head) ซึ่งมีขั้วและแสดงอำนาจประจุบวก สามารถเปลี่ยนสภาพพื้นผิวของถ่านให้เป็นพื้นผิวประจุบวก ส่งผลต่อการดูดซับสีประจุลบ คือ สีเหลือง RDY145 ได้ดี (Puasa และคณะ, 2018)

#### 4.1.4 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีรีแอกทีฟ

การทดลองศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟสามชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 โดยสมบัติของสีทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 3-1 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน MCH 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-6



ภาพประกอบที่ 4-6 ผลของเวลาในการดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

ผลการทดลองพบว่าเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับของสีรีแอกทีฟทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 3 ชั่วโมงเท่ากัน โดยสีเหลือง RDY145 ถูกดูดซับได้สูงสุด รองลงมาคือ สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ โดยสามารถดูดซับได้ 586.0 498.0 และ 416.7 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือการดูดซับคิดเป็นร้อยละ 83.7 71.1 และ 59.6 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากขนาดมวลโมเลกุลของสีเหลือง RDY145 เล็กกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ (มวลโมเลกุลและขนาดของสีทั้งสามชนิดแสดงดังตารางที่ 3-1 และภาพประกอบที่ 3-2 ตามลำดับ) ทำให้สีเหลือง RDY145 สามารถถูกดูดซับบนถ่านได้มากกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222

#### 4.1.5 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีรีแอกทีฟ

จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีรีแอกทีฟ ได้นำผลจากการศึกษามาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีรีแอกทีฟ ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-3

**ตารางที่ 4-3** จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสองของการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง

สีย้อม	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	$k_1$ (1/min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$	$k_2$ (g/mmol-min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
RDY145	0.0184	0.0468	0.980	0.4373	0.0667	0.997
RDR195	0.0135	0.0312	0.959	0.8336	0.0467	0.994
RDB222	0.0159	0.0260	0.939	0.9664	0.0353	0.990

จากการพิจารณาค่า  $R^2$  จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ทั้งสามชนิดเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง คือ เป็นการดูดซับทางเคมี ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้และการดูดซับของสีทั้งสามชนิดบนถ่าน MCH มีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (Ibrahim และคณะ, 2010; จิรภัทร์ และคณะ, 2557) เมื่อพิจารณาค่า  $q_e$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH พบว่าการดูดซับสีเหลือง RDY145 มีค่ามากกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $q$  ของสีทั้งสามชนิดบนถ่าน MCH ที่ได้จากการทดลองดังภาพประกอบที่ 4-6 และค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ( $k_2$ ) เป็นค่าที่บอกถึงความเร็วในการดูดซับ ซึ่งค่า  $k_2$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 มีค่าน้อยกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ แสดงว่าอัตราเร็วในการดูดซับของสีเหลือง RDY145 สูงกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ ดังนั้นค่า  $k_2$  มีความสอดคล้องกับค่า  $q_e$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH

นอกจากนี้ผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ยังสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Ibrahim และคณะ (2010) ศึกษาจลนพลศาสตร์ในการดูดซับการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบสองชนิด ได้แก่ สีน้ำเงิน Acid blue (AB40) และสีน้ำเงิน Reactive Blue 4 (RB4) โดยใช้ฟางข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Hexadecyl pyridinium chloridemonohydrate (CPC) และงานวิจัยของ Namasivayam และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบ ได้แก่ สีน้ำเงิน Acid brilliant blue (Acid dye) และสีส้ม Procion orange (Reactive dye) โดยใช้ขุยมะพร้าว (Coir pith) ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวรายงานสอดคล้องกัน ว่าการดูดซับของสีชนิดประจุลบมีจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นไปตามอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

#### 4.1.6 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟ

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับดำเนินการ ณ สภาวะสมดุล  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ได้นำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-4

**ตารางที่ 4-4** แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริชจากการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สีย้อม	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช		
	$q_{\max}$ (mmol/g)	$k_L$ (L/mmol)	$R^2$	$k_F$ (mmol/g (L/mmol) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
RDY145	0.0709	29.401	1.000	0.15	2.15	0.968
RDR195	0.0504	45.372	0.992	0.09	2.94	0.813
RDB222	0.0348	137.616	0.999	0.05	4.69	0.855

จากการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟทั้งสามชนิด เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ อันแสดงถึงการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Mi และคณะ, 2016) โดยค่าพารามิเตอร์  $q_{\max}$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH ซึ่งบ่งชี้ค่าปริมาณที่ดูดซับสูงสุด แสดงให้เห็นว่าถ่าน MCH ดูดซับสีเหลือง RDY145 ได้สูงกว่า สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ ซึ่งค่า  $q_{\max}$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $q_e$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH ที่ได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ( $q_e$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 บนถ่าน MCH คือ 0.0667 0.0467 และ 0.0353 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน ตามลำดับ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสีเหลือง RDY145 มีขนาดโมเลกุลต่ำกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ (โมเลกุลของสีรีแอกทีฟแสดงดังตารางที่ 3-1) ซึ่งโมเลกุลต่ำแสดงถึงขนาดโมเลกุลที่เล็ก เป็นผลให้ถูกดูดซับบนผิวถ่านได้มากกว่า (Vijayaraghavan และคณะ, 2009) ในขณะที่ค่า  $k_L$  เป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานในการดูดซับหรือความแข็งแรงของแรงดึงดูดในการดูดซับระหว่างถ่านและสี โดยหากค่า  $k_L$  น้อย ความแข็งแรงระหว่างถ่านและสีจะมีค่าน้อย (Markandeya และคณะ, 2017) โดยผลการทดลองเห็นได้ว่าสีเหลือง RDY145 มีความแข็งแรงในการดูดซับน้อยกว่าสีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 ตามลำดับ ซึ่งความแข็งแรงในการดูดซับอาจจะส่งผลต่อการนำถ่านมาใช้ใหม่ (Regeneration) ได้ยากขึ้น

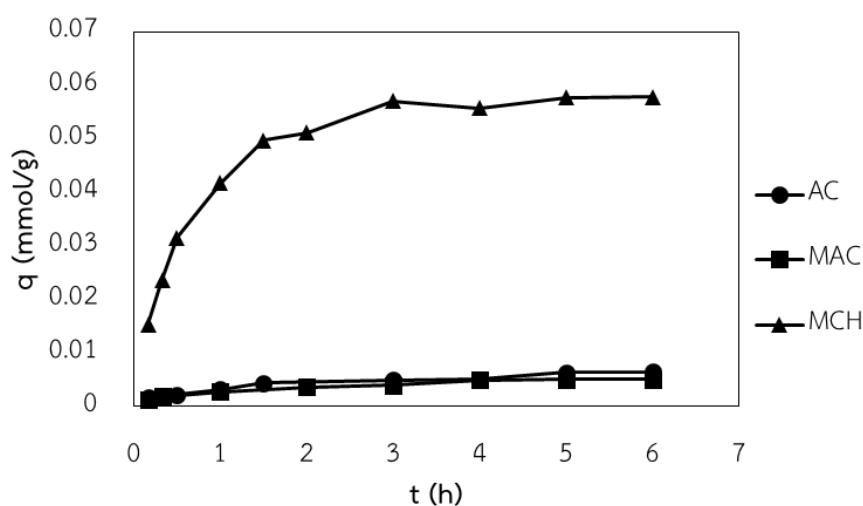
นอกจากนี้ผลการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีรีแอกทีฟทั้งสามชนิดยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา อาทิ งานวิจัย Ibrahim และคณะ (2010) ซึ่งศึกษาการดูดซับการดูดซับสีชนิดประจุลบ ได้แก่ สีน้ำเงิน Acid blue และสีน้ำเงิน Reactive Blue 4 โดยใช้ฟางข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก และงานวิจัยของ Al-Degs และคณะ (2008) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Reactive blue 2 สีแดง Reactive red 4 และสีเหลือง Reactive yellow 2 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์เช่นกัน

#### 4.1.7 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH

การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับของสีรีแอกทีฟที่พบในตัวดูดซับทั้งสามชนิด คือ ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH โดยในการศึกษาใช้สีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์เป็นตัวแทนในการศึกษา

##### 4.1.7.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง RDY145

การทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่านสามชนิดในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH โดยทำการทดลอง ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-7



ภาพประกอบที่ 4-7 เวลาการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับของสีบนถ่านทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 5 4 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยถ่าน MCH สามารถดูดซับสีได้สูงสุด 586.0 มิลลิกรัมต่อลิตร การดูดซับคิดเป็นร้อยละ 83.7 รองลงมา คือ ถ่าน AC และถ่าน MAC สามารถดูดซับได้ใกล้เคียงกัน คือ 65.3 และ 51.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละการดูดซับ 9.33 และ 7.29 ตามลำดับ จากผลการทดลองแม้ถ่าน AC จะมีพื้นที่ผิว (แสดงดังตารางที่ 4-1) ใกล้เคียงกับถ่าน MAC ทำให้การดูดซับสีไม่ต่างกันมาก แต่ตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด มีความสามารถในการดูดซับสีเหลือง RDY145 น้อยกว่าถ่าน MCH มาก อาจเนื่องมาจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน AC และถ่าน MAC ที่เล็กทำให้โมเลกุลของสีแพร่ผ่านรูพรุนได้ยากกว่าถ่าน MCH ซึ่งมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่กว้าง



ทำให้การดูดซับของสีบนถ่าน AC และถ่าน MAC ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของถ่าน โดยพฤติกรรมดูดซับของสีเหลือง RDY145 บนตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ได้ศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.1.7.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง RDY145

จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง RDY145 โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ได้นำผลการทดลองมาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH จากการทดลองก่อนหน้านี้ ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-5

**ตารางที่ 4-5** จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสองของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 6 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	$k_1$ (1/min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$	$k_2$ (g/mmol-min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
AC	0.488	0.0047	0.939	242.7	0.0061	0.965
MAC	0.424	0.0036	0.969	198.5	0.0058	0.981
MCH	0.018	0.0468	0.980	0.437	0.0667	0.997

เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  ของการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน AC และถ่าน MAC พบว่าการดูดซับสีเหลือง RDY145 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง เหมือนกับการดูดซับของสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน MCH โดยมีค่า  $q_e$  ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน MCH > ถ่าน AC  $\approx$  ถ่าน MAC ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $q$  ของสีเหลือง RDY145 ที่ได้จากการทดลอง (ภาพประกอบที่ 4-7) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีเหลือง RDY145 บนถ่านทั้งสามชนิดมีลักษณะเดียวกัน คือ เป็นการดูดซับทางเคมีที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ และการดูดซับมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป (Ibrahim และคณะ, 2010; จิรภัทร์ และคณะ, 2557) ในขณะที่ค่า  $k_2$  หรือค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ซึ่งค่า  $k_2$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน MCH มีค่าน้อยกว่าถ่าน MAC และถ่าน AC ตามลำดับ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับของถ่าน MCH สูงสุด เมื่อเทียบกับถ่าน MAC หรือถ่าน AC ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.1.7.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง RDY145

การทดลองทำโดยการนำถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH มาดูดซับสีเหลือง RDY145 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 และ 3 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC

ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงดังกล่าวนำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับ ด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช แสดงดังตารางที่ 4-6

**ตารางที่ 4-6** แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช		
	$q_{max}$ (mmol/g)	$k_L$ (L/mmol)	$R^2$	$k_F$ (mmol/g (L/mmol) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
AC	0.0062	14.3	0.967	0.007	3.22	0.882
MAC	0.0058	11.6	0.971	0.006	3.42	0.953
MCH	0.0709	29.4	1.000	0.154	2.15	0.968

จากการพิจารณาค่า  $R^2$  พบว่าการดูดซับของถ่านทั้งสามชนิดเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ อันแสดงถึงการดูดซับเกิดแบบชั้นเดียว (Mi และคณะ, 2016) โดยค่า  $q_{max}$  ของถ่าน MCH > และถ่าน AC  $\approx$  ถ่าน MAC ซึ่งค่า  $q_{max}$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $q_e$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่านที่ได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (ค่า  $q_e$  ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH คือ 0.0061 0.0058 และ 0.0667 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน MCH ใหญ่กว่าถ่าน AC (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแสดงดังตารางที่ 4-1) มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของขนาดตัวดูดซับกับขนาดรูพรุน อาทิ งานวิจัยของ Vijayaraghavan และคณะ (2009) ศึกษาการดูดซับสี Remazol โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 2 ชนิด คือ ถ่านจากขี้เลื่อยและถ่านหิน กล่าวว่าถ่านที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กทำให้การดูดซับน้อยลงได้ถ้าตัวถูกดูดซับมีขนาดที่ใหญ่กว่า งานวิจัยของ Krivova และคณะ (2013) และงานวิจัยของ Ip และคณะ (2010) กล่าวไปในทางเดียวกันว่า ขนาดรูพรุนที่ทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถเข้าดูดซับได้ต้องมีขนาดอย่างน้อย 1.30 – 1.80 เท่าของความกว้างโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ดังนั้นในการทดลองนี้ ขนาดโมเลกุลของสีเหลือง RDY145 มีด้านกว้างเท่ากับ 12.50 อังสตรอม (ขนาดโมเลกุลแสดงดังตารางที่ 3-1) ซึ่งขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านควรมีค่าอยู่ในช่วง 16.25 – 22.50 อังสตรอม ถึงจะทำให้สีแพร่เข้าดูดซับในรูพรุนได้ง่าย เมื่อพิจารณาถ่าน MAC ซึ่งผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB พบว่าการปรับปรุงสภาพดังกล่าวไม่ส่งผลต่อขนาดรูพรุน (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4-1) หรือการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง RDY145 เนื่องจากถ่าน AC แม้จะมีปริมาตรรูพรุนสูง แต่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็ก ซึ่งหมายถึงรูพรุนมีลักษณะแคบและลึก ซึ่งอาจทำให้สารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB ดูดซับภายในรูพรุนได้น้อย

รวมทั้งสีเหลือง RDY145 ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่อาจแพร่เข้าไปดูดซับภายในรูพรุนได้ยาก ดังนั้นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่าน AC มากนัก

อย่างไรก็ตามค่า  $k_L$  ของการดูดซับด้วยถ่าน MCH > ถ่าน AC  $\approx$  ถ่าน MAC อันแสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับระหว่างสีเหลือง RDY145 บนถ่าน MCH ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่าน AC และถ่าน MAC จึงเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านได้ แต่ให้ความแข็งแรงในการดูดซับมาก และอาจส่งผลต่อกระทบต่อการนำถ่านมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการนำถ่านมาใช้ใหม่อาจต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของการดูดซับและการเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมเพื่อให้กระบวนการนำถ่านมาใช้ใหม่สามารถทำได้ง่ายมากขึ้น

นอกจากนี้การศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบจากวัสดุเหลือทางการเกษตร มีการศึกษาอย่างกว้างขวางและพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ และค่า  $q_{max}$  ของการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-7

**ตารางที่ 4-7** ค่า  $q_{max}$  ของการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ จากการทำนายด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ตัวดูดซับ	สีย้อม	$q_{max}$ (mmol/g)	แหล่งที่มา
ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม	Reactive Black 5	0.0238	Mook และคณะ (2016)
ถ่านกัมมันต์จากสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i>	Reactive red 23	0.0888	Sun และคณะ (2013)
ถ่านกัมมันต์จากสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i>	Reactive blue 171	0.0562	Sun และคณะ (2013)
ถ่านกัมมันต์จากสาหร่าย <i>Enteromorpha prolifera</i>	Reactive blue 4	0.2127	Sun และคณะ (2013)
ถ่านจากต้นข้าวโพดที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB	Orange II	0.0768	Mi และคณะ (2016)
ฟางข้าวสาลีที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB	Congo red	0.1022	Zhang และคณะ (2014)
ฟางข้าวสาลีที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Hexadecylpyridinium bromide (CPB)	Light green	0.0883	Su และคณะ (2013)
เปลือกถั่วลิสงที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CPB	Light green	0.1844	Zhao และคณะ (2017)
ถ่าน MCH	RDY145	0.0709	งานวิจัยนี้
ถ่าน MCH	RDR195	0.0504	งานวิจัยนี้

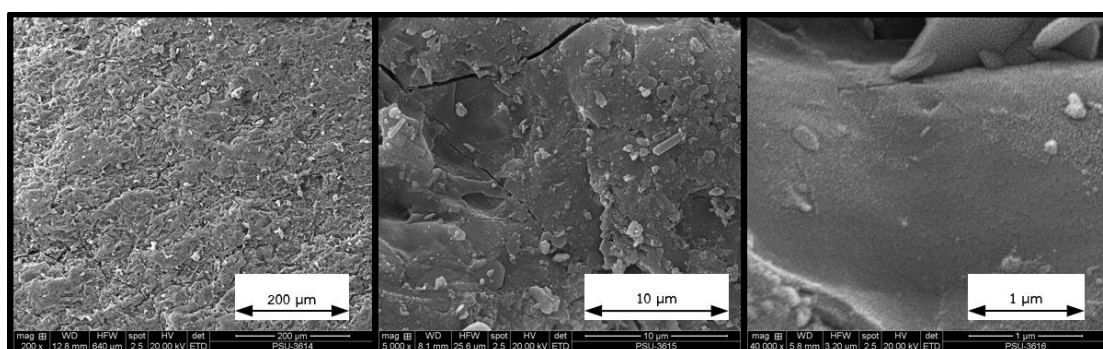
ตัวดูดซับ	สีย้อม	$q_{max}$ (mmol/g)	แหล่งที่มา
ถ่าน MCH	RDB222	0.0348	งานวิจัยนี้
ถ่าน AC	RDY145	0.0062	งานวิจัยนี้
ถ่าน MAC	RDY145	0.0058	งานวิจัยนี้

ซึ่งจากข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าค่า  $q_{max}$  ของการดูดซับสีน้ำเงิน Reactive blue 4 บนถ่านกัมมันต์จากสาหร่าย *Enteromorpha prolifera* (Sun และคณะ, 2013) สูงสุดถึง 0.2127 มิลลิโมลต่อกรัม และค่า  $q_{max}$  ของการดูดซับสีดำ Reactive black 5 บนถ่านกัมมันต์กะลา ปาล์ม (Mook และคณะ, 2016) น้อยที่สุดเท่ากับ 0.0238 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งในการทดลองนี้ผลการทดลองการดูดซับสีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) บนถ่าน MCH พบว่ามีค่า  $q_{max}$  อยู่ในช่วง 0.0348 - 0.0709 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน ดังนั้นถ่าน MCH จึงมีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ทดแทนถ่าน AC เพื่อดูดซับสีรีแอกทีฟได้

## 4.2 การดูดซับสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์

### 4.2.1 ผลการเตรียมตัวดูดซับ

สำหรับถ่าน CH ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์ส ได้นำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิว ทั้งก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง คุณสมบัติถ่านก่อนและหลังการทำการกระตุ้นพร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน AC วิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ BET แสดงดังภาพประกอบที่ 4-8 ถึง 4-10 และตารางที่ 4-8

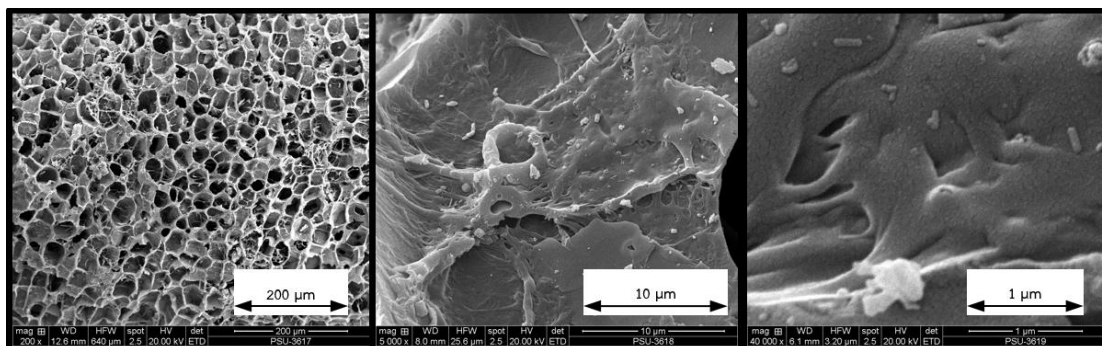


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-8 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

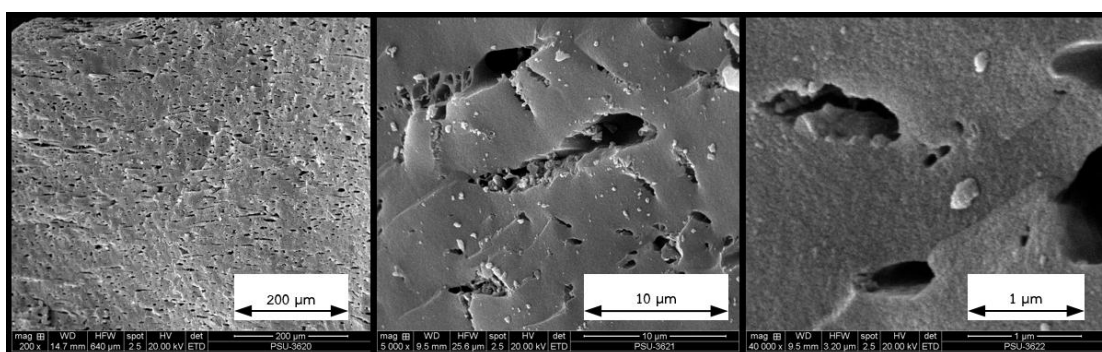


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-9 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4-10 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน AC ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET ของถ่าน CH และถ่าน AC

พารามิเตอร์	ถ่าน AC	ถ่าน CH	
		ก่อนกระตุ้น	หลังกระตุ้น
พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	1099.8	1.2	856.9
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)	17.0	150.0	18.2
ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.4684	0.0043	0.3904

จากภาพประกอบที่ 4-8 และ 4-9 พบว่าถ่าน CH ที่ใช้ในการทดลองเพื่อดูดูดซับสีย้อมเพิร์สเมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วมีลักษณะโครงสร้างพื้นผิวเป็นรูพรุนมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน AC ดังภาพประกอบที่ 4-9 และ 4-10 พบว่าที่ระดับกำลังขยายเดียวกันถ่าน CH มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าถ่าน AC นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET จากตารางที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าถ่าน CH หลังกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  มีพื้นที่ผิวมากขึ้น และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กลง และเมื่อเปรียบเทียบกับถ่าน AC พบว่าถ่าน CH มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าและมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าถ่าน AC แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวจำเพาะยังอยู่ในช่วง 600 - 900 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีราย

งานวิจัยหลากหลายเห็นตรงกันว่า มีพื้นที่ผิวจำเพาะในช่วงที่เหมาะสมและมีแนวโน้มที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นตัวดูดซับเพื่อทดแทนถ่าน AC ได้ อาทิ งานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์ส (สีแดง Disperse red 167) โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากลำไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) พบว่าถ่านที่ใช้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 747 ตารางเมตรต่อกรัม หรืองานวิจัยของ Gerçel และคณะ (2008) ศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์ส (สีส้ม Disperse orange 25) โดยใช้ถ่านกัมมันต์จาก *Euphorbia rigida* ถ่านมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 741.21 ตารางเมตรต่อกรัม

นอกจากนี้การศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH และถ่าน AC ด้วยการทดลองทำนองเดียวกันกับถ่านที่ใช้ในการดูดซับสีรีแอคทีฟ พบว่าถ่าน CH และถ่าน AC สามารถดูดซับสารลดแรงตึงผิวประจุบวก CTAB ได้ร้อยละ 28.2 และ 25.4 ตามลำดับ และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน CH มีค่ามากกว่าถ่าน AC อันแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำไปศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สด้วยถ่านดังกล่าว

#### 4.2.2 ผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH

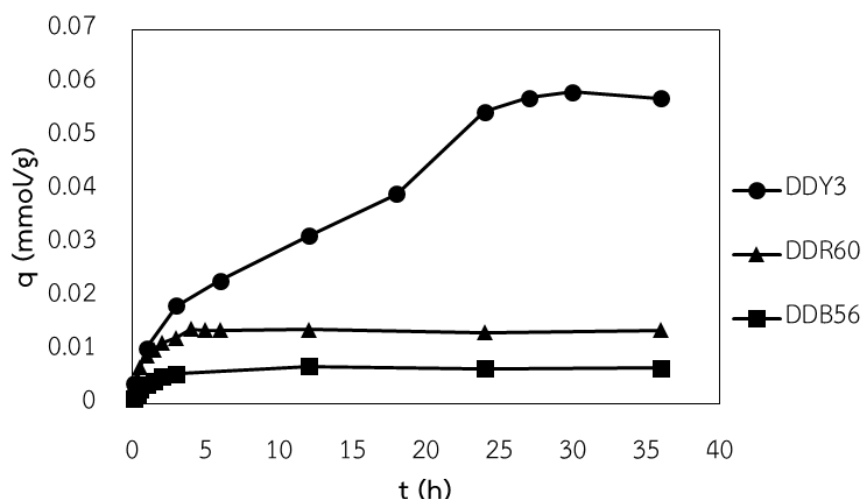
การทดลองการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการศึกษาโดยใช้ถ่าน CH เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก่อนและหลังปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ดำเนินการทดลอง ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลการทดลอง พบว่าก่อนปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ถ่าน CH สามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้ร้อยละ 86.3 และหลังปรับปรุงสภาพถ่าน MCH มีความสามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ลดลงเล็กน้อยที่ร้อยละ 79.5 ทั้งนี้การดูดซับสีเหลือง DDY3 มีอิทธิพลหลักมาจากแรงดึงดูดแบบแวนเดอร์วาลส์ระหว่างสีเหลือง DDY3 ซึ่งไม่มีขั้วและผิวถ่าน CH ซึ่งไม่มีขั้ว และส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่ดูดซับบนผิวของถ่าน MCH ซึ่งมีความสามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ลดลงอาจเนื่องมาจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB อาจมีส่วนในการขัดขวางการแพร่ของสีเข้าสู่บริเวณผิวของถ่าน MCH อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพเป็นไปอย่างเล็กน้อย และการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวในถ่าน MCH อาจมีส่วนช่วยให้การเปียกผิวและการดูดซับได้ดีและรวดเร็ว (Holmberg และคณะ, 2003) ดังนั้นถ่าน MCH จึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาถัดไป

#### 4.2.3 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีดิสเพิร์ส

การทดลองศึกษาการดูดซับสีดิสเพิร์สแต่ละชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน MCH 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 36 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับสีดิสเพิร์สทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 24 และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยสีเหลือง DDY3 สีแดง

DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 สามารถดูดซับได้ 159.0 46.4 และ 19.4 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือการดูดซับคิดเป็นร้อยละ 79.5 23.2 และ 9.7 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดมวลโมเลกุลของสีเหลือง DDY3 เล็กกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ (มวลโมเลกุลและขนาดของสีทั้งสามชนิด แสดงดังตารางที่ 3-1 และภาพประกอบที่ 3-3 ตามลำดับ) สีเหลือง DDY3 จึงสามารถแพร่ผ่านรูพรุน ตัวดูดซับได้มากและเข้าสู่สมดุลช้ากว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56



ภาพประกอบที่ 4-11 ผลของเวลาในการดูดซับสีดิสเพิร์สสามชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

#### 4.2.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส

จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีดิสเพิร์ส ได้นำผลจากการศึกษามาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีดิสเพิร์ส ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสองของการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 36 ชั่วโมง

สีย้อม	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	$k_1$ (1/min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$	$k_2$ (g/mmol-min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
DDY3	0.0009	0.0480	0.993	0.0727	0.0473	0.967
DDR60	0.0128	0.0112	0.971	1.4749	0.0158	0.996

สีย้อม	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	$k_1$ (1/min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$	$k_2$ (g/mmol-min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
DDB56	0.0160	0.0048	0.980	1.9751	0.0077	0.970

จากการพิจารณาค่า  $R^2$  จลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง คือ เป็นแบบจำลองที่อธิบายว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (Ibrahim และคณะ, 2010) สำหรับการดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง เป็นแบบจำลองที่อธิบายว่าเป็นการดูดซับทางเคมี ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (Ibrahim และคณะ, 2010) เมื่อพิจารณาค่า  $q_e$  ของสีย้อมสีสเปกตรัมสีน้ำเงิน MCH พบว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 มีค่ามากกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $q$  ของสีย้อมสีสเปกตรัมสีน้ำเงิน MCH ที่ได้จากการทดลอง (ภาพประกอบที่ 4-11) ทั้งนี้เนื่องมาจากสีเหลือง DDY3 มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าสีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ (มวลโมเลกุลและขนาดของสีย้อมสีสเปกตรัมสีน้ำเงินที่ 3-1 และภาพประกอบที่ 3-3 ตามลำดับ) มวลโมเลกุลต่ำแสดงถึงขนาดโมเลกุลที่เล็ก ทำให้โมเลกุลสีขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของถ่านได้มากกว่าโมเลกุลสีขนาดใหญ่ (Vijayaraghavan และคณะ, 2009)

นอกจากนี้ผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสีแดง DDR60 ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kisku และคณะ (2015) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมชนิดต่างๆ ได้แก่ สีน้ำเงิน Disperse blue และสีส้ม Disperse orange โดยใช้ซีโอไลต์ และงานวิจัยของ Markandeya และคณะ (2017) ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีส้ม Disperse Orange 25 และสีน้ำเงิน Disperse Blue 79: 1 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากซีโอไลต์ (Cenospheres activated carbon composites) ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีย้อมสีเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการดูดซับทางเคมีและปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้ (Ghazi Mokri และคณะ, 2015) นอกจากนี้ผลการทำนายด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang (2012) ซึ่งศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีแดง Disperse Red 167 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

#### 4.2.5 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมสี

การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับดำเนินการ ณ สภาวะสมดุล ค่า  $C_0$  ของสีย้อมสี 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ ผลการศึกษาได้นำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-10



**ตารางที่ 4-10** แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริชจากการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสียสเฟิร์ส 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ

สีย้อม	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช		
	$q_{max}$ (mmol/g)	$k_L$ (L/mmol)	$R^2$	$k_F$ (mmol/g (L/mmol) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
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

จากการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสียสเฟิร์สทั้งสามชนิด เมื่อพิจารณาค่า  $R^2$  พบว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช อันแสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Mi และคณะ, 2016) และการดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงถึงการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Mi และคณะ, 2016) โดยค่า  $q_{max}$  จากการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH มีค่าใกล้เคียงกับค่า  $q_e$  จากการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH ที่ได้จากแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองอีกด้วย (ค่า  $q_e$  ของการดูดซับสีแดง DDR60 บนถ่าน MCH คือ 0.0158 มิลลิโมลต่อกรัมถ่าน)

ผลการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา อาทิ งานวิจัยของ Jadhav และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 และสีแดง Disperse red 156 โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ ขี้เลื่อย ขี้เลื่อยพอลิเมอร์ และถ่านจากขี้เลื่อย รวมทั้งงานวิจัยของ Wang (2013) ศึกษาการดูดซับสีแดง Disperse Red 167 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่ ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช

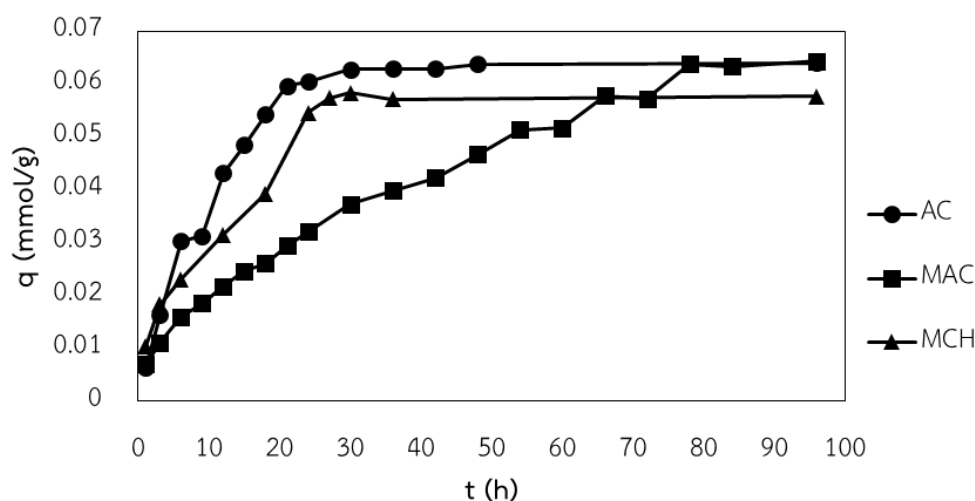
นอกจากนี้ผลการทำนายไอโซเทอมการดูดซับสีแดง DDR60 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมานี้ อาทิ งานวิจัยของ Konicki และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดประจุลบ (สีเขียว Nonionic dye Direct Green 97, DG97) บนถ่านคาร์บอน (Hollow mesoporous carbon nanospheres, HMCN) และงานวิจัยของ Markandeya คณะ (2017) ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีส้ม Disperse Orange 25 และสีน้ำเงิน Disperse Blue 79: 1 โดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Cenospheres activated carbon composites) ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

#### 4.2.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH

การทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่านสามชนิด คือ ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์

##### 4.2.6.1 ผลการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพถ่านสามชนิดในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ถ่าน AC ถ่าน ถ่าน MAC และถ่าน MCH โดยทำการทดลอง ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 96 ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4-12



ภาพประกอบที่ 4-12 เวลาการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีดีสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อ นาที

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้น การดูดซับของสีบนถ่านทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH เข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสภาพด้วย สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB อาจไม่ส่งผลต่อการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC และ MAC มากนัก โดยถ่าน AC สามารถดูดซับได้ 168.6 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 84.3 ขณะที่ถ่าน MAC สามารถดูดซับได้ 171.6 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละ 85.8 ซึ่งถ่าน MAC ต้องใช้เวลาเข้าสู่ สมดุลนานถึง 78 ชั่วโมง การเข้าสู่สมดุลที่ช้าอาจเนื่องมาจากการขัดขวางการแพร่ของโมเลกุลสี ซึ่งมี สมบัติไม่มีขั้ว เมื่อถูกดูดซับจะแพร่ผ่านส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวเข้าสู่บริเวณผิวถ่านและส่วนหาง ของสารลดแรงตึงผิว ส่วนถ่าน MCH สามารถดูดซับสีเหลือง DDY3 ได้ 159.0 มิลลิกรัมต่อลิตร คิด เป็นร้อยละ 79.5 ซึ่งน้อยกว่าถ่าน AC และถ่าน MAC เนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่าน AC (แสดงดัง ตารางที่ 4-8) แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน MCH มีความใกล้เคียงกับถ่าน AC

และถ่าน MAC และเข้าสู่สมดุลได้เร็วใกล้เคียงกับถ่าน AC ซึ่งทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถ่าน MCH มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย (แสดงดังตารางที่ 4-8) ที่กว้างทำให้สีเหลือง DDY3 เข้าดูดซับบนผิวถ่านได้เร็ว พฤติกรรมการดูดซับของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ได้ศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.2.6.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3

จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3 โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ได้นำผลการทดลองมาทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับของถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH จากการทดลองก่อนหน้า ด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง แสดงดังตารางที่ 4-11

**ตารางที่ 4-11** จลนพลศาสตร์ในการดูดซับด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและสอง ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC และถ่าน MAC พร้อมเปรียบเทียบกับถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 - 96 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง			อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง		
	$k_1$ (1/min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$	$k_2$ (g/mmol-min)	$q_e$ (mmol/g)	$R^2$
AC	0.104	0.0660	0.971	0.74	0.0943	0.924
MAC	0.024	0.0564	0.995	1.32	0.0531	0.930
MCH	0.001	0.0480	0.993	0.07	0.0473	0.967

เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  ของการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับสีเหลือง DDY3 ในการนำเสียดสีเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC และถ่าน MAC เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง เหมือนกับการดูดซับของสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH โดยมีค่า  $q_e$  ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC > ถ่าน MAC > ถ่าน MCH ซึ่งค่า  $q_e$  ใกล้เคียงกับค่า  $q$  ของสีเหลือง DDY3 ที่ได้จากการทดลอง (ภาพประกอบที่ 4-12) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสีเหลือง DDY3 บนถ่านทั้งสามชนิดมีลักษณะเดียวกัน คือ เป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ (Ibrahim และคณะ, 2010) ในขณะที่ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ( $k_1$ ) ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC มากกว่าถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ แสดงว่าถ่าน AC มีอัตราการดูดซับของสีเหลือง DDY3 เร็วกว่าถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ

#### 4.2.6.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำโดยการนำถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH มาดูดซับสีเหลือง DDY3 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ ผลการศึกษาได้นำมาทำนายไอโซเทอมการดูดซับด้วยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช แสดงดังตารางที่ 4-12

**ตารางที่ 4-12** แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดริช ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดริช		
	$q_{max}$ (mmol/g)	$k_L$ (L/mmol)	$R^2$	$k_F$ (mmol/g (L/mmol) <sup>1/n</sup> )	n	$R^2$
AC	0.255	2.91	0.826	0.424	1.16	0.994
MAC	0.174	5.70	0.741	0.362	1.33	0.946
MCH	0.112	7.51	0.958	0.191	1.65	0.971

จากการพิจารณาค่า  $R^2$  พบว่าถ่านทั้งสามชนิดเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช อันแสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Mi และคณะ, 2016) ค่าคงที่ของฟรุนดริช อาทิค่า  $k_F$  และ n ซึ่งค่า  $k_F$  บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับ และค่า n บ่งบอกถึงพลังงานหรือความแข็งแรงในการดูดซับบนผิวถ่าน (Markandeya และคณะ, 2017) ซึ่งจากการทดลองค่า  $k_F$  ของการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC มากกว่าถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการแพร่ของโมเลกุลสีเข้าดูดซับบนพื้นผิวถ่าน ดังคำอธิบายก่อนหน้า (ภาพประกอบ 4-12) และค่า n ของการดูดซับสีด้วยถ่าน MCH มากกว่าถ่าน MAC และถ่าน AC ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าการปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ทำให้การดูดซับแข็งแรงขึ้น

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC เข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วกว่าถ่าน MCH และถ่าน MAC ตามลำดับ เนื่องจากสภาพพื้นผิวถ่าน AC ส่วนที่ไม่มีขี้ผึ้ง (Krivova และคณะ, 2013) ทำให้สีเหลือง DDY3 ซึ่งเป็นชนิดไม่มีประจุ สามารถเข้าดูดซับบนผิวถ่านด้วยแรงดึงดูดแบบไม่มีขี้ผึ้งได้ดีกว่าถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว (ถ่าน MAC และถ่าน MCH) ซึ่งส่วนหัวที่มีประจุของสารลดแรงตึงผิวอาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีเพื่อแพร่เข้าสู่ผิวถ่าน นอกจากนี้การดูดซับด้วยถ่าน MCH เข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วกว่าถ่าน MAC เนื่องจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่าน MCH ใหญ่กว่าถ่าน MAC (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านแสดงดังตารางที่ 4-8) ซึ่งอาจมีส่วนช่วยให้การแพร่ของโมเลกุลสีเป็นไปได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB อาจไม่ส่งเสริมการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีดีสเพิร์สมากนัก

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับสีดีสเพิร์สกับงานวิจัยต่างๆ ซึ่งเป็นศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทางการเกษตร โดยค่า  $q_e$  ของสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-13

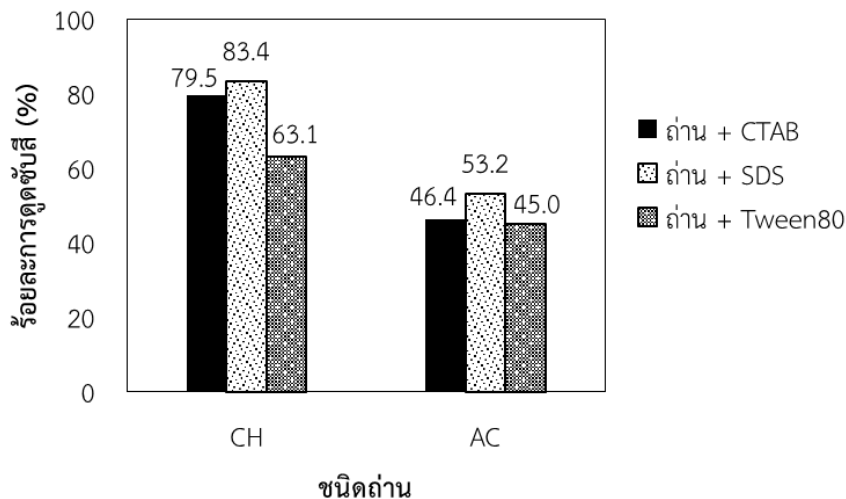
**ตารางที่ 4-13** ค่า  $q_e$  ของสีย้อมบนตัวดูดซับต่างๆ จากการทำนายด้วยแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งหรือสองของการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุด้วยตัวดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ตัวดูดซับ	สีย้อม	$q_e$ (mmol/g)	แหล่งที่มา
ถ่านกัมมันต์จากเมล็ด Iraqi date	Disperse blue 26	0.0273	Halbus และคณะ (2013)
ถ่านกัมมันต์จากต้นไผ่	Disperse Red 167	0.0034	Wang (2013)
ซีลื้อลอย	Disperse blue	0.0019	Kisku และคณะ (2015)
ซีลื้อลอย	Disperse orange	0.0039	Kisku และคณะ (2015)
ซีลื้อลอย	Disperse blue 26	0.0012	Jadhav และคณะ (2004)
ซีลื้อลอย	Disperse red 156	0.0024	Jadhav และคณะ (2004)
ซีลื้อลอยพอลิเมอร์	Disperse blue 26	0.0012	Jadhav และคณะ (2004)
ซีลื้อลอยพอลิเมอร์	Disperse red 156	0.0012	Jadhav และคณะ (2004)
ถ่านกัมมันต์จากซีลื้อลอย	Disperse blue 26	0.0013	Jadhav และคณะ (2004)
ถ่านกัมมันต์จากซีลื้อลอย	Disperse red 156	0.0022	Jadhav และคณะ (2004)
ถ่าน MCH	DDY3	0.0480	งานวิจัยนี้
ถ่าน MCH	DDR60	0.0158	งานวิจัยนี้
ถ่าน MCH	DDB56	0.0048	งานวิจัยนี้
ถ่าน MAC	DDY3	0.0564	งานวิจัยนี้
ถ่าน AC	DDY3	0.0660	งานวิจัยนี้

จากรายงานผลการทดลองการศึกษาการดูดซับสีย้อมชนิดไม่มีประจุที่ผ่านมา พบว่าค่า  $q_e$  ของการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 ด้วยถ่านกัมมันต์จากเมล็ด Iraqi date สูงสุดถึง 0.0273 มิลลิโมลต่อกรัม (Halbus และคณะ, 2013) และค่า  $q_e$  ของการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 26 ด้วยซีลื้อลอยและซีลื้อลอยพอลิเมอร์น้อยสุดเท่ากับ 0.0012 มิลลิโมลต่อกรัม (Jadhav และคณะ, 2004) ซึ่งในการทดลองนี้การดูดซับสีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) ด้วยถ่าน MCH พบว่าค่า  $q_e$  อยู่ในช่วง 0.0048 – 0.0480 มิลลิโมลต่อกรัม ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเดียวกับผลการรายงานของงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นถ่าน MCH จึงนับเป็นตัวดูดซับซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีดิสเพิร์สต่อไปได้ และมีแนวโน้มเทียบเท่าถ่าน AC ได้

4.2.7 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH และถ่าน AC ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

การทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC โดยทำการเปรียบเทียบการปรับปรุงสภาพถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวสามชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ซึ่งสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดนี้เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม และมีความแตกต่างของลักษณะประจุที่ส่วนหัว มวลโมเลกุลและขนาดหัวของสารลดแรงตึงผิวด้วย (มวลโมเลกุลและขนาดของสารลดแรงตึงผิวแสดงดังตารางที่ 3-1 และภาพประกอบที่ 3-4 ตามลำดับ) โดยถ่านแต่ละชนิดถูกนำมาปรับปรุงสภาพโดยใช้  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 10 มิลลิโมลต่อลิตร เขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพแล้วมาทำการศึกษาการดูดซับสีเหลือง DDY3 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองการดูดซับด้วยถ่าน CH และถ่าน AC ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดแสดงดังภาพประกอบที่ 4-13



ภาพประกอบที่ 4-13 ร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC ที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (ถ่าน + CTAB) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS (ถ่าน + SDS) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 (ถ่าน + Tween80) ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

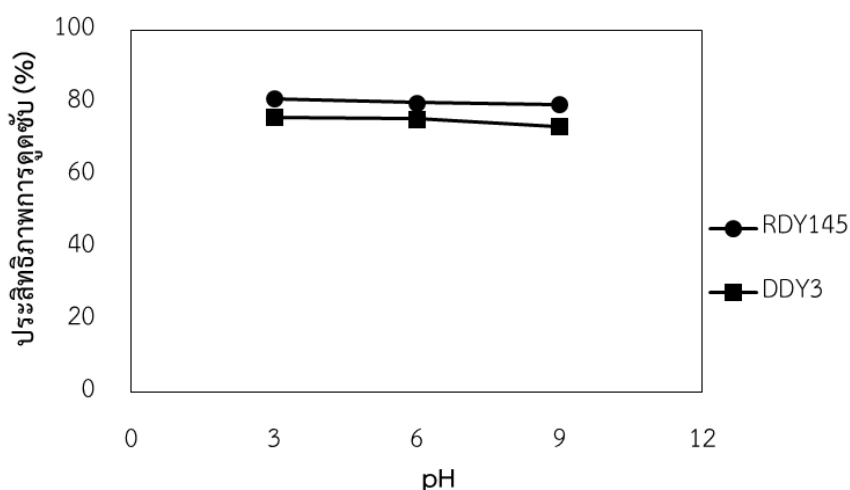
จากการทดลองเมื่อพิจารณาถ่านทั้งสองชนิดพบว่าถ่าน CH + SDS มีร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 สูงกว่าถ่าน CH + CTAB และถ่าน CH + Tween80 ตามลำดับ และถ่าน CH ที่

ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวทั้งสามชนิดให้ค่าการดูดซับสูงกว่าถ่าน AC ทุกชนิด ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างและมวลโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด (แสดงดังภาพประกอบที่ 3-4 และตารางที่ 3-1) พบว่ามวลโมเลกุลและส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS มีขนาดของส่วนหัวเล็กกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ตามลำดับ จึงอาจเป็นผลให้โมเลกุลสีเหลือง DDY3 แพร่เข้าดูดซับบนผิวถ่านที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS ง่ายกว่าถ่านที่ปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวอีกสองชนิดดังกล่าวข้างต้น

ดังนั้นการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว อาจศึกษาเพิ่มเติมโดยการเลือกสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นหรือสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุซึ่งมีมวลโมเลกุลหรือขนาดหัวของสารลดแรงตึงผิวที่เล็ก มาใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของถ่านต่อไป

#### 4.3 ผลการศึกษาพีเอชในการดูดซับสีรีแอกทีฟและสตีติสเฟิร์ส

การทดลองใช้สีเหลือง RDY145 เป็นตัวแทนการศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟและการดูดซับสีเหลือง DDY3 เป็นตัวแทนการศึกษาการดูดซับสตีติสเฟิร์ส บนถ่าน MCH การทดลองทำโดยการนำสารละลายสีเหลือง RDY145 ที่ปรับค่าพีเอช เป็น 3 6 และ 9 ตามลำดับ มาศึกษาการดูดซับโดยใช้ถ่าน MCH ปริมาณ 1 กรัม ศึกษา ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน MCH ศึกษา ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังภาพประกอบที่ 4-14



ภาพประกอบที่ 4-14 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ที่ค่าพีเอช 3 6 และ 9 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เท่ากับ 700 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มค่าพีเอชไม่มีผลอย่างมีนัยยะในช่วงพีเอช 3 – 9 ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH เนื่องจากการเพิ่มพีเอชในสารละลาย ด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) แพร่ในสารละลายน้อยหรือการลดพีเอชในสารละลาย ด้วยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรทำให้ไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) แพร่ในสารละลายน้อยเช่นกัน ดังนั้นการแพร่ของหมู่  $\text{OH}^-$  หรือ  $\text{H}^+$  ในสารละลายสีย้อมจึงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงประจุบนพื้นผิวของถ่านและประสิทธิภาพการดูดซับของถ่าน ซึ่งโดยทั่วไปน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7 - 9 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) และงานวิจัยหลายงานวิจัยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับที่พีเอชในช่วง 3 - 9 อาทิ งานวิจัยของ Ghazi Mokri และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับสีแดง C.I. Acid Red 97 ด้วยตัวดูดซับจากเปลือกวอลนัท งานวิจัยของ Mook และคณะ (2016) ศึกษาการดูดซับสีดำ Reactive black 5 โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม และงานวิจัยของ Kisku และคณะ (2015) ศึกษาการดูดซับสีน้ำเงิน Disperse blue 79:1 กับสีส้ม Disperse orange 25 พบว่า ณ พีเอช 3 - 9 ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

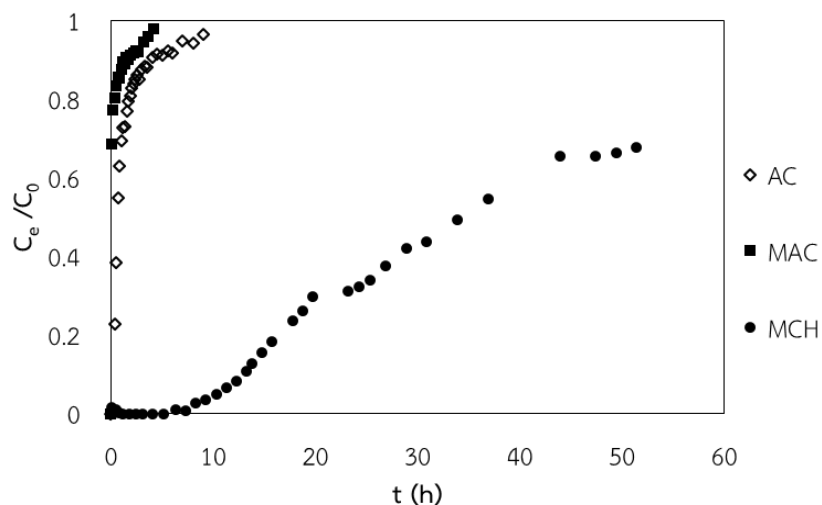
#### 4.4 ผลการศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง

การทดลองทำโดยการนำถ่านมาบรรจุลงคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยอัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 แล้วป้อนสารละลายสีย้อมผ่านคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที และเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ

##### 4.4.1 ผลการศึกษาการดูดซับสีเหลือง RDY145

การทดลองทำโดยการเปรียบเทียบเวลาในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน 3 ชนิด ได้แก่ ถ่าน AC ถ่าน MAC ถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเก็บตัวอย่างของเหลวภายหลังการดูดซับทุกๆ 10 นาที ผลการทดลองกราฟเบรคทูร์จ (Breakthrough Curve) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-15





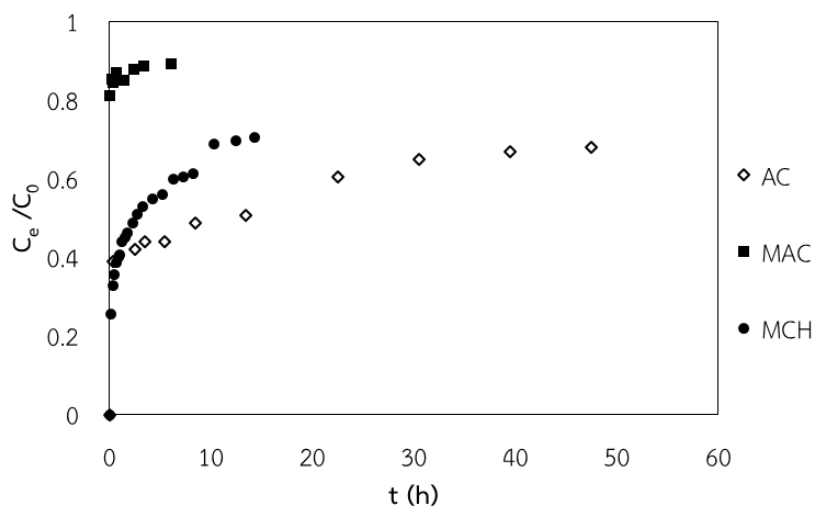
**ภาพประกอบที่ 4-15** กราฟเบรคทรูจ์การดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิลิตรต่อนาที

โดยจากกราฟเบรคทรูจ์พบว่าเวลาอิมิต์ของการดูดซับสีเหลือง RDY145 ด้วยถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 51.4 ( $C_e/C_0 = 0.70$ ), 4.2 ( $C_e/C_0 = 0.98$ ) และ 9.2 ( $C_e/C_0 = 0.97$ ) ชั่วโมง ตามลำดับ ลักษณะของกราฟเบรคทรูจ์ของถ่าน MAC มีความชันมากกว่าถ่าน AC และถ่าน MCH ตามลำดับ ซึ่งค่าความชันน้อยสุดแสดงถึงความสามารถในการดูดซับสูงสุด โดยสีเหลือง RDY145 ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ในคอลัมน์บรรจุด้วยถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 0.11 0.09 และ 0.35 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าถ่าน AC ใช้เวลานานที่สุด จากการสังเกตการไหลของสีเมื่อผ่านตัวดูดซับในคอลัมน์จะเห็นได้ว่าถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB มีความสามารถในการกระจายตัว (Wettability) บนพื้นผิวได้ดี แรงยึดติดบนพื้นผิวที่ต่ำ ทำให้การไหลของสีเหลือง RDY145 ผ่านพื้นผิวของถ่านได้เร็วและกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง โดยไม่มีฟองเกิดขึ้นในระบบ โดยทิศทางการไหลของสีในคอลัมน์จะไหลจากบนลงล่างคอลัมน์แล้วค่อยๆ แพร่กระจายไปรอบๆ คอลัมน์

ณ จุดเบรคทรูจ์  $C_e/C_0 = 0.50$  เป็นเกณฑ์พิจารณาเวลาก่อนสถานะที่ถ่านจะไม่สามารถดูดซับได้ ค่า ณ จุดดังกล่าวของถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 34.29 0.06 และ 0.64 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งถ่าน MCH ให้เวลาในการดูดซับสูงสุด อันแสดงถึงความจุในการดูดซับที่สูง (High adsorption capacity) ซึ่งการทดลองนี้ยังให้ผลการทดลองสอดคล้องกับแนวโน้มการดูดซับสีเหลือง RDY145 ของการทดลองแบบกะอีกด้วย อย่างไรก็ตามการทดลองควรศึกษาปัจจัยการดูดซับในคอลัมน์เพิ่มเติม อาทิ อัตราการไหลของสี  $C_0$  ของสี หรือปริมาณตัวดูดซับ เป็นต้น

#### 4.4.2 ผลการศึกษาการดูดซับสีเหลือง DDY3

การทดลองทำโดยการศึกษาระยะเวลาในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน 3 ชนิด ได้แก่ ถ่าน AC ถ่าน MAC ถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเก็บตัวอย่างของเหลวภายหลังการดูดซับทุกๆ 10 นาที ผลการทดลองกราฟเบรคทอร์จ์แสดงดังภาพประกอบที่ 4-16



ภาพประกอบที่ 4-16 กราฟเบรคทอร์จ์การดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิตรต่อนาที

พบว่าเวลาอิ่มตัวของการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 10.27 ( $C_e/C_0 = 0.69$ ) 2.39 ( $C_e/C_0 = 0.89$ ) และ 39.48 ( $C_e/C_0 = 0.67$ ) ชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่าน AC มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าถ่าน MCH และถ่าน MAC ตามลำดับ โดยสีเหลือง DDY3 ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์บรรจุด้วยถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 0.19 0.05 และ 0.31 ชั่วโมง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าถ่าน AC ใช้เวลานานที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผลของการปรับปรุงสภาพผิวถ่านด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ส่งเสริมการเปียกผิวและการไหลผ่านให้เกิดขึ้นได้ดี

ณ จุดเบรคทอร์จ์  $C_e/C_0 = 0.50$  ซึ่งเป็นจุดพิจารณาสภาวะก่อนที่ถ่านจะไม่สามารถดูดซับได้ของถ่าน MCH ถ่าน MAC และถ่าน AC คือ 2.55 0.03 และ 13.48 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งถ่าน AC ให้เวลาในการดูดซับสูงสุด จึงมีความจุในการดูดซับที่สูง ซึ่งการทดลองนี้ยังให้ผลการทดลองสอดคล้องกับแนวโน้มการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของการทดลองแบบกะอีกด้วย อย่างไรก็ตามการทดลองควรศึกษาปัจจัยการดูดซับในคอลัมน์เพิ่มเติมเช่นเดียวกับกรณีการดูดซับสีรีแอกทีฟในคอลัมน์แบบเบดนิ่งดังกล่าวไว้แล้วข้างต้น

#### 4.5 การประเมินความเข้มข้นของสีย้อมตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

ความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟ ได้แก่ สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222 และสีดิสเพิร์ส ได้แก่ สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการดูดซับด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC ณ สภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับคือ

- $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็รรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- $C_0$  ของสีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเวลาที่ความเร็รรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 และ 3 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ

หลังการดูดซับ ได้ทำการประเมินความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในหน่วย ADMI แสดงดังตารางที่ 4-14

**ตารางที่ 4-14** ประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์ กับความเข้มข้นของสีย้อมภายหลังการดูดซับในหน่วย ADMI ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC

สีย้อม	ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)			ความเข้มข้นของสีในหน่วย ADMI*		
	ถ่าน CH	ถ่าน MCH	ถ่าน AC	ถ่าน CH	ถ่าน MCH	ถ่าน AC
RDY145	21.0	83.7	7.3	22120.0	4564.0	25956.0
RDR195	-	71.1	-	-	12340.3	-
RDB222	-	59.6	-	-	17533.6	-
DDY3	86.3	79.5	81.2	523.9	783.9	718.9
DDR60	-	23.2	-	-	1705.0	-
DDB56	-	9.7	-	-	3030.5	-

\*หมายเหตุ ประเมินจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีย้อมแต่ละชนิดที่ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่า ADMI ของสีเหลือง RDY145 = 40 ADMI สีแดง RDR195 = 61 ADMI สีน้ำเงิน RDB222 = 62 ADMI สีเหลือง DDY3 = 19.1 ADMI สีแดง DDR60 = 11.1 ADMI และสีน้ำเงิน DDB56 = 16.8 ADMI (Photometric method)

โดยมาตรฐานสีในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดค่าความเข้มข้นสีต้องมีค่าน้อยกว่า 300 ADMI (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560) ซึ่งจากตารางที่ 4-14 พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมแต่ละชนิดภายหลังการดูดซับด้วยถ่านทั้งสามชนิด เกินเกณฑ์มาตรฐานที่อุตสาหกรรมกำหนด ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองใช้ค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นที่มีค่าสูง ดังนั้นในการดำเนินการบำบัดอาจต้องลดความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมโดยการเจือจางน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด หรือทำการบำบัดน้ำเสียซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้น้ำเสียผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

#### 4.6 ผลการประเมินต้นทุนเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองแบบกะ ได้เลือกสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เป็นตัวแทนของสีรีแอคทีฟกับสีย้อมสีเพิร์ส ในการประเมินต้นทุนเบื้องต้นของการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH เปรียบเทียบกับถ่าน AC ณ สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีดังกล่าว คือ

$C_0$ :	สีเหลือง RDY145 เท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร สีเหลือง DDY3 เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร
ปริมาณถ่าน:	1 กรัม
อุณหภูมิ:	30 องศาเซลเซียส
พีเอช:	7
ความเร็วรอบในการเขย่า:	170 รอบต่อนาที
เวลาในการเขย่า:	สีเหลือง RDY145 เท่ากับ 3 ชั่วโมง สีเหลือง DDY3 เท่ากับ 24 ชั่วโมง

##### 4.6.1 ต้นทุนค่าใช้จ่ายวัสดุและสารเคมีสำหรับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC 1 กรัม แสดงดังตารางที่ 4-

15

ตารางที่ 4-15 ราคาและปริมาณวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการผลิตถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC 1 กรัม

วัสดุและสารเคมี	ราคาต่อหน่วย	ปริมาณที่ใช้	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ถ่าน CH			
ซิงค์คลอไรด์	1.09 บาทต่อกรัม	1.50 กรัม	1.64
ก๊าซไนโตรเจน	14.70 บาทต่อลิตร	0.006 ลิตร	0.09
รวม			1.72
ถ่าน MCH			
ซิงค์คลอไรด์	1.09 บาทต่อกรัม	1.50 กรัม	1.64
ก๊าซไนโตรเจน	14.70 บาทต่อลิตร	0.006 ลิตร	0.09
สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB	11.56 บาทต่อกรัม	0.27 กรัม	3.16
รวม			4.89
ถ่าน AC	0.09 บาทต่อกรัม	1.00 กรัม	0.09

การผลิตถ่าน CH ต้องใช้ต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุและสารเคมีทั้งหมดประมาณ 1.72 บาทต่อกรัมถ่าน ถ่าน MCH ใช้ต้นทุน 4.84 บาทต่อกรัมถ่าน และถ่าน AC ใช้ต้นทุน 0.09 บาทต่อกรัมถ่าน (ยังไม่คำนวณค่าใช้จ่ายในเรื่องพลังงานไฟฟ้า)

#### 4.6.2 การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และ ถ่าน AC แสดงดังตารางที่ 4-16 ซึ่งอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 150 หน่วยแรก หน่วยละ 3.25 บาท (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2558)

การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ทั้งหมด คำนวณดังสมการที่ 13

$$\text{Cost} = W \times C \quad (\text{สมการที่ 13})$$

เมื่อ	Cost	คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท)
	W	คือ กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
	C	คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

ตารางที่ 4-16 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC

อุปกรณ์	สีเหลือง RDY145		สีเหลือง DDY3	
	จำนวนวัตต์ที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	จำนวนวัตต์ที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ถ่าน CH				
เตาเผาแบบทรงกระบอก	0.04	0.12	0.04	0.12
ตู้อบ	0.77	2.50	0.77	2.50
เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ	0.02	0.05	0.13	0.42
รวม	0.82	2.67	0.93	3.03
ถ่าน MCH				
เตาเผาแบบทรงกระบอก	0.04	0.12	0.04	0.12
ตู้อบ	1.01	3.28	1.01	3.28
เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ	0.06	0.18	0.17	0.55
รวม	1.10	3.58	1.21	3.94
ถ่าน AC				
ตู้อบ	0.38	1.25	0.38	1.25
เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ	0.02	0.05	0.13	0.42
รวม	0.40	1.30	0.51	1.66

ต้นทุนที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน ถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC ได้แก่ ค่าใช้จ่ายวัสดุและสารเคมี รวมทั้งค่าพลังงานไฟฟ้า มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 แสดงดังตารางที่ 4-17

**ตารางที่ 4-17** ประสิทธิภาพและต้นทุนการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC

ถ่าน	ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมถ่าน)		ราคาต้นทุนในการบำบัด (บาทต่อกรัมถ่าน)	
	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3
CH	15.3	16.79	4.39	4.75
MCH	58.6	15.90	8.47	8.83
AC	5.11	16.25	1.39	1.76

กำหนดให้ การประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของแต่ละสี (สีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3) คือ 900 ADMI ต้องการกำจัดสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน CH ถ่าน MCH และถ่าน AC เพื่อให้ความเข้มข้นน้ำเสียปล่อยทิ้งเป็นไปตามข้อกำหนดค่า ADMI ของสีในน้ำทิ้งไม่เกิน 300 ADMI (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2560) แสดงดังตารางที่ 4-18

**ตารางที่ 4-18** ความเข้มข้นของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ที่เข้าและออกจากระบบ

สีย้อม	ความเข้มข้นของสีในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด เมื่อกำหนดค่าสีเท่ากับ 900 ADMI (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสีในน้ำปล่อยทิ้งออกจากระบบ เมื่อกำหนดค่าสีเท่ากับ 300 ADMI (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสีที่ต้องถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
RDY145	22.5	7.50	15.0
DDY3	47.1	15.7	31.4

ดังนั้นต้นทุนในการบำบัดสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร แสดงดังตารางที่ 4-19

**ตารางที่ 4-19** ปริมาณถ่านที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3

ถ่าน	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการบำบัด (กรัม)		ค่าใช้จ่าย (บาท)	
	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3
CH	980	1,871	4,304	8,886
MCH	256	1,975	2,168	17,443

ถ่าน	ปริมาณถ่านที่ใช้ในการบำบัด (กรัม)		ค่าใช้จ่าย (บาท)	
	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3	สีเหลือง RDY145	สีเหลือง DDY3
AC	2,935	1,933	4,080	3,401

ดังนั้นการบำบัดสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยถ่าน MCH มีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการใช้ถ่าน CH และถ่าน AC ถึง 2 เท่า ดังนั้นถ่าน MCH มีแนวโน้มที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียแทนถ่าน AC ได้ ส่วนการบำบัดสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่าน AC มีต้นทุนค่าใช้จ่ายรวมน้อยกว่าถ่าน CH ประมาณ 2.6 เท่า และถ่าน MCH ประมาณ 5 เท่า ดังนั้นการบำบัดสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน AC มีความเหมาะสมมากที่สุด การใช้ถ่าน CH ในการบำบัดอาจไม่ต้องการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว แต่อาจทำการศึกษาเพิ่มเติม อาทิ การนำมาใช้ซ้ำ ซึ่งเป็น การลดต้นทุนในระยะยาวและการเกิดของเสียจากการใช้งานได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

- จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านโดยการถ่ายภาพด้วยเทคนิค SEM และการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค BET ทั้งก่อนและหลังกระตุ้นโดยใช้สารละลาย  $ZnCl_2$  ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ของถ่าน CH และถ่าน AC พบว่าถ่าน CH มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยมากกว่าแต่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่าน AC ซึ่งขนาดดังกล่าวเพียงพอที่จะนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับได้
- การดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองในการดูดซับของแลงเมียร์
- การศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟด้วยถ่าน CH และถ่าน MCH พบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน CH ได้ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสีซึ่งเป็นประจุลบกับส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ซึ่งแสดงอำนาจประจุบวก ทำให้เกิดการดูดซับได้ดี โดยการดูดซับสีรีแอกทีฟเป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองในการดูดซับของแลงเมียร์ และสีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถถูกดูดซับได้ดีกว่าสีโมเลกุลขนาดใหญ่ (ร้อยละการถูกดูดซับของสีเหลือง RDY145 > สีแดง RDR195 > สีน้ำเงิน RDB222) นอกจากนี้ถ่าน MCH สามารถดูดซับสีรีแอกทีฟได้สูงกว่าถ่าน AC ถึง 9 เท่า
- การศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยถ่าน CH และถ่าน MCH พบว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน CH ได้ เนื่องจากส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวอาจขัดขวางการแพร่ของสีย้อมซึ่งเป็นสีชนิดไม่มีขั้ว เข้าสู่บริเวณรอยต่อระหว่างผิวของถ่านและส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นบริเวณไม่มีขั้ว (Like dissolves like) นอกจากนี้การดูดซับสีเหลือง DDY3 และสีน้ำเงิน DDB56 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งและแบบจำลองในการดูดซับของฟรอนดริช การดูดซับสีแดง DDR60 เป็นไปตามแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองและแบบจำลองในการดูดซับของแลงเมียร์ และปริมาณการถูกดูดซับได้รับอิทธิพลจากขนาดโมเลกุลของสีย้อม เช่นเดียวกับที่พบในการดูดซับสีรีแอกทีฟ (ร้อยละการถูกดูดซับของสีเหลือง DDY3 > สีแดง DDR60 > สีน้ำเงิน DDB56) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยถ่าน MCH ยังมีค่าน้อยกว่าถ่าน AC รวร้อยละ 5
- การปรับปรุงสภาพถ่าน CH เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอาจทำได้โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวอื่นที่มีขนาดส่วนหัวเล็กและส่วนหางยาว
- การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วง 3 - 9 ณ อุณหภูมิห้อง ไม่มีผลต่อการดูดซับสีเหลือง RDY145 และการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH
- การดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง โดยเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ถ่าน AC และถ่าน MAC พบว่าถ่านที่ผ่านการปรับปรุง



สภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวช่วยให้การกระจายตัวของสีบนพื้นผิวถ่านเกิดขึ้นได้ดี การไหลของสีบนผิวถ่านเกิดได้เร็วขึ้นและไม่มีฟองเกิดขึ้นในระบบทำให้สีกระจายไปทั่วคอลัมน์ นอกจากนี้ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในระบบแบบกะ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการดูดซับสีดีสเพิร์สโดยใช้ถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ อาจเลือกสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ มีส่วนหางยาวและส่วนหัวที่มีขนาดเล็กกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 มาใช้ในการปรับปรุงสภาพผิวถ่าน

5.2.2 ศึกษาการกระตุ้นถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยวิธีอื่นเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความเป็นรูพรุนและให้สภาพพื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟและสีดีสเพิร์สในคอลัมน์แบบเบดนิ่งเพิ่มเติม อาทิ ความเข้มข้นเริ่มต้น อัตราการไหล ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์

5.2.4 ควรศึกษาการฟื้นฟูสภาพถ่าน MCH เพื่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2542). คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม  
พอกย้อม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2556). คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงาน  
พอกย้อมสิ่งทอ. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2559). อุตสาหกรรมพอกย้อมสิ่งทอ. เข้าถึงได้จาก: [http://www2.diw.go.th/I\\_Standard/Web/pane\\_files/Industry10.asp](http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry10.asp). (สืบค้นเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน 2561)
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2560). กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. เข้าถึงได้  
จาก: <http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=laws&tabid=1&secid=3>  
(สืบค้นเมื่อวันที่ 9 มกราคม 2562)
- จักรกฤษณ์ อัมพฤษ, ฐิตาพร คาญ, นันทกานต์ ทองเฟื่อง, สุธิตรา แก้วศิริ, อิทธิศักดิ์ เกาโพธิ์, ไท แสง  
เทียน และพุทธพร แสงเทียน. (2560). การดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์  
ที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปี  
ที่ 19, 1: 1-15.
- จิรภัทร์ อนันต์ภักทรชัย, พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกูล และธนพล เพ็ญรัตน์. (2557). โครงการ การพัฒนา  
หน่วยผลิตน้ำสะอาดในการกำจัดสารเคมีปราบศัตรูพืชเพื่อชุมชนเกษตรกร. รายงานวิจัย  
ฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ชิตวรรณ นาคฤทธิ์. (2554). การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ด  
มะม่วงหิมพานต์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญชัย ตระกูลมหชัย. (2537). การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดเบด. วิทยานิพนธ์  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริญทร เต็มญารศิลป์. (2551). การเตรียมและการ วิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จาก  
ไผ่ตง และ ไผ่หมาจู้. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เคมี  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ฟันฟูสภาพได้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ไพฑิพย์ ชีรเวชญาณ, ดวงรัตน์ อินทร, เพ็ชรพร เซวากิจเจริญ, สิรินทรเทพ เต่าประยูร และประไพ ฐรกิจ. (2544). การกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ. เข้าถึงได้จาก: <https://www.kmutt.ac.th/rippc/pmt43.htm> (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน 2561)
- ศิษฏาภรณ์ เครือสุวรรณ. (2550). สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากซีลีออยไม้ยางพารา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุภย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2561). การพัฒนาสีย้อมผ้า และผ้าที่ต้านทานแบคทีเรีย. เข้าถึงได้จาก: <http://www.scimath.org/article-chemistry/item/3151-2012-11-19-03-38-37> (สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2561)
- สายรุ้ง นพขุนทด. (2554). การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียด้วยหินดินดาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สารพัดเคมีคอล. (2560). สารลดแรงตึงผิว Surfactant. เข้าถึงได้จาก: <https://www.sarapatchemical.com/สารลดแรงตึงผิว-surfactant/> (สืบค้นเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน 2561)
- อดุลย์ พุกอินทร์. (2554). การพัฒนาเครื่องควมเมลิตกาแพแบบแนวนอน. สักทอง: วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, 2: 1-11.
- Ahmad, A.A. and Hameed, B.H. (2010). Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175: 298–303.
- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S. and Ok, Y.S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99: 19–33.
- Al-Degs, Y.S., El-Barghouthi, M.I., El-Sheikh, A.H, and Walker, G.M. (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*, 77: 16 -23.

- Amin, N.K. (2008). Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. *Desalination*, 223: 152–161.
- Arslan, I. (2001). Treatability of a simulated disperse dye-bath by ferrous iron coagulation, ozonation, and ferrous iron-catalyzed ozonation. *Journal of Hazardous Materials*, 85: 229–241.
- Basar, C.A., Karagunduz, A., Cakici, A. and Keskinler, B. (2004). Removal of surfactants by powdered activated carbon and microfiltration. *Water Research*, 38: 2117–2124.
- Cao, X., Ma, L., Liang, Y., Gao, B. and Harris, W. (2011). Simultaneous immobilization of lead and atrazine in contaminated soils using dairy-manure biochar. *Environmental Science and Technology*, 45: 4884–4889.
- Choi, H.D., Cho, J.M., Baek, K., Yang, J.S. and Lee, J.Y. (2009). Influence of cationic surfactant on adsorption of Cr (VI) onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 161: 1565–1568.
- Dhale, A.D. and Mahajani, V.V. (2000) Studies in treatment of disperse dye waste: membrane-wet oxidation process. *Waste Management*, 20: 85-92.
- Franco, M.A.E., Carvalho, C.B., Bonetto, M.M., Soares, R.P. and Féris, L.A. (2017). Removal of amoxicillin from water by adsorption onto activated carbon in batch process and fixed bed column: Kinetics, isotherms, experimental design and breakthrough curves modelling. *Journal of Cleaner Production*, 161: 947–956.
- Gerçel, Ö., Gerçel, H.F., Kopal, A.S. and Öğütveren, Ü.B. (2008). Removal of disperse dye from aqueous solution by novel adsorbent prepared from biomass plant material. *Journal of Hazardous Materials*, 160: 668-674.
- Ghazi Mokri, S.H., Modirshahla, N., Behnajady, A.M. and Vahid, B. (2015). 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*, 12: 1401–1408.

- Gonçalves, M., Guerreiro, M.C., Oliveira, L.C.A., Solar, C., Nazarro, M. and Sapag, K. (2013). Micro mesoporous activated carbon from coffee husk as biomass waste for environmental applications. *Waste Biomass Valor*, 4: 395–400.
- Halbus, F.A., Athab, Z.H. and Hussein, F.H. (2013). Adsorption of disperse blue dye on Iraqi date palm seeds activated carbon. *International Journal of Chemical Science*, 11: 1219-1233.
- Han, R., Wang, Y., Zhao, X., Wang, Y., Xie, F., Cheng, J. and Tang, M. (2009). Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves. *Desalination*, 245: 284-297.
- Holmberg, K., Jönsson, B., Kronberg, B. and Lindman, B. (2003). *Surfactant and polymers in aqueous solution*. 2nd ed. England: John Willy and Sons limited.
- Ibrahim, S., Fatimah, I., Ang, H.M. and Wang, S. (2010). Adsorption of anionic dyes in aqueous solution using chemically modified barley straw. *Water Science and Technology*, 62: 1177-1182.
- Ip, A.W.M., Barford, J.P. and McKay, G. (2010). A comparative study on the kinetics and mechanisms of removal of Reactive Black 5 by adsorption onto activated carbons and bone char. *Chemical Engineering Journal*, 157: 434–442.
- Jadhav, D.N. and Vanjara, A.K. (2004). Adsorption equilibrium study: removal of dyestuff effluent using sawdust, polymerized sawdust and sawdust carbon-I. *Indian Journal of Chemical Technology*, 11: 194-200.
- Kim, T.H., Park, C., Yang, J. and Kim, S. (2004). Comparison of disperse and reactive dye removals by chemical coagulation and Fenton oxidation. *Journal of Hazardous Materials*, 112: 95–103.
- Kisku, G.C., Markandeya, Shukla, S.P., Singh, D.S. and Murthy, R.C. (2015). Characterization and adsorptive capacity of coal fly ash from aqueous solutions of disperse blue and disperse orange dyes. *Environmental Earth Sciences*, 74: 1125–1135.

- Konicki, W., Cendrowski, K., Bazarko, G. and Mijowska, E. (2015). Study on efficient removal of anionic, cationic and nonionic dyes from aqueous solutions by means of mesoporous carbon nanospheres with empty cavity. *Chemical Engineering Research and Design*, 94: 242-253.
- Krivova, M.G., Grinshpan, D.D. and Hedin, N. (2013). Adsorption of  $C_nTABr$  surfactants on activated carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 436: 62–70.
- Lin, S.Y., Chen, W.F., Cheng, M.T. and Li, Q. (2013). Investigation of factors that affect cationic surfactant loading on activated carbon and perchlorate adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 434: 236–242.
- Markandeya, Dhiman, N., Shukla, S.P., Mohan, D., Kisku, G.C. and Patnaik, S. (2018). Comprehensive remediation study of disperse dyes in wastewater using cenospheres nanosyntactic foam. *Journal of Cleaner Production*, 182: 206-216.
- Markandeya, Shukla, P.S. and Dhiman, N. (2017). Characterization and adsorption of disperse dyes from wastewater onto cenospheres activated carbon composites. *Environmental Earth Sciences*, 76: 702.
- Mi, X., Li, G., Zhu, W. and Liu, L. (2016). Enhanced adsorption of orange II using cationic surfactant modified biochar pyrolyzed from cornstalk. *Journal of Chemistry*, 2016: 1-7.
- Moazzam, A., Jamil, N., Nadeem, F., Qadir, A., Ahsan, N. and Zameer, M. (2017). Reactive dye removal by a novel biochar/ MgO nanocomposite. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 39: 26–35.
- Mook, W.T., Aroua, M.K. and Szlachta, M. (2016). Palm shell-based activated carbon for removing reactive black 5 dye: equilibrium and kinetics studies. *Bio Resources*, 11: 1432-1447.
- Namasivayam, C. and Sureshkumar, M.V. (2006). Anionic Dye Adsorption characteristics of surfactant-modified coir pith, a 'waste' lignocellulosic polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 100: 1538–1546.

- Obaid, M.K., Abdullah, L.C., Mahdi, D.S., Idan, I.J. and Jamil, S.N.A.B.M. (2017). Fixed bed adsorption study for removing of reactive orange 16 and acid red 114 dyes from aqueous solution using Kenaf. *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, 3: 32-40.
- Oei, B.C., Ibrahim, S., Wang, S. and Ang, H.M. (2009). Surfactant modified barley straw for removal of acid and reactive dyes from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 100: 4292–4295.
- Osman, D. and Erol, A. (2010). Adsorptive removal of cationic surfactants from aqueous solutions onto high-area activated carbon cloth monitored by in situ UV spectroscopy. *Hazardous Materials*, 174: 359–367.
- Puasa, S.W., Ismail, K.N. and Khairi, N.A.I.A. (2018). Direct surfactant-impregnated activated carbon for adsorption of reactive blue 4. *International Journal of Engineering and Technology*, 7: 5-8.
- PubChem. (2018). Cetrimonium Bromide. Available from URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5974#section=Top> (accessed 31 July 2018)
- PubChem. (2018). Reactive Blue 222. Available from URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/102407104#section=Top> (accessed 20 July 2018)
- PubChem. (2018). Reactive Red 195. Available from URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/102591940#section=Top> (accessed 20 July 2018)
- PubChem. (2018). Reactive yellow 145. Available from URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/157317#section=Top> (accessed 20 July 2018)
- PubChem. (2018). Zwittergent 3-16. Available from URL: [https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3-\\_N\\_N-Dimethylpalmitylammonio\\_propanesulfonate#section=Top](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3-_N_N-Dimethylpalmitylammonio_propanesulfonate#section=Top) (Accessed 20 August 2018)
- Rachakornkij, M., Ruangchuay, S. and Teachakulwiroj, S. (2004). Removal of reactive dyes from aqueous solution using bagasse fly ash. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 26: 13-24.

- Ran, G., Zhang, Y., Song, Q., Wang, Y. and Cao, D. (2009). The adsorption behavior of cationic surfactant onto human hair fibers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 68: 106–110.
- Rangel-Yagui, C.O., Pessoa-Jr, A. and Tavares, L.C. (2005). Micellar solubilization of drugs. *Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 8:147-163.
- Reynolds, T.D. and Richards, P.A. (1996). *Unit operation and process in environmental engineering*. 2nd ed. PWS Publishing Company.
- Salleh, M.A.M., Mahmoud, D.K., Karim, W.A.W.A. and Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. *Desalination*, 280: 1–13.
- Sigma-aldrich. (2018). Disperse blue 56 (Latyl blue bcn or resoling blue fbl). Available from URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/s477850?lang=en&region=TH> (accessed 9 July 2018)
- Sigma-aldrich. (2018). Disperse red 60 (Samaron pink fbl). Available from URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/s477648?lang=en&region=TH> (accessed 9 July 2018)
- Sigma-aldrich. (2018). Disperse yellow 3. Available from URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/disperseyellow326930283240811?lang=en&region=TH> (accessed 9 July 2018)
- Sigma-Aldrich. (2018). Sodium dodecyl sulfate. Available from URL: [https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/SIAL/436143?lang=en&region=TH&gclid=CjwKCAjwkYDbBRB6EiwAR0T\\_-jgux6aypQxmla9g51NdGYsvg\\_jb83-YmCuPvgrbnIECpHTPAvdvZxoCNVsQAVD\\_BwE](https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/SIAL/436143?lang=en&region=TH&gclid=CjwKCAjwkYDbBRB6EiwAR0T_-jgux6aypQxmla9g51NdGYsvg_jb83-YmCuPvgrbnIECpHTPAvdvZxoCNVsQAVD_BwE) (accessed 31 July 2018)
- Sigma-Aldrich. (2018). Tween80. Available from URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/p1754?lang=en&region=TH> (accessed 31 July 2018)
- Singhal, A. and Sinha, N. (2017). Adsorption. Available from URL: <http://www.askiitians.com/iit-jee-chemistry/physicalchemistry/adsorption.aspx> (accessed 29 January 2017)



- Sirichai. (2018). Coffee. Available from URL: <https://beanshere.com/posts/coffee-history-basic-brewing-roasting-%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B9%81%E0%B8%9F-101/>. (accessed 29 November 2018)
- Souza, E.F., Peres, M.R. and Moraes, S.B. (2010). Análise do desempenho de surfactants para a solubilização de fases líquidas não aquosas em meio aquoso. *Química Nova*, 33: 532-538.
- Su, Y., Zhao, B., Xiao, W. and Han, R. (2013). Adsorption behavior of light green anionic dye using cationic surfactant-modified wheat straw in batch and column mode. *Environmental Science and Pollution Research*, 20: 5558–5568.
- Sun, D., Zhang, Z., Wang, M. and Wu, Y. (2013). Adsorption of reactive dyes on activated carbon developed from *Enteromorpha prolifera*. *American Journal of Analytical Chemistry*, 4: 17–26.
- The essential chemical industry. Surfactant. Available from URL: <http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/surfactants.html> (accessed 28 January 2017)
- Vijayaraghavan, K., Won, S.W. and Yun, Y.S. (2009). Treatment of complex Remazol dye effluent using sawdust- and coal-based activated carbons. *Journal of Hazardous Materials*, 167: 790-796.
- Wang, L. (2012). 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*, 102: 79-87.
- Wang, L. (2013). Removal of disperse red dye by bamboo-based activated carbon: optimisation, kinetics and equilibrium. *Environmental Science and Pollution Research International*, 20: 4635-4646.
- Yakout, S.M. and Nayl, A.A. (2009). Removal of cationic surfactant (CTAB) from aqueous solution on to activated carbon obtained from corncob. *Carbon-Science and Technology*, 2: 107 – 116.

- Zhang, R., Zhang, J., Zhang, X., Dou, C. and Han, R. (2014). Adsorption of congo red from aqueous solutions using cationic surfactant modified wheat straw in batch mode: kinetic and equilibrium study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45: 2578–2583.
- Zhao, B., Xiao, W., Shang, Y., Zhu, H. and Han, R. (2017). Adsorption of light green anionic dye using cationic surfactant-modified peanut husk in batch mode. *Arabian Journal of Chemistry*, 10: S3595–S3602.

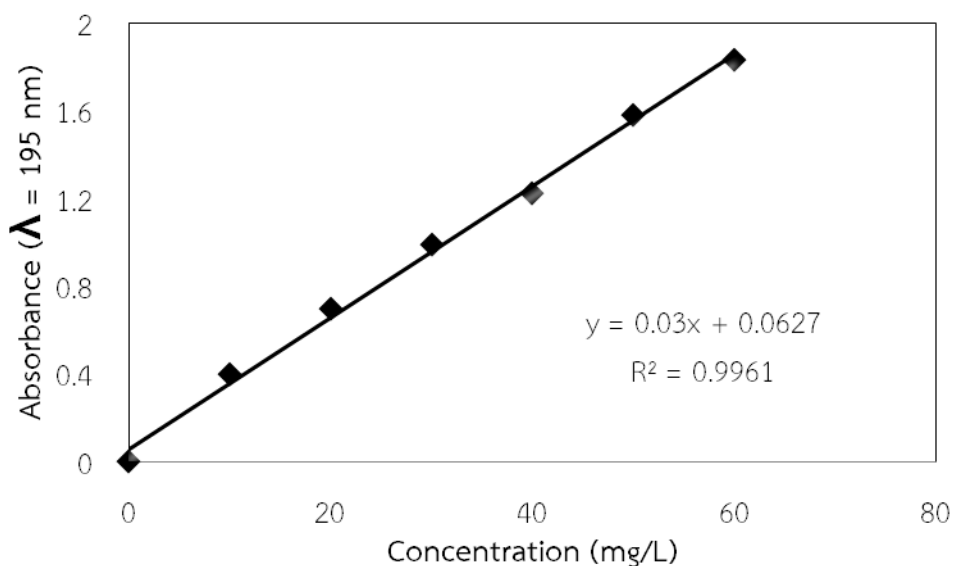
## ภาคผนวก ก

## กราฟมาตรฐาน

1. การสร้างกราฟมาตรฐานสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ที่ความเข้มข้นต่างๆ

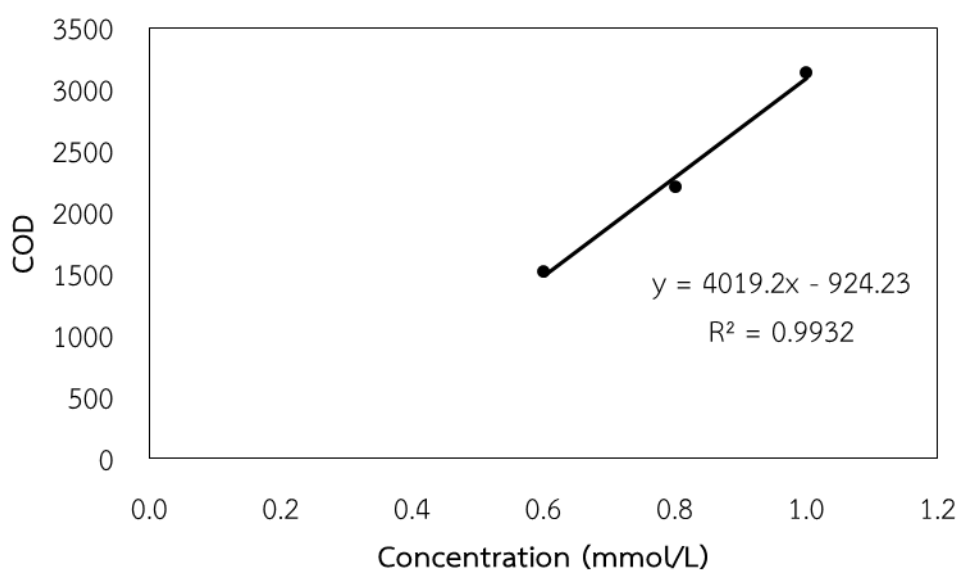
ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 195 \text{ nm}$ )
0	0.000
10	0.398
20	0.701
30	0.993
40	1.228
50	1.581
60	1.835



ภาพประกอบที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

ตารางที่ ก-2 กราฟมาตรฐานซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS ที่ความเข้มข้นต่างๆ

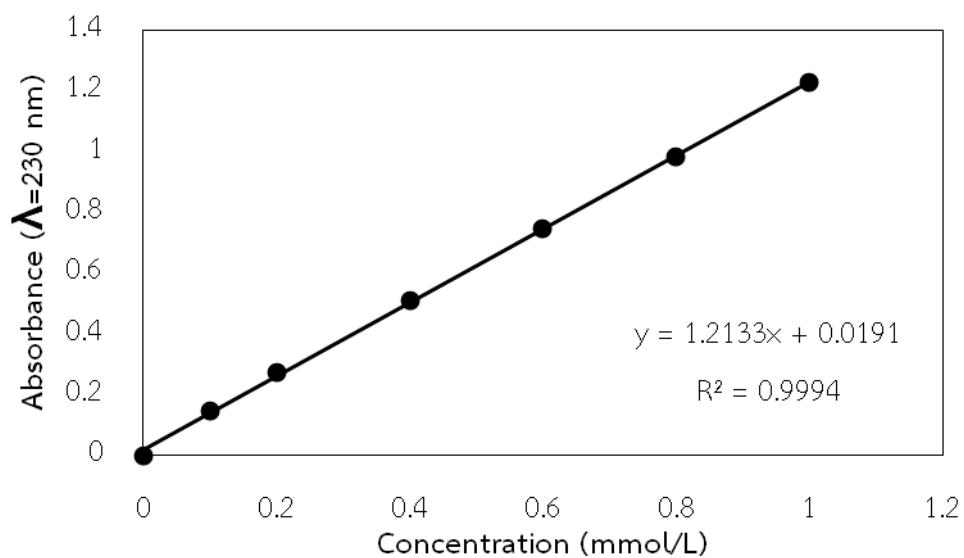
ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS (มิลลิโมลต่อลิตร)	COD
0.6	1525.8
0.8	2214.2
1.0	3133.5



ภาพประกอบที่ ก-2 กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS

ตารางที่ ก-3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 (มิลลิโมลต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 230 \text{ nm}$ )
0.0	0.000
0.1	0.146
0.2	0.276
0.4	0.512
0.6	0.746
0.8	0.983
1.0	1.232

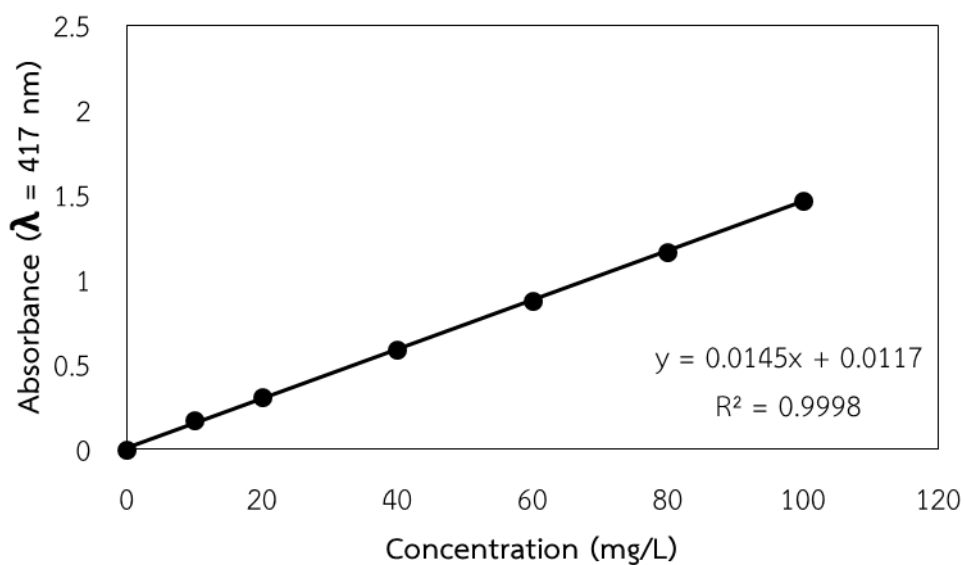


ภาพประกอบที่ ก-3 กราฟมาตรฐานของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

2. การสร้างกราฟมาตรฐานสีรีแอคทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222)

ตารางที่ ก-4 ค่าการดูดกลืนแสงของสีเหลือง RDY145 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

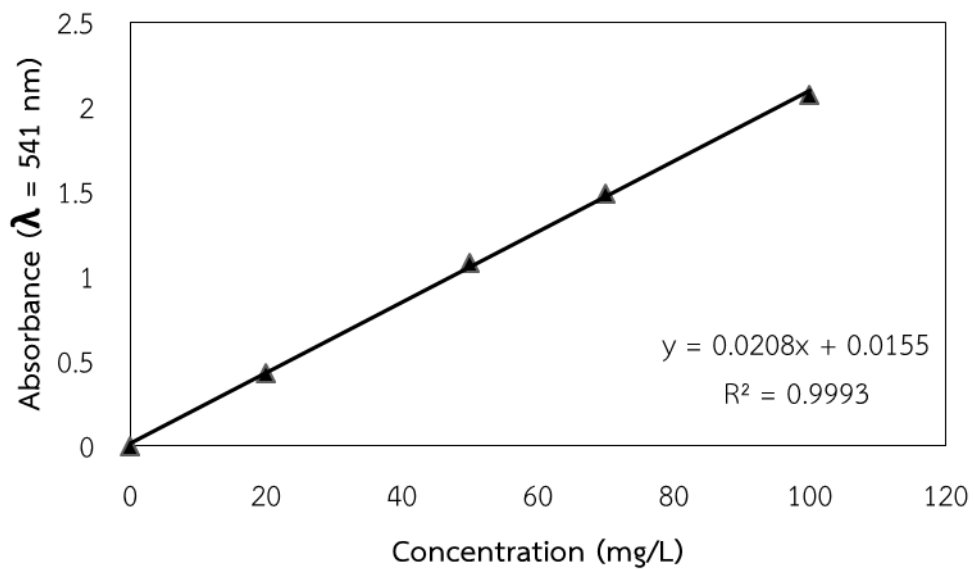
ความเข้มข้นสีเหลือง RDY145 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 417 \text{ nm}$ )
0	0.000
10	0.170
20	0.307
40	0.586
60	0.878
80	1.166
100	1.463



ภาพประกอบที่ ก-4 กราฟมาตรฐานของสีเหลือง RDY145

ตารางที่ ก-5 ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดง RDR195 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

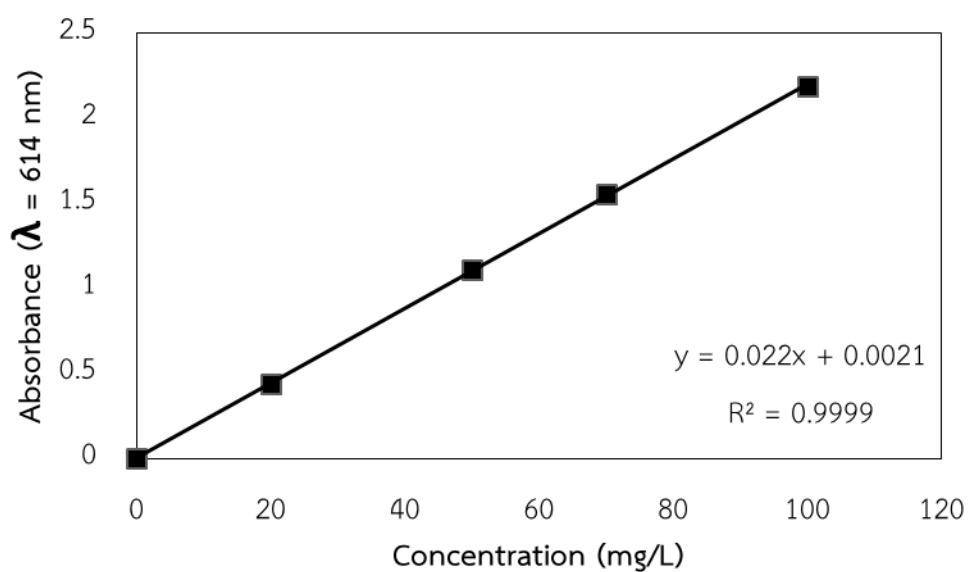
ความเข้มข้นสีแดง RDR195 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 541 \text{ nm}$ )
0	0.000
20	0.429
50	1.080
70	1.491
100	2.071



ภาพประกอบที่ ก-5 กราฟมาตรฐานของสีแดง RDR195

ตารางที่ ก-6 ค่าการดูดกลืนแสงของสีน้ำเงิน RDB222 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสีน้ำเงิน RDB222 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 614 \text{ nm}$ )
0	0.000
20	0.436
50	1.109
70	1.555
100	2.191



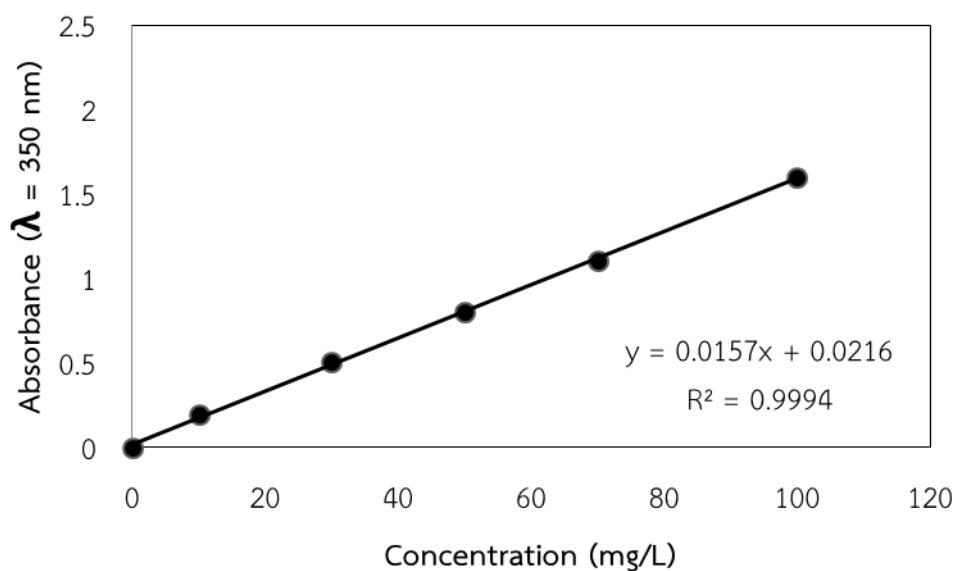
ภาพประกอบที่ ก-6 กราฟมาตรฐานของสีน้ำเงิน RDB222



### 3. การสร้างกราฟมาตรฐานสีดีสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56)

ตารางที่ ก-7 ค่าการดูดกลืนแสงของสีเหลือง DDY3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

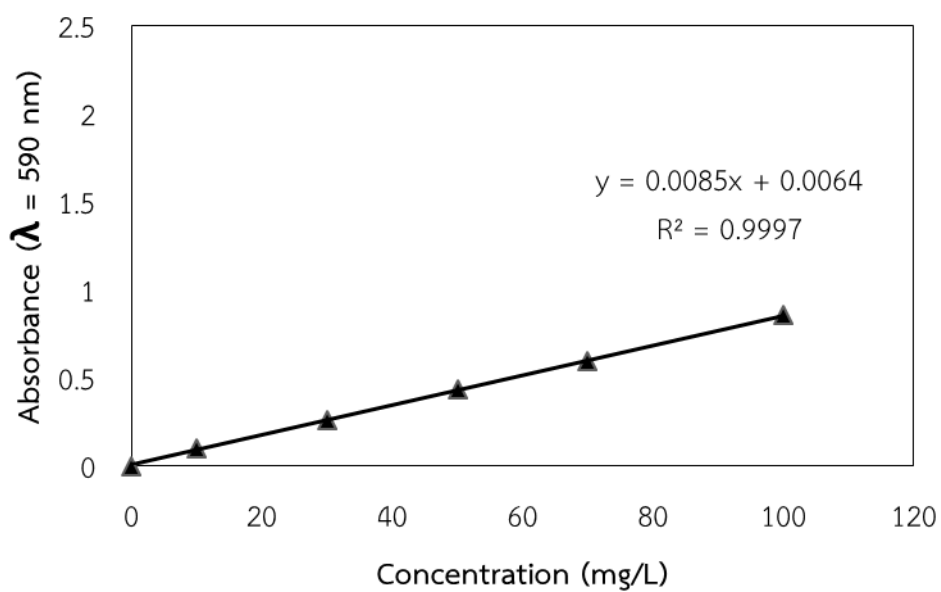
ความเข้มข้นสีเหลือง DDY3 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 350 \text{ nm}$ )
0	0.000
10	0.196
30	0.508
50	0.806
70	1.110
100	1.595



ภาพประกอบที่ ก-7 กราฟมาตรฐานของสีเหลือง DDY3

ตารางที่ ก-8 ค่าการดูดกลืนแสงของสีแดง DDR60 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

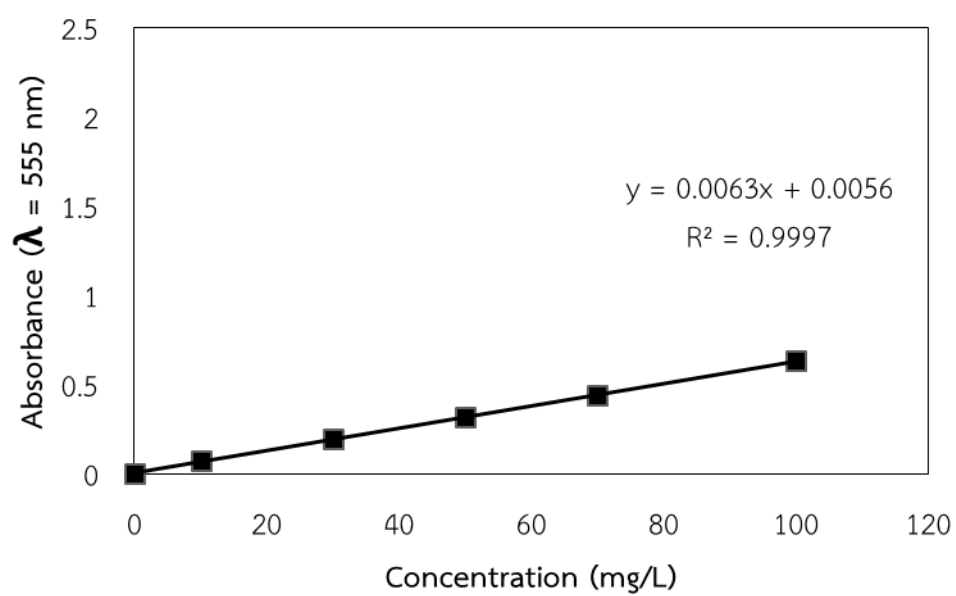
ความเข้มข้นสีแดง DDR60 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 590 \text{ nm}$ )
0	0.000
10	0.098
30	0.262
50	0.434
70	0.595
100	0.856



ภาพประกอบที่ ก-8 กราฟมาตรฐานของสีแดง DDR60

ตารางที่ ก-9 ค่าการดูดกลืนแสงของสีน้ำเงิน DDB56 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสีน้ำเงิน DDB56 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง ( $\lambda = 555 \text{ nm}$ )
0	0.000
10	0.073
30	0.197
50	0.321
70	0.441
100	0.635



ภาพประกอบที่ ก-9 กราฟมาตรฐานของสีน้ำเงิน DDB56

## ภาคผนวก ข

## ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลอง

## 1. การศึกษาการปรับปรุงสภาพถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cetyltrimethylammonium bromide, CTAB)

## 1.1 การศึกษาเวลาในการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

ตารางที่ ข-1 ค่า  $q$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 10 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าด้วยความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$q$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
0.3	112.0
1.0	165.9
3.0	185.1
6.0	220.7
9.0	232.4
12.0	259.0
15.0	259.0

## 1.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ในการดูดซับบนผิวถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ ข-2 ค่า  $C$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนผิวถ่าน CH และร้อยละการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าด้วยความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง

$C_0$ (มิลลิโมลต่อลิตร)	$C$ (มิลลิโมลต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับ
1	0.4	44.8
4	3.1	77.1
6	4.9	82.3
7	5.5	78.8
8	5.9	73.7
9	5.6	61.8

### 1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB

ตารางที่ ข-3 ค่า  $C_e$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และค่า  $q_e$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB บนถ่าน CH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB 1 - 9 มิลลิโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง

$C_0$ (มิลลิโมลต่อลิตร)	$C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
1	201.6	16.3
4	334.2	112.6
6	388.4	180.2
7	542.6	201.2
8	768.8	215.1
9	1254.6	203.0

## 2 การศึกษาการดูดซับสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์

2.1 การศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง RDY145 ของถ่าน CH

ตารางที่ ข-4 ค่า  $C$  ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน CH ถ่าน MCH และร้อยละการดูดซับของเหลือง RDY145 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	$C$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับ
ถ่าน CH	154.7	21.0
ถ่าน MCH	147.8	83.7

## 2.2 การศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีรีแอกทีฟ

ตารางที่ ข-5 ค่า  $q$  ของสีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$q$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง RDY145	สีแดง RDR195	สีน้ำเงิน RDB222
0.2	15.7	16.5	13.2
0.3	24.3	24.1	18.2
0.5	32.4	29.3	24.5
1.0	42.9	39.3	31.6
1.5	51.0	41.5	34.6

เวลา (ชั่วโมง)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง RDY145	สีแดง RDR195	สีน้ำเงิน RDB222
2.0	52.5	42.4	34.7
3.0	58.6	49.3	41.7
4.0	57.2	51.6	43.1
5.0	59.2	52.1	40.8
6.0	59.3	50.3	42.3

### 2.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับรีแอกทีฟ

ตารางที่ ข-6 ค่า  $C_e$  ของสีรีแอกทีฟ (สีเหลือง RDY145 สีแดง RDR195 และสีน้ำเงิน RDB222) กับค่า  $q_e$  ของสีรีแอกทีฟบนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีรีแอกทีฟ 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

$C_0$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง RDY145	สีแดง RDR195	สีน้ำเงิน RDB222	สีเหลือง RDY145	สีแดง RDR195	สีน้ำเงิน RDB222
50	8.6	-	4.6	3.6	-	3.9
100.0	-	13.1	-	-	7.2	-
200	12.4	16.4	7.2	18.4	19.2	20.5
300	20.6	18.1	17.5	27.8	29.1	29.7
400.0	-	36.1	38.6	-	38.1	38.4
430.0	-	55.7	-	-	38.6	-
500	58.7	81.9	86.8	45.5	43.8	43.1
600	94.3	-	-	53.4	-	-
700	146.4	188.4	261.5	58.6	52.1	44.4

## 2.4 การศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่าน AC ถ่าน MAC และ ถ่าน MCH

### 2.4.1 การศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีเหลือง RDY145

ตารางที่ ข-7 ค่า  $q$  ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$q$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH
0.2	1.8	1.4	15.7
0.3	-	2.0	24.3
0.5	2.3	-	32.4
1.0	3.2	2.9	42.9
1.5	4.5	-	51.0
2.0	-	3.8	52.5
3.0	5.1	4.1	58.6
4.0	5.2	5.1	57.2
5.0	6.5	5.3	59.2
6.0	6.6	5.3	59.3

### 2.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง RDY145

ตารางที่ ข-8 ค่า  $C_e$  ของสีเหลือง RDY145 กับค่า  $q_e$  ของสีเหลือง RDY145 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 และ 3 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ตามลำดับ

$C_0$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH
50	34.3	32.6	8.6	2.2	2.4	3.6
100	81.3	85.2	-	3.3	2.9	-
200	153.0	167.7	12.4	5.0	3.5	18.4
300	253.8	258.5	20.6	4.8	4.3	27.8
400	358.8	365.6	-	5.0	4.3	-
500	454.9	454.6	58.7	5.6	5.6	45.5

C <sub>0</sub> (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	C <sub>e</sub> (มิลลิกรัมต่อลิตร)			q <sub>e</sub> (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH
600	542.0	-	94.3	5.0	-	53.4
700	639.9	632.3	146.4	6.3	5.3	58.6

### 3. การศึกษาการดูดซับสปีดิสเพิร์สในน้ำเสียสังเคราะห์

#### 3.1 การศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB ต่อความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH

ตารางที่ ข-9 ค่า C ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน CH ถ่าน MCH และร้อยละการดูดซับของสีเหลือง DDY3 ณ สภาวะ C<sub>0</sub> ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	C (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับ
ถ่าน CH	172.6	86.3
ถ่าน MCH	159.1	79.5

#### 3.2 การศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสปีดิสเพิร์ส

ตารางที่ ข-10 ค่า q ของสปีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ C<sub>0</sub> ของสปีดิสเพิร์ส 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง DDY3	สีแดง DDR60	สีน้ำเงิน DDB56
0.2	1.0	1.2	0.3
0.3	-	1.6	0.6
0.5	-	2.3	1.0
1.0	2.8	3.0	1.3
1.5	-	3.4	1.5
2.0	-	3.8	1.8
3.0	4.9	4.1	1.9
4.0	-	4.6	-
5.0	-	4.5	-
6.0	6.2	4.5	-
12.0	8.5	4.6	2.5



เวลา (ชั่วโมง)	q (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง DDY3	สีแดง DDR60	สีน้ำเงิน DDB56
18.0	10.6	-	
24.0	14.7	4.4	2.3
27.0	15.4	-	-
30.0	15.7	-	-
36.0	15.4	4.6	2.4

### 3.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสปีดิสเพิร์ส

ตารางที่ ข-11 ค่า  $C_e$  ของสปีดิสเพิร์ส (สีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56) กับค่า  $q_e$  ของสปีดิสเพิร์สบนถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสปีดิสเพิร์ส 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 4 และ 3 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง DDY3 สีแดง DDR60 และสีน้ำเงิน DDB56 ตามลำดับ

$C_0$ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	$C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	สีเหลือง DDY3	สีแดง DDR60	สีน้ำเงิน DDB56	สีเหลือง DDY3	สีแดง DDR60	สีน้ำเงิน DDB56
10	-	1.0	1.6	-	0.7	0.6
20	-	3.5	-	-	1.7	-
30	5.6	5.9	-	2.8	2.5	-
40	-	10.1	-	-	3.5	-
50	10.1	13.0	41.0	4.3	3.8	1.1
	-	17.6	-	-	4.6	-
70	13.4	28.3	-	6.1	4.5	-
80	-	35.3	-	-	4.5	-
90	-	44.7	-	-	4.5	-
100	15.3	55.5	88.0	9.0	4.5	1.4
120	19.6	74.5	106.6	10.3	4.6	1.6
150	26.7	105.0	132.8	13.0	4.5	2.0
170	29.1	122.5	155.0	14.1	4.8	2.1
200	39.7	154.6	180.5	15.4	4.5	1.9

### 3.4 การศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับสีเหลือง DDY3 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ ถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH

#### 3.4.1 การศึกษาเวลาและจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีเหลือง DDY3

ตารางที่ ข-12 ค่า  $q$  ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$q$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH
1	1.7	1.9	2.8
3	4.4	3.0	4.9
6	8.1	4.3	6.2
9	8.4	5.0	-
12	11.6	5.8	8.5
15	13.0	6.6	-
18	14.6	7.0	10.6
21	16.0	7.9	-
24	16.2	8.6	14.7
27	-	-	15.4
30	16.9	10.0	15.7
36	16.9	10.7	15.4
42	16.9	11.4	-
48	17.2	12.6	-
54	-	13.8	-
60	-	13.9	-
66	-	15.5	-
72	-	15.4	-
78	-	17.2	-
84	-	17.0	-
96	17.2	17.3	15.5

### 3.4.2 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีเหลือง DDY3

ตารางที่ ข-13 ค่า  $C_e$  ของสีเหลือง DDY3 กับค่า  $q_e$  ของสีเหลือง DDY3 บนถ่าน AC ถ่าน MAC และ ถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 10 - 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 21 78 และ 24 ชั่วโมง สำหรับถ่าน AC ถ่าน MAC และ ถ่าน MCH ตามลำดับ

$C_0$ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	$C_e$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			$q_e$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		
	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH	ถ่าน AC	ถ่าน MAC	ถ่าน MCH
10	2.0	-	5.6	1.1	-	2.8
20.0	-	4.1	-	-	1.7	-
30	4.8	-	10.1	3.0	-	4.3
50	6.8	-	13.4	4.7	-	6.1
70	10.1	-	15.3	6.7	-	9.0
80	-	11.2	-	-	8.5	-
100	14.3	-	19.6	9.5	-	10.3
120	17.0	16.5	26.7	10.9	12.4	13.0
150	21.6	-	29.1	12.5	-	14.1
160	-	21.1	-	-	14.8	-
170	24.5	-	39.7	14.0	-	15.4
180	-	24.8	-	-	17.5	-
200	28.8	30.0	-	16.9	17.0	-

4. การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีเหลือง DDY3 ของถ่าน CH และถ่าน AC ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80

ตารางที่ ข-14 ร้อยละการดูดซับสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ด้วยถ่าน CH และถ่าน AC ณ สภาวะ  $C_0$  ของสารลดแรงตึงผิว 10 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่ อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 7.5 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	C (มิลลิโมลต่อลิตร)			ร้อยละการดูดซับ		
	CTAB	SDS	Tween80	CTAB	SDS	Tween80
ถ่าน CH	2.65	9.42	1.25	26.50	94.20	12.50
ถ่าน AC	2.35	9.37	0.78	23.50	93.70	7.80

ตารางที่ ข-15 ค่า C และร้อยละการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่านที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิด คือ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Tween80 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 เริ่มต้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณถ่าน 1 กรัม ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตัวอย่าง	C (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ร้อยละการดูดซับ		
	CTAB	SDS	Tween80	CTAB	SDS	Tween80
ถ่าน CH	159.0	166.8	126.2	79.5	83.4	63.1
ถ่าน AC	92.8	106.4	90.0	46.4	53.2	45.0

#### 5. การศึกษาพีเอชในการดูดซับสีเหลือง RDY145 และการดูดซับสีเหลือง DDY3 บนถ่าน MCH

ตารางที่ ข-16 ค่า C กับร้อยละการดูดซับของสีเหลือง RDY145 และการดูดซับสีเหลือง DDY3 ด้วยถ่าน MCH ที่ค่าพีเอช 3, 6 และ 9 ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 เท่ากับ 700 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 และ 24 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับสีเหลือง RDY145 และสีเหลือง DDY3 ตามลำดับ

ค่าพีเอช	C (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ร้อยละการดูดซับ	
	RDY145	DDY3	RDY145	DDY3
3	568.2	152.1	81.2	76.1
6	560.1	151.2	80.0	75.6
9	557.6	147.1	79.7	73.5

#### 6. การศึกษาการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง

##### 6.1 การศึกษาการดูดซับสีเหลือง RDY145

ตารางที่ ข-17 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน AC ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.4	0.228
0.5	0.383
0.7	0.550
0.9	0.630
1.0	0.694

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
1.2	0.728
1.4	0.731
1.5	0.769
1.7	0.794
1.9	0.808
2.0	0.829
2.2	0.840
2.4	0.850
2.5	0.861
2.8	0.851
3.0	0.877
3.3	0.883
3.5	0.882
4.0	0.906
4.5	0.914
5.0	0.912
5.5	0.922
6.0	0.917
7.0	0.950
8.0	0.942
9.0	0.965

ตารางที่ ข-18 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง ด้วยถ่าน MAC ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.1	0.685
0.2	0.771
0.3	0.803
0.5	0.833
0.7	0.855
0.8	0.854

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
1.0	0.875
1.2	0.896
1.3	0.889
1.5	0.907
1.7	0.901
1.9	0.912
2.2	0.918
2.4	0.924
2.7	0.922
3.2	0.945
3.7	0.960
4.2	0.979

ตารางที่ ข-19 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง RDY145 1 มิลลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.1	0.015
0.3	0.003
0.4	0.010
0.8	0.002
1.1	0.000
1.8	0.000
2.4	0.000
3.1	0.000
4.1	0.000
5.1	0.000
6.3	0.010
7.3	0.007
8.3	0.026
9.3	0.036
10.3	0.050

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
11.3	0.065
12.3	0.083
13.3	0.107
13.8	0.127
14.8	0.155
15.8	0.183
17.8	0.237
18.8	0.263
19.8	0.297
23.2	0.311
24.2	0.323
25.4	0.340
26.9	0.377
28.9	0.420
30.9	0.437
33.9	0.493
36.9	0.546
43.9	0.656
47.4	0.656
49.4	0.663
51.4	0.703

### 6.2 การศึกษาการดูดซับสีเหลือง DDY3

ตารางที่ ข-20 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน AC ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.3	0.390
2.5	0.419
3.5	0.440
5.5	0.440
8.5	0.486

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
13.5	0.506
22.5	0.605
30.5	0.650
39.5	0.669
47.5	0.680

ตารางที่ ข-21 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง ด้วยถ่าน MAC ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.1	0.811
0.2	0.854
0.4	0.845
0.7	0.870
1.4	0.849
2.4	0.879
3.4	0.886
6.1	0.892

ตารางที่ ข-22 ค่า  $C_e$  ต่อ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 ที่เวลาต่างๆ จากการดูดซับเบื้องต้นในคอลัมน์เบตนิ่ง ด้วยถ่าน MCH ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง DDY3 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ต่อความสูงของถ่านในคอลัมน์ คือ 1: 3 ที่อุณหภูมิห้อง และอัตราการไหลของสีเหลือง DDY3 1 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
0.0	0.000
0.2	0.256
0.4	0.329
0.5	0.355
0.7	0.388
0.9	0.402
1.0	0.406
1.3	0.439



เวลา (ชั่วโมง)	$C_e / C_0$
1.5	0.450
1.8	0.461
2.3	0.487
2.8	0.510
3.3	0.529
4.3	0.549
5.3	0.560
6.3	0.599
7.3	0.604
8.3	0.614
10.3	0.687
12.4	0.697
14.3	0.704

## ภาคผนวก ค

### การคำนวณ

#### 1 การคำนวณหาปริมาณการดูดซับบนถ่าน (q) และร้อยละการดูดซับ

ตัวอย่างเช่น - สีเหลือง RDY145 ความเข้มข้นเริ่มต้น 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 0.1 ลิตร

- การดูดซับสีเหลือง RDY145 ใช้ปริมาณถ่าน MCH 1 กรัม

- ความเข้มข้นสีเหลือง RDY145 ที่เหลือหลังการดูดซับ 146.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

ดังนั้น ปริมาณการดูดซับบนถ่านหาได้จากสมการที่ 1 คือ

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} V = \frac{\left(700 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \left(146.4 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{1 \text{ g MCH}} \times 0.1 \text{ L} = 55.36 \frac{\text{mg}}{\text{g MCH}}$$

**Ans.**

ร้อยละการดูดซับสีเหลือง RDY145 หาได้จากสมการที่ 2 คือ

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 = \frac{\left(700 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \left(146.4 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{\left(700 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} \times 100 = 79.1 \%$$

**Ans.**

#### 2 การคำนวณหาค่าคงที่ต่างๆ ในแบบจำลองจลพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ

##### 2.1 แบบจำลองจลพลศาสตร์การดูดซับ

##### 2.1.1 ทำนายแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

ตัวอย่างเช่น จากข้อมูลดิบ ตารางที่ ข-5 ปริมาณการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที นำมาทำนายแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง โดยข้อมูลที่ได้นำมาพลอตกราฟเส้นตรงตามสมการที่ 5

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

เขียนกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-k_1$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\ln q_e$

จะได้สมการ  $y = -0.0184x - 3.0617$  และ  $R^2 = 0.9796$

ดังนั้น  $-k_1 = -0.0184$

$$k_1 = 0.0184 \text{ 1/min} \quad \text{Ans.}$$

$$\ln q_e = -3.0617$$

$$q_e = e^{-3.0617} = 0.0468 \text{ mmol/g} \quad \text{Ans.}$$

### 2.1.2 ทำนายแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

ตัวอย่างเช่น จากข้อมูลดิบ ตารางที่ ข-5 ปริมาณการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์บนถ่าน MCH ที่เวลาต่างๆ ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที นำมาทำนายแบบจำลองอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง โดยข้อมูลที่ได้นำมาพลอตกราฟเส้นตรงตามสมการที่ 8

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 q_e^2}$$

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{t}{q_t}$  และ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_e}$  และจุดตัด

แกน  $y$  เท่ากับ  $\frac{1}{k_2 q_e^2}$

จะได้สมการ  $y = 15.001x + 514.54$  และ  $R^2 = 0.9973$

ดังนั้น  $\frac{1}{q_e} = 15.001$

$$q_e = \frac{1}{15.001} = 0.0667 \text{ mmol/g} \quad \text{Ans.}$$

$$\frac{1}{k_2 q_e^2} = 514.54$$

$$k_2 = \frac{1}{514.54 \times 0.0667^2} = 0.437 \text{ g/mmol-min} \quad \text{Ans.}$$

## 2.2 แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับ

### 2.2.1 แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

ตัวอย่างเช่น จากข้อมูลดิบ ตารางที่ ข-6 ปริมาณการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ บนถ่าน MCH กับความเข้มข้นสีเหลือง RDY145 ที่เหลือในสารละลาย ( $C_e$ ) ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมงนำมาทำนายแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ โดยข้อมูลที่ได้นำมาพลอตกราฟเส้นตรงตามสมการที่ 10

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}}$$

จากสมการที่ 12 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{C_e}{q_e}$  และ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{q_{\max}}$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{k_L q_{\max}}$

จะได้สมการ  $y = 14.095x + 0.4794$  และ  $R^2 = 0.9995$

ดังนั้น  $\frac{1}{q_{\max}} = 14.095$

$$q_{\max} = \frac{1}{14.095} = 0.0709 \text{ mmol/g} \quad \text{Ans.}$$

$$\frac{1}{k_L q_{\max}} = 0.4794$$

$$k_L = \frac{1}{0.4794 \times 0.0709} = 29.4 \text{ L/mmol} \quad \text{Ans.}$$

### 2.2.2 แบบจำลองการดูดซับของฟรุนดริช

ตัวอย่างเช่น จากข้อมูลดิบ ตารางที่ ข-6 ปริมาณการดูดซับสีเหลือง RDY145 ในน้ำเสียสังเคราะห์ บนถ่าน MCH กับความเข้มข้นสีเหลือง RDY145 ที่เหลือในสารละลาย ( $C_e$ ) ณ สภาวะ  $C_0$  ของสีเหลือง RDY145 50 - 700 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องและเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมงนำมา

ทำนายแบบจำลองการดูดซับของฟรอนตริช โดยข้อมูลที่ได้นำมาพลอตกราฟเส้นตรงตามสมการที่ 12

$$\log q_e = \log k_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

จากสมการที่ 14 เมื่อนำไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  และ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log k_F$

จะได้สมการ  $y = 0.465x - 0.8115$  และ  $R^2 = 0.9678$

ดังนั้น  $\frac{1}{n} = 0.465$

$$n = \frac{1}{0.465} = 2.15 \quad \text{Ans.}$$

$$\log k_F = -0.8115$$

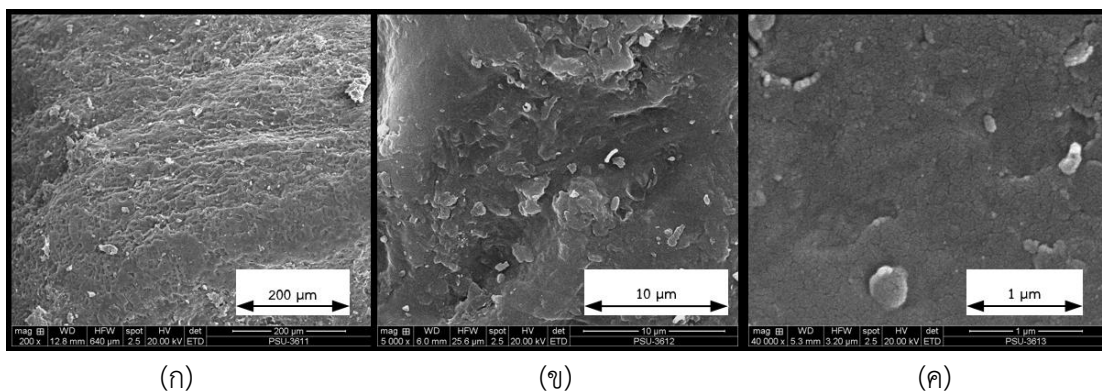
$$k_F = 10^{-0.8115} = 0.154 \text{ mmol/g (L/mmol)}^{1/n} \quad \text{Ans.}$$

## ภาคผนวก ง

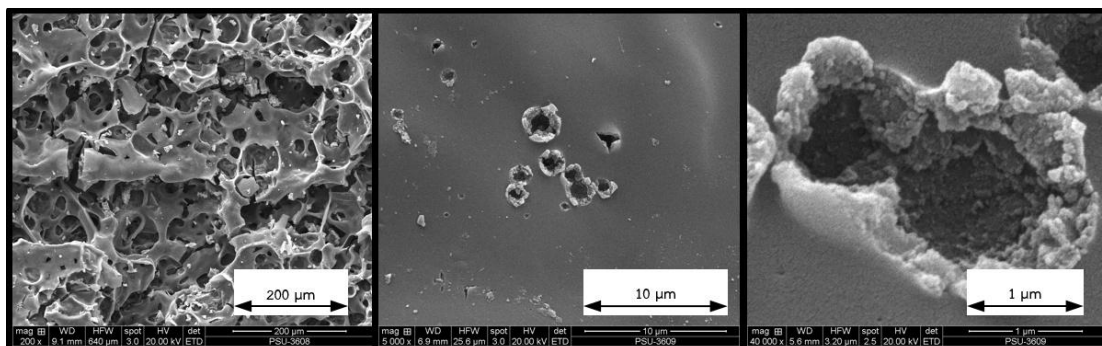
## ศึกษาลักษณะพื้นผิวถ่าน

เทคนิคการทดสอบ: ถ่ายภาพอิเล็กตรอนไมโครกราฟ  
 เครื่องมือทดสอบ: Scanning Electron Microscope, Quanta400, FEI, Czech Republic  
 สภาวะการทดสอบ: Mode: High vacuum  
 Detector: Everhart Thornley Detector (ETD)  
 Voltage: 20 kV  
 กำลังขยาย: 200 เท่า 5000 เท่า และ 40000 เท่า

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของถ่าน CH และถ่าน AC โดยการถ่ายภาพ SEM เปรียบเทียบลักษณะถ่าน CH ก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ (50 %wt) และถ่าน AC แสดงดังภาพประกอบที่ ง-1 ถึง ง-5



ภาพประกอบที่ ง-1 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้น ด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

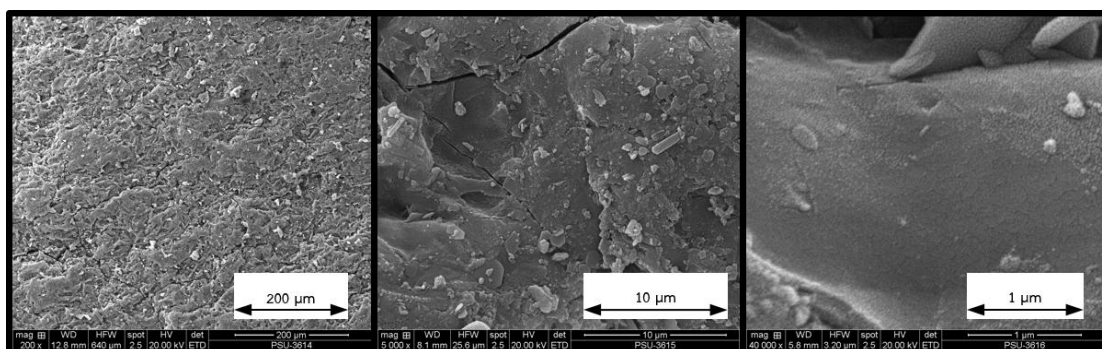


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ ง-2 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

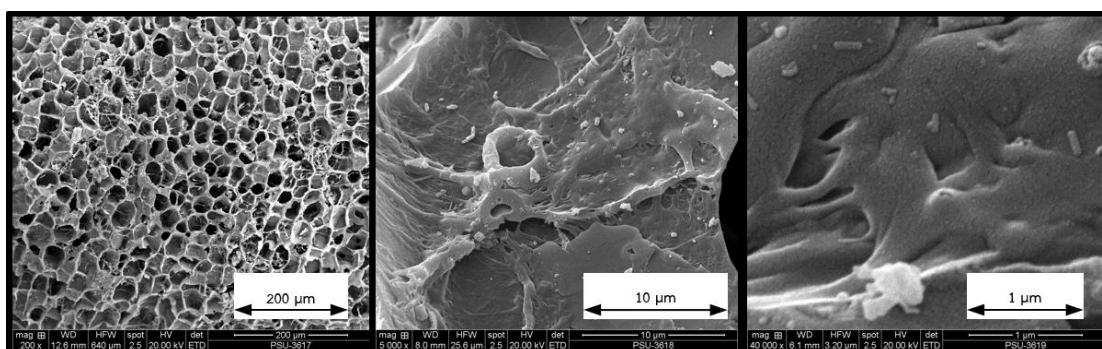


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ ง-3 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH ก่อนการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า

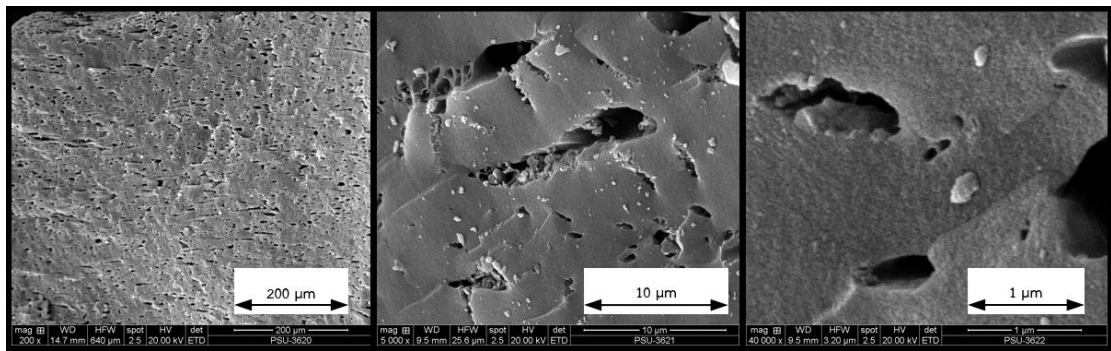


(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ ง-4 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน CH หลังการกระตุ้นด้วยสารละลาย  $ZnCl_2$  ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ ง-5 ลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของถ่าน AC ที่กำลังขยาย (ก) 200 เท่า (ข) 5000 เท่า และ (ค) 40000 เท่า



**ประวัติผู้เขียน**

ชื่อ สกุล	นางสาวฉัตรสุดา โกศัยกานนท์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5910120049	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2559

**ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)**

- ทุนบัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ ระดับปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2559
- ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปีงบประมาณ 2560