



การเตรียมผนังธรรมชาติจากฟางด้วยวิธีการดูดซับ



โดย

นางสาวพลอยพัทธ์ ศุภรัตน์ธัญญา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมพงศักรรมาชาติจากฝางด้วยวิธีการดูดซับ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION OF LAKE PIGMENT FROM SAPPANWOOD USING ADSORPTION  
METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (CHEMICAL STUDIES)  
Department of CHEMISTRY  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2017  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การเตรียมพงศักรรมาชาติจากฝางด้วยวิธีการดูดซั้บ
โดย	พลอยพัทธ์ ศุภรัตน์ธัญญา
สาขาวิชา	เคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ดร. จิตนภา ศิริรักษ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

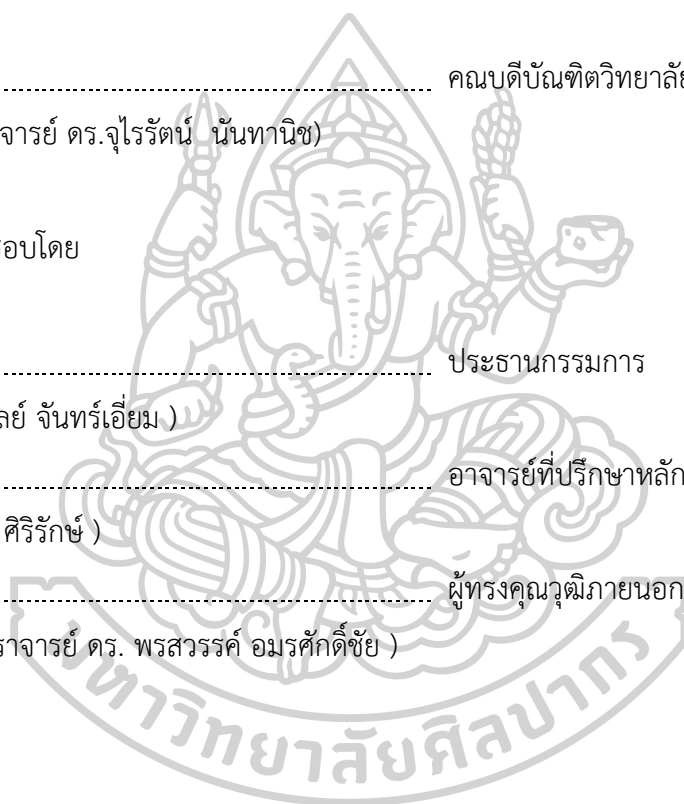
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ดร. สุนนมาลย์ จันทรเอี่ยม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร. จิตนภา ศิริรักษ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย)



59301204 : เคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : อะลูมิเนียมออกไซด์, อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, มอนต์มอริลโลไนท์, บราซิลีน, จลนศาสตร์ การดูดซับ, ไอโซเทอมการดูดซับ

นางสาว พลอยพัทธ์ สุภรัตน์ธัญญา: การเตรียมผงสีธรรมชาติจากฝางด้วยวิธีการดูดซับ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ดร. จิตนภา ศิริรักษ์

ฝาง (*Caesalpiniasappan*) เป็นไม้ย้อมสีธรรมชาติ ที่มีรงควัตถุที่ชื่อว่า “บราซิลีน (brazilin)” ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารสีแดงที่ชื่อว่า “บราซิลีน (brazilein)” ได้เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน บราซิลีนมักถูกนำมาใช้ในรูปสารสกัดหยาบหรือสารสกัดบริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง สารสกัดหยาบบราซิลีนสามารถถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปผงสีได้โดยวิธีการดูดซับลงบนตัวดูดซับ และผงสีที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลากหลายประเภท ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับบราซิลีนลงบนตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์ โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ เช่น พีเอชของสารละลายบราซิลีน ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีน จากผลการวิจัย พบว่า pH มีผลต่อสีของผงสีที่ได้ ความสามารถในการดูดซับบราซิลีนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับน้อยลง และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายบราซิลีนจะมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลีนเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่ากลไกการดูดซับบราซิลีนด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดริช ยกเว้นการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ในกรณีที่มีการควบคุม pH เท่ากับ 7 จะสอดคล้องแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับสองและแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์

59301204 : Major (CHEMICAL STUDIES)

Keyword : Aluminium oxide, Aluminium hydroxide, Montmorillonite, Brazilein, Adsorption Kinetics, Adsorption Isotherms

MISS PLOYPHAT SUPPHARATTHANYA : PREPARATION OF LAKE PIGMENT FROM SAPPANWOOD USING ADSORPTION METHOD THESIS ADVISOR : DR. JITNAPA SIRIRAK

Sappanwood (*Caesalpiniasappan*), is natural dye containing red pigment named “brazilin”. Brazilin can be oxidized to “brazilein” yielding red color. Generally, brazilein extract or pure brazilein are used in textile and cosmetics industry. Using adsorption method, brazilein extract can be transformed to lake pigment which can be applied in many more applications. In this study, the effect of pH, the amount of adsorbents and the concentration of brazilein solution on the adsorption of brazilein on aluminium oxide, aluminium hydroxide and montmorillonite were investigated. Their adsorption kinetics and adsorption isotherm were also explored. The results showed that the higher adsorption capacity of adsorbents at equilibrium were observed when the lower amount of the adsorbents were used. The adsorption capacity of adsorbents at equilibrium was increased with the increase of the concentration of brazilein. Moreover, adsorption kinetics and adsorption isotherm were fitted well with a pseudo-second order kinetics model and Freundlich adsorption isotherm on the adsorbents whereas the adsorption kinetics and adsorption isotherm at pH 7 on montmorillonite was fitted well with a pseudo-second order kinetics model and Langmuir adsorption isotherm, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อมธรรมชาติจากฝาง โดยจะทำการเปรียบเทียบการดูดซับของตัวดูดซับทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์, อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์ จากนั้นทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลินจากฝาง ซึ่งงานวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ หากขาดอาจารย์ ดร.จิตนภา ศิริรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานวิจัย ที่ให้คำปรึกษาสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการดำเนินงาน รวมทั้งการตรวจทานและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของการวิจัยให้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุมนมาลย์ จันทร์เอี่ยม และ ผศ. ดร.พรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัยที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบ และให้คำชี้แนะในการแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ที่มีได้เอื้อนยามที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือด้านต่างๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงดำเนินการไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ อำนวยความสะดวกในด้านสารเคมี และอุปกรณ์การทดลองต่างๆ ตลอดงานวิจัย ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจงานอนุรักษ์จิตรกรรมฝาผนังของไทย



พลอยพัทธ์ ศุภรัตน์ธัญญา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
ตารางรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ).....	5
2.2 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $AlOH_3$ ).....	6
2.3 มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite).....	7
2.5 การวัดสีด้วยเทคนิค CIELAB.....	9
2.6 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของผงสีด้วยเทคนิค UV-Vis Diffused Reflectance Spectroscopy (DRS).....	10
2.7 Adsorption kinetics.....	10
2.8 Adsorption isotherm .....	11



2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ มาดูดซับสีย้อม .....	13
บทที่ 3 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	15
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	16
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	16
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	25
4.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลีนจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียม ออกไซด์เป็นตัวดูดซับ .....	25
4.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลีนจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับ .....	33
4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลีนจากฝางโดยใช้มอนต์มอริล โลไนท์เป็นตัวดูดซับ .....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	71
รายการอ้างอิง .....	74
ภาคผนวก.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 CIELAB ของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ ..... 6

ตารางที่ 2 CIELAB ของผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ..... 7

ตารางที่ 3 CIELAB ของผงมอนต์มอริลโลไนท์ ..... 7

ตารางที่ 4 แสดงค่า  $pH_{pzc}$  ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ ..... 9

ตารางที่ 5 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ ..... 25

ตารางที่ 6 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ..... 28

ตารางที่ 7 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน ..... 29

ตารางที่ 8 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model และปฏิกิริยา Pseudo-second order model ..... 32

ตารางที่ 9 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich ..... 32

ตารางที่ 10 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ ..... 35

ตารางที่ 11 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH ..... 35

ตารางที่ 12 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ ..... 37

ตารางที่ 13 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ..... 37

ตารางที่ 14 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH ..... 38

ตารางที่ 15 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ..... 39

ตารางที่ 16 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน ..... 42

ตารางที่ 17 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH ..... 42

ตารางที่ 18 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน ..... 44

ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน ..... 45

ตารางที่ 20 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน .....	47
ตารางที่ 21 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich.....	50
ตารางที่ 22 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich.....	50
ตารางที่ 23 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ .....	53
ตารางที่ 24 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH.....	53
ตารางที่ 25 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ .....	54
ตารางที่ 26 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน .....	56
ตารางที่ 27 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH.....	57
ตารางที่ 28 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน .....	58
ตารางที่ 29 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน .....	59
ตารางที่ 30 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH.....	61
ตารางที่ 31 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน .....	63
ตารางที่ 32 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน .....	64
ตารางที่ 33 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน .....	66
ตารางที่ 34 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich.....	69
ตารางที่ 35 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich.....	69

**ตารางรูปภาพ**

**รูปที่ 1** ตัวอย่าง Cationic dye (ก) (จิรวรรณ พิจารย วาสนา พันชน มิگی กัณณะ สราวุฒิ สมนาม และสัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2558) และ Anionic dye (ข) (Rani et al., 2014)..... 1

**รูปที่ 2** สีย้อมสีน้ำเงินที่มาจากต้นคราม (ก) (โคตรแสง, 2016) และสีย้อมสีแดงที่มาจากครั่ง (ข) (อ.ลักษณะการเกษตร, 2013)..... 2

**รูปที่ 3** แก่นฝาง (ก) (โตศรีสวัสดิ์เกษม, 2010) , โครงสร้างของ Brazilin (ข) (Nirmal & Panichayupakaranant, 2014) และ โครงสร้างของ Brazilein (ค) (Cao et al., 2012) ..... 3

**รูปที่ 4** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย้อมฝาง ..... 3

**รูปที่ 5** โครงสร้างของอะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) (ลิมปิจำนงค์, 2013) และค่าการดูดกลืนแสงของผง อะลูมิเนียมออกไซด์ (ข)..... 5

**รูปที่ 6** โครงสร้างของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์(ก) (ราษฎร์วิจิตร, 2012) และค่าการดูดกลืนแสงของผง อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ข)..... 6

**รูปที่ 7** โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ (ก) (Nuruzzaman, Rahman, Liu, & Naidu, 2016) และ ค่าการดูดกลืนแสงของผงมอนต์มอริลโลไนท์ (ข) ..... 8

**รูปที่ 8** ระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ ..... 9

**รูปที่ 9** แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบ Langmuir (Engineering, 2011)..... 12

**รูปที่ 10** แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบ Freundlich ..... 13

**รูปที่ 11** (ก) สารละลายบราซิลีนความเข้มข้น 20 mg/L ที่ pH 7 และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง ของ สารละลายบราซิลีนความเข้มข้น 10 mg/L ที่ pH 7 ..... 17

**รูปที่ 12** โครงสร้างบราซิลีนที่ pH ต่าง ๆ (Rondão et al., 2013) (ก) และสารละลายบราซิลีนที่ pH ต่าง ๆ (ข)..... 18

**รูปที่ 13** ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียม ออกไซด์ ..... 26

**รูปที่ 14** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ ..... 26

**รูปที่ 15** ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลีนด้วย อะลูมิเนียมออกไซด์..... 27

**รูปที่ 16** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน..... 27

**รูปที่ 17** ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์..... 29

**รูปที่ 18** ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 120 นาที..... 30

**รูปที่ 19** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน..... 30

**รูปที่ 20** ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model ( $\eta$ ) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model ( $\chi$ ) ของการดูดซับบราซิลินบนอะลูมิเนียมออกไซด์..... 31

**รูปที่ 21** ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich..... 33

**รูปที่ 22** ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..... 34

**รูปที่ 23** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ..... 34

**รูปที่ 24** ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..... 36

**รูปที่ 25** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ..... 36

**รูปที่ 26** ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..... 38

**รูปที่ 27** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน..... 38

**รูปที่ 28** ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..... 39

**รูปที่ 29** ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน..... 40

**รูปที่ 30** ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์..... 41

รูปที่ 31	ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 50 นาที .....	41
รูปที่ 32	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน .....	42
รูปที่ 33	ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ .....	43
รูปที่ 34	ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 50 นาที .....	44
รูปที่ 35	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน .....	44
รูปที่ 36	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิลินบนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ .....	46
รูปที่ 37	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิลินบนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ .....	48
รูปที่ 38	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich .....	49
รูปที่ 39	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich .....	51
รูปที่ 40	ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ .....	52
รูปที่ 41	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ .....	53
รูปที่ 42	ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ .....	55
รูปที่ 44	ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ .....	56

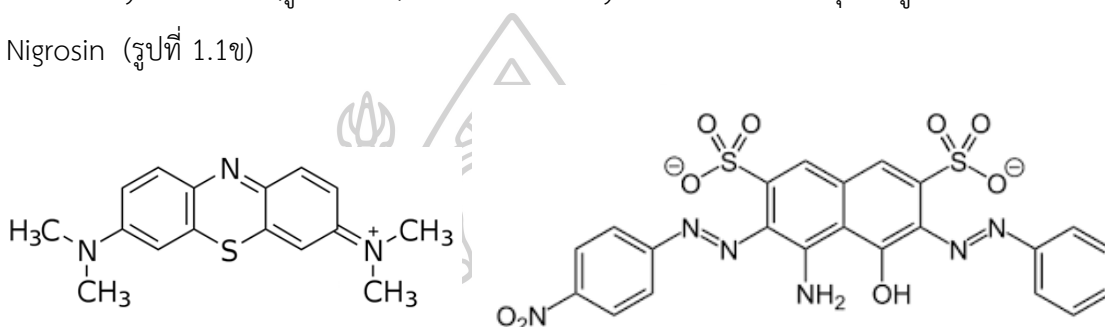
รูปที่ 45	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 46	ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์.....	58
รูปที่ 47	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน.....	59
รูปที่ 48	ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์.....	60
รูปที่ 49	ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ที่ได้จากการใช้สารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ .....	60
รูปที่ 51	ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์.....	62
รูปที่ 52	ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ที่ได้จากการใช้สารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ .....	62
รูปที่ 53	ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน.....	63
รูปที่ 54	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิลินบนมอนต์มอริลโลไนท์ .....	65
รูปที่ 55	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิลินบนมอนต์มอริลโลไนท์ .....	67
รูปที่ 57	ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich.....	70

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สีย้อม คือ สีชนิดหนึ่ง สามารถเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ สีย้อมสามารถละลายได้ในน้ำ หรือในตัวทำละลายอื่นๆ สีย้อมสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ Cationic dye (basic dye) และ Anionic (acid dye) โดย Cationic dye คือ สีย้อมที่มีประจุบวกอยู่บนโครงสร้าง เช่น Methylene blue (รูปที่ 1.1ก) ส่วน Anionic dye คือ สีย้อมที่มีประจุลบอยู่บนโครงสร้าง เช่น Nigrosin (รูปที่ 1.1ข)



**รูปที่ 1** ตัวอย่าง Cationic dye (ก) (จิรวรรณ พิจารณ วาสนา พันชน มิกิ กัณณะ สรวาภูมิ สมนาม และสัมพันธ์ วงศ์นาวา, 2558) และ Anionic dye (ข) (Rani et al., 2014)

นอกจากนี้ สีย้อมสามารถแบ่งตามที่มาของสีออกเป็น สีย้อมธรรมชาติ และสีย้อมสังเคราะห์ โดยสีย้อมสังเคราะห์ เป็นสีย้อมที่ได้จากกระบวนการทางเคมีเพื่อให้ได้สีที่มีคุณสมบัติตามต้องการ ในปัจจุบันได้มีการนำสีย้อมสังเคราะห์เข้ามาใช้ในภาคอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเครื่องหนัง อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง รวมไปถึงอุตสาหกรรมอาหาร (Messina & Schulz, 2006) น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของสีย้อมในแหล่งน้ำธรรมชาติ ถ้ามีการปนเปื้อนของสีย้อมในปริมาณมากจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง และขัดขวางการผ่านของแสงในน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำอย่างรุนแรง (Crini, 2006) นอกจากนี้สีย้อมสังเคราะห์สามารถเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งานเมื่อได้รับเข้าไปในปริมาณมากๆ เช่น ทำให้เกิดอาการท้องร่วง อาเจียน อาการผื่นคัน หรือโรคภูมิแพ้ได้

ส่วนสีย้อมธรรมชาติ คือ สีที่สกัดได้จากวัตถุดิบที่มีแหล่งที่มาจากแหล่งธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ เป็นต้น โดยตัวอย่างสีย้อมที่มาจากพืช ได้แก่ สีน้ำเงินจากต้นคราม (รูปที่ 2ก) สีดำจากลูกมะเกลือ สีเหลืองจากขมิ้น เป็นต้น และตัวอย่างสีย้อมที่มาจากสัตว์ ได้แก่ สีแดงจากครั่ง (รูปที่ 2ข) และสีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น (ชนิษฐา, 2007)





รูปที่ 2 สีย้อมสีน้ำเงินที่มาจากต้นคราม (ก) (โคตรแสง, 2016) และสีย้อมสีแดงที่มาจากครั่ง (ข) (อ.ลักษณะการเกษตร, 2013)

### ข้อดีของสีย้อมธรรมชาติ

1. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตและผู้บริโภค
2. น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
3. วัตถุดิบหาได้ง่ายในชุมชน ไม่ต้องใช้สีเคมีที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ
4. การย้อมสีธรรมชาติสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง เป็นความรู้ที่เพิ่มพูนขึ้นตามประสบการณ์ สามารถถ่ายทอดให้แก่คนรุ่นหลังเป็นภูมิปัญญาของท้องถิ่นได้
5. สีธรรมชาติมีความหลากหลายตามชนิด อายุ และส่วนของสิ่งทีนำมาใช้ ตลอดจนชนิดของสารกระตุ้นหรือขั้นตอนการย้อม
6. การย้อมสีธรรมชาติทำให้เห็นคุณค่าและรู้จักใช้ประโยชน์ของทรัพยากรธรรมชาติ

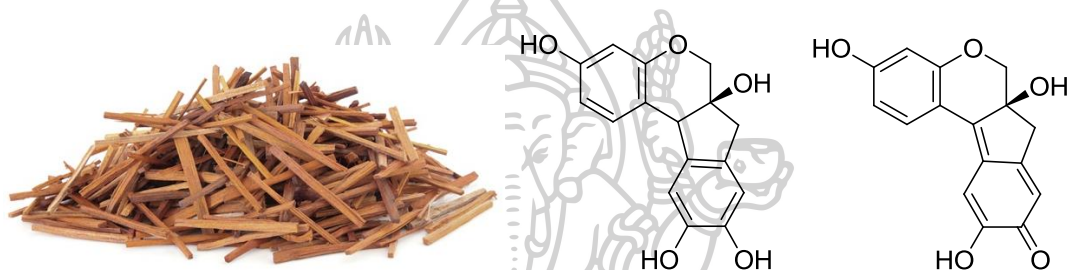
### ข้อจำกัดของสีย้อมธรรมชาติ

1. ปริมาณสารสีในวัตถุดิบย้อมสีมีน้อย ทำให้ย้อมได้สีไม่เข้มหรือต้องใช้เวลาวัตถุดิบปริมาณมาก
2. สีซีดจางและมีความคงทนต่อแสงต่ำ
3. คุณภาพการย้อมสีธรรมชาติขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการซึ่งควบคุมได้ยาก การย้อมสีให้เหมือนเดิมจึงทำได้ยาก
4. ในการย้อมสีธรรมชาติถ้าไม่มีวิธีการ และจิตสำนึกในการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน ย่อมจะกลายเป็นการทำลายสิ่งแวดล้อมได้

ในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะศึกษาสีย้อมธรรมชาติจากฝาง โดยชื่อวิทยาศาสตร์ของฝางคือ *Caesalpinia sappan* Linn อยู่ในวงศ์ Fabaceae สกุล *Caesalpinia* ฝางเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ประเภทไม้พุ่มหรือไม้พุ่มกึ่งไม้เถา ผลัดใบ มีความสูง 5-13 เมตร ลำต้นและกิ่งมีหนามแข็งและ

โค้งสั้น ๆ ใบมีลักษณะเป็นแบบขนนกสองชั้น เรียงสลับ มีข้อใบย่อย ข้อดอกเป็นแบบข้อแยกแขนง ออกที่ปลายกิ่งและซอกใบใกล้ปลายกิ่ง ผลเป็นฝักรูปขอบขนาน แกมรูปไข่กลับแบนแข็งเป็นจะงอยแหลม พบได้ในเขตร้อนในประเทศอินเดีย ศรีลังกา พม่า กัมพูชา ลาว และเวียดนาม สำหรับประเทศไทยจะพบในพื้นที่ป่าเบญจพรรณ ป่าเต็งรัง และป่าเขาหินปูนแห้งแล้ง (ปทุมชาติพัฒน์, 2017)

ไม้ฝาง (รูปที่ 1.3ก) จะมีสารประกอบบราซิลิน (Brazilin) (รูปที่ 1.3ข) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในฝาง บราซิลินสามารถละลายน้ำ และเปลี่ยนรูปได้เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดสารสีแดง ที่ชื่อว่า บราซิลีน (Brazilein) (รูปที่ 1.3ค) ออกมา (de Oliveira, Edwards, Velozo, & Nesbitt, 2002)



**รูปที่ 3** แก่นฝาง (ก) (โตศรีสวัสดิ์เกษม, 2010) , โครงสร้างของ Brazilin (ข) (Nirmal & Panichayupakaranant, 2014) และ โครงสร้างของ Brazilein (ค) (Cao et al., 2012)

ฝางและสีธรรมชาติส่วนใหญ่จะถูกใช้ในรูปของน้ำย้อม (รูปที่ 1.4) ทำให้การสร้างลวดลายของผลิตภัณฑ์และการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ค่อนข้างจำกัด ถ้าสีย้อมธรรมชาติอยู่ในรูปของผงสี จะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้หลากหลายประเภทมากขึ้น (ภัทรานิษฐ์ สิทธิพนธ์ พริยะ แก่นทับทิม และประเทืองทิพย์ ปานบำรุง, 2557) เช่น เป็นสารให้สีในเครื่องสำอางและพลาสติก และสามารถนำมาเป็นส่วนผสมของ สีสกรีน สีพ่น ซึ่งสามารถทำเป็นลวดลายต่าง ๆ ได้หลากหลายขึ้น



**รูปที่ 4** ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย้อมฝาง

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านั้น พบว่า วิธีการดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีที่สามารถใช้เปลี่ยนสี ย้อมธรรมชาติให้มาอยู่ในรูปของผงสี และมีตัวดูดซับหลากหลายประเภทที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมได้ เช่น มอนต์มอริลโลไนท์ (สายอินทวงศ์, 2008) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Kasprzyk-Hordern, 2009) เกาลิน (Kim & Chung, 2002) ดิน (Gürses et al., 2006) และไคโตซาน (Annadurai, Ling, & Lee, 2007) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์ เป็นตัวดูดซับบราซิลิน โดยจะศึกษากลไกและพฤติกรรมการดูดซับจากการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับ ทั้งยังศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ อิทธิพลของพีเอชของสารละลาย บราซิลิน และอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลาย บราซิลินที่มีต่อการดูดซับ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้เตรียมผงสีจากสารสกัดหยาบจากฝาง ด้วยวิธีการดูดซับต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมผงสีธรรมชาติจากฝาง โดยใช้วิธีการดูดซับ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของ pH, ผลของปริมาณตัวดูดซับ และผลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับ

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 วิธีการดูดซับสามารถใช้ในการเตรียมผงสีธรรมชาติจากฝาง
- 1.3.2 อะลูมิเนียมออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์ สามารถใช้เป็นตัวดูดซับสารละลายบราซิลิน

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์เป็นตัวดูดซับ
- 1.4.2 ใช้สีย้อมธรรมชาติจากฝาง

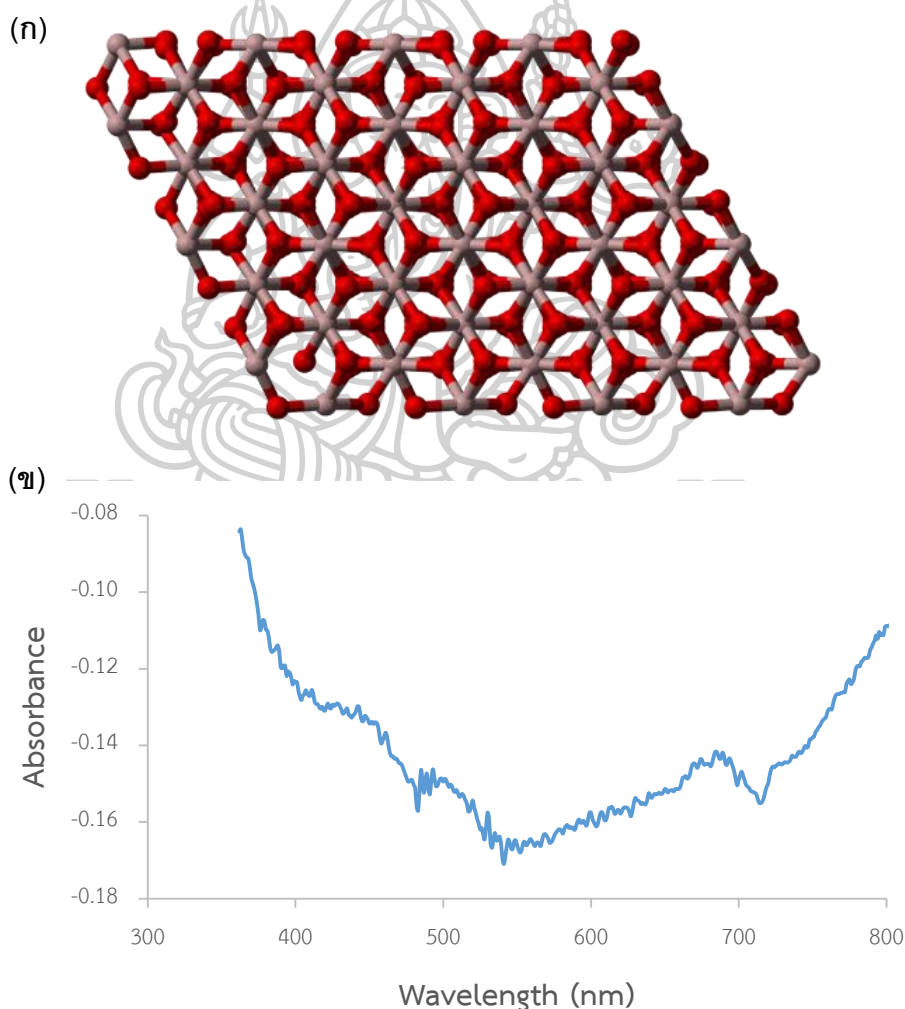
## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถเตรียมผงสีโดยอาศัยวิธีการดูดซับได้
- 1.5.2 งานวิจัยนี้สามารถนำไปเผยแพร่ในงานประชุมทางเคมีหรือตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ )

อะลูมิเนียมออกไซด์ พบในธรรมชาติในรูปของแร่คอรัันดัม (corundum) โดยทั่วไปจะมีสีขาวหรือไม่มีสี โครงสร้างของอะลูมิเนียมออกไซด์ (รูปที่ 2.1) ประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรงมาก การทำลายพันธะดังกล่าว ต้องใช้พลังงานสูง ทำให้อะลูมิเนียมออกไซด์มีความแข็งแรงมาก นอกจากนั้นแล้ว อะลูมิเนียมออกไซด์ยังทนความร้อนและการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่าง ๆ ได้ดีอย่างยิ่ง และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย



รูปที่ 5 โครงสร้างของอะลูมิเนียมออกไซด์ (ก) (ลิมปิจำนงค์, 2013) และค่าการดูดกลืนแสงของผงอะลูมิเนียมออกไซด์ (ข)

ตารางที่ 1 CIELAB ของผงอะลูมิเนียมออกไซด์

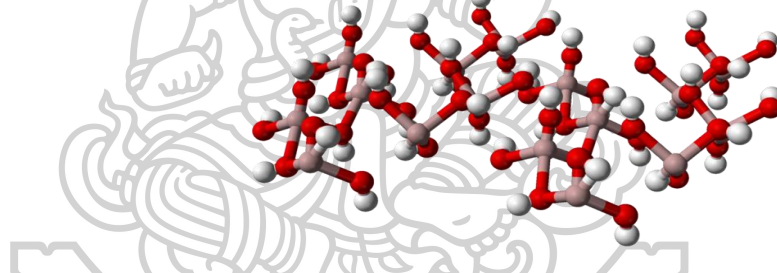


	L*	a*	b*
อะลูมิเนียมออกไซด์	115.18	-2.04	3.81

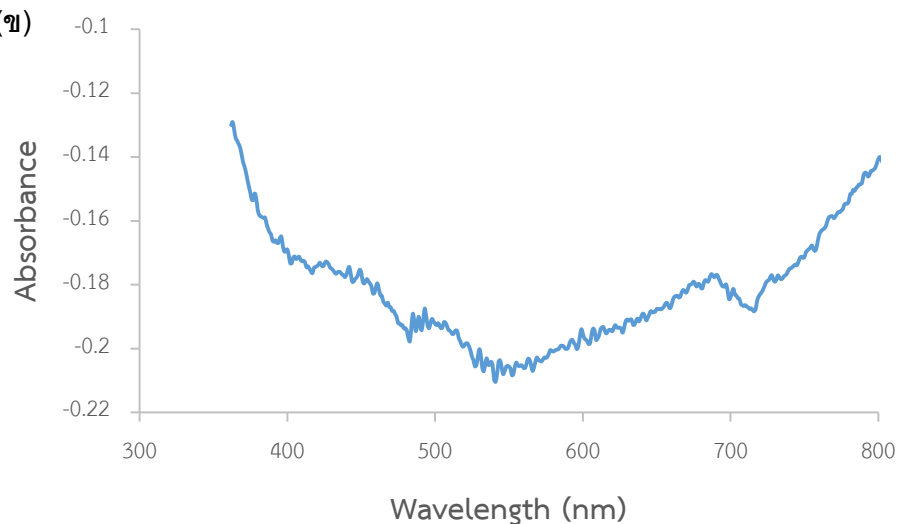
## 2.2 อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AlOH<sub>3</sub>)

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (รูปที่ 2.2) เป็นฟอร์มที่เสถียรที่สุดของอะลูมิเนียมในสภาวะปกติ โดยถ้าพบในธรรมชาติรู้จักกันในชื่อ กิบบไซต์ (Gibbsite)

(ก)



(ข)



รูปที่ 6 โครงสร้างของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์(ก) (ราชภรวิจิตร, 2012) และค่าการดูดกลืนแสงของผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (ข)

## ตารางที่ 2 CIELAB ของผงอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

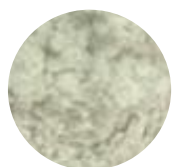


	L*	a*	b*
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์	119.24	-2.33	3.22

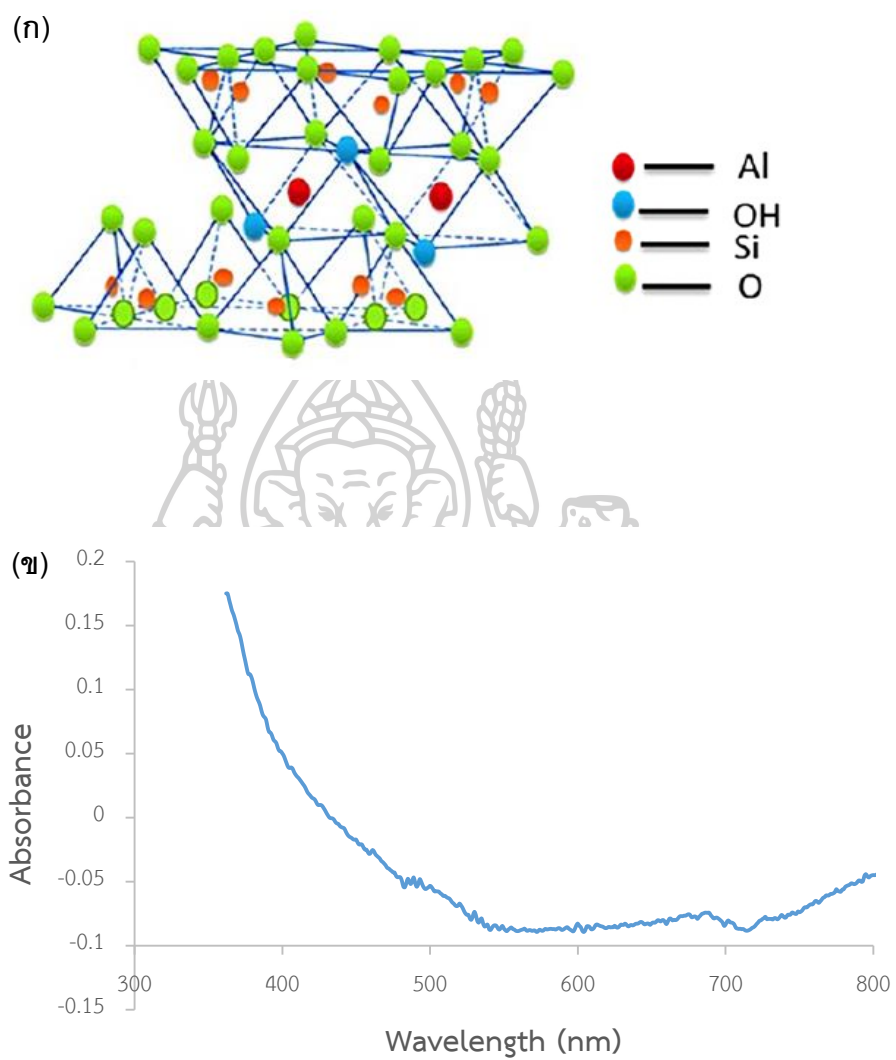
## 2.3 มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนท์ อยู่ในกลุ่มดินสเมคไทต์ (Smectite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียว ผลึกมอนต์มอริลโลไนท์ (รูปที่ 2.3) มีลักษณะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมที่มีชั้นที่ซ้อนกันซ้ำแล้วซ้ำอีก ในหนึ่งแผ่นมีขนาด 200 ~ 300 nm โครงสร้างพื้นฐานของแร่มอนต์มอริลโลไนท์ จะเป็นแผ่นหรือเกล็ด ขนาดเล็กๆซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุลอะลูมิเนียมไฮดรอกซิล โมเลกุลแปดระนาบ (Octahedral Aluminum Hydroxyl) อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิกอนออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมพีรามิด (Siliconoxygen Tetrahedral) โดยที่อะตอมของอะลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน

## ตารางที่ 3 CIELAB ของผงมอนต์มอริลโลไนท์



	L*	a*	b*
มอนต์มอริลโลไนท์	107.31	-2.57	9.19



รูปที่ 7 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ (ก) (Nuruzzaman, Rahman, Liu, & Naidu, 2016) และค่าการดูดกลืนแสงของผงมอนต์มอริลโลไนท์ (ข)

## 2.4 $pH_{pzc}$ (Point of zero charge)

ค่าที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งตัวอย่างค่า  $pH_{pzc}$  แต่ละตัวดูดซับมีค่าดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 แสดงค่า  $pH_{pzc}$  ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

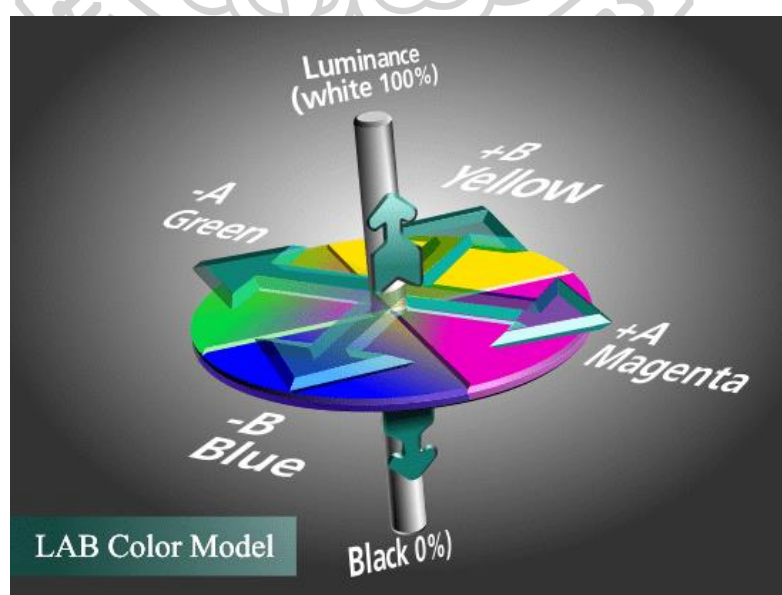
ประเภทตัวดูดซับ	$pH_{pzc}$ (Point of zero charge)
$Al_2O_3$	8.0
$Al(OH)_3$	7.6
Montmorillonite	2.2

โดยถ้า  $pH < pH_{pzc}$  จะทำให้ประจุที่ผิวตัวดูดซับมีประจุ (+)

โดยถ้า  $pH > pH_{pzc}$  จะทำให้ประจุที่ผิวตัวดูดซับมีประจุ (-)

## 2.5 การวัดสีด้วยเทคนิค CIELAB

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ โดยได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น  $L^*a^*b^*$  ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ



รูปที่ 8 ระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ



โดยที่ค่า  $L^*$  จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) ถ้าค่า  $L^*$  เป็น (-) จะแสดงถึงสีดำ,  $L^*$  เป็น (+) จะแสดงถึงสีขาว, ค่า  $a^*$  เป็น (-) จะแสดงแกนสีเขียว,  $a^*$  เป็น (+) จะแสดงแกนสีแดง,  $b^*$  เป็น (-) จะแสดงแกนสีน้ำเงิน และ  $b^*$  เป็น (+) จะแสดงแกนสีเหลือง

## 2.6 การวัดค่าการดูดกลืนแสงของผงสีด้วยเทคนิค UV-Vis Diffused Reflectance Spectroscopy (DRS)

เครื่องมือที่ใช้วัดสี เรียกว่า เครื่อง Spectrophotometer ที่สามารถวัดสีของวัตถุออกมาเป็นตัวเลขได้ ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็น reflectance curve วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve (โค้งค่าการสะท้อนแสง) ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่างกันเมื่อสะท้อนแสงของสีนั้นออกมาก็จะมีความยาวคลื่นต่างกัน โดยที่

สีน้ำเงิน มีความยาวคลื่นที่ 430-460 นาโนเมตร

สีเขียว มีความยาวคลื่นที่ 500-580 นาโนเมตร

สีแดง มีความยาวคลื่นที่ 620-780 นาโนเมตร

## 2.7 Adsorption kinetics

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (Pseudo-second order) และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) คือ

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (2.1)$$

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) คือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.2)$$

สมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน คือ

$$q_t = K_p t^{1/2} + C \quad (2.3)$$

โดยที่

$q_t$  คือ ความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่เวลาใดๆ

$q_e$  คือ ความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล

$K_1$  คือ ค่าคงที่อัตราของ Pseudo-first order model ( $\text{min}^{-1}$ )

$K_2$  คือ ค่าคงที่อัตราของ Pseudo-second order model ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ )

$K_p$  คือ ค่าคงที่อัตราของ การแพร่เข้าสู่รูพรุน ( $\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1/2}$ )

$t$  คือ เวลา (นาที)

## 2.8 Adsorption isotherm

การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยไอโซเทอมที่นิยมใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ ไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.8.1 Langmuir isotherm

Irving Langmuir ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐาน คือ

1. ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
3. ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น
4. โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการ Langmuir adsorption คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max} K_L} + \frac{C_e}{Q_{\max}} \quad (2.4)$$

โดยที่

$C_e$  คือ ปริมาณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายสีย้อมในหน่วย (mg/L)

$q_e$  คือ ปริมาณของสีสูงสุดที่สามารถดูดซับได้ ในหน่วย (mg/g)

$Q_{\max}$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว

$K_L$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ



**รูปที่ 9** แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบ Langmuir (Engineering, 2011)

### 2.8.2 Freundlich isotherm

เป็นการดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น สมการ Freundlich adsorption คือ

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

โดยที่

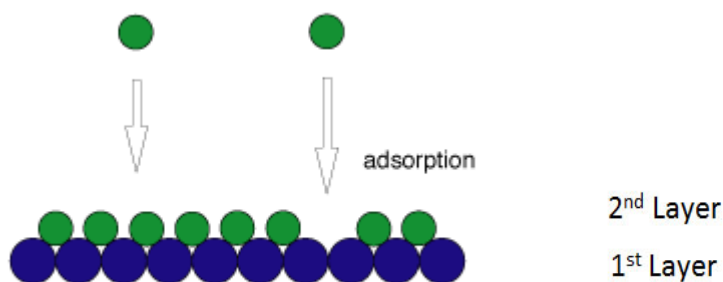
$C_e$  คือ ปริมาณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายสีย้อมในหน่วย (mg/L)

$q_e$  คือ ปริมาณของสีสูงสุดที่สามารถดูดซับได้ ในหน่วย (mg/g)

$K_F$  คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น ในหน่วย (mg/g)

$n$  คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ

สารละลาย



รูปที่ 10 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบ Freundlich

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ มาดูดซับสีย้อม

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า มีการนำตัวดูดซับหลากหลายประเภท มาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม เช่น คาร์บอนนาโนทิว (Engineering, 2011), ถ่านกัมมันต์ (Engineering, 2011) และ กราฟีนออกไซด์ (Li et al., 2013) จากการศึกษาของ

- Li Y. และคณะ (ปี 2008) (Li, Gao, Wu, Wang, & Li, 2008) พบว่า มีการนำโลหะไฮดรอกไซด์ผสมของอะลูมิเนียม และแมกนีเซียมมาใช้ในการดูดซับสีบิลเลียน เรด เค-2ปีพีจากโรงงานพิมพ์ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูงถึง 93.8–96.7% และสามารถกำจัดสีย้อมได้ในช่วง pH 4.0-11.0

- Uçar B. และคณะ (ปี 2011) (Uçar, Güvenç, & Mehmetoğlu, 2011) พบว่าได้ศึกษาการกำจัดสีรีแอกทีฟ-เรด2 และสีรีแอกทีฟบลู4 โดยใช้ตัวดูดซับที่เป็นชานอ้อย, กากน้ำตาล, กากตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์, ฟอสโฟยิปซัม, เศษซากจากโรงงานเฟอร์โรโครเมียมและเปลือกส้ม พบว่ากากตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้ในการกำจัดสีทั้ง 2 ชนิดได้ดีที่สุด

- Shukla R. และคณะ (ปี 2014) (Shukla & Madras, 2014) พบว่ามีการสังเคราะห์โลหะออกไซด์ผสมของอะลูมิเนียมและโคบอลต์แล้วนำไปดูดซับสีย้อมเอสิต (คอนโกเรต, ออเรนจ์จี, อินดีโก้คาร์มิน และเมทิลลีนบลู) จากการศึกษาพบว่าโลหะออกไซด์ผสมนี้มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ดีกว่าตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์

- Wawrzkiwicz M. และคณะ (ปี 2015) (Wawrzkiwicz, WiŚniewska, Gun'ko, & Zarkoc, 2015) พบว่า มีการนำโลหะออกไซด์ผสมของ 4% SiO<sub>2</sub> และ 96% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สามารถนำมาใช้ในการกำจัดสีเอสิตออเรนจ์7, สีรีแอกทีฟแบลค5 และสีเดเรคบลู71 ออกจากน้ำเสียได้ และจากการศึกษา adsorption kinetic พบว่าเป็น pseudo-second order model

• Bendaho D. และคณะ (ปี 2015) (Bendaho, Ainad, & Djillali, 2015) พบว่ามีการนำมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้ในการกำจัดสีย้อมเมทิลออเรน และศึกษา adsorption kinetic พบว่าเป็น Pseudo-second order model และศึกษา adsorption isotherm พบว่าเป็น Langmuir และ Freundlich isotherm models

• U. Pal และคณะ (ปี2016) (Pal et al., 2016) พบว่ามีการนำโลหะออกไซด์ผสมของไทเทเนียม, ซิลิกอน และอะลูมิเนียมมาดูดซับสีเมทิลอินบลู และสีโรดามีน-6จี จากผลการทดลองพบว่าโลหะออกไซด์ผสมที่ประกอบไปด้วยไทเทเนียม ไดออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม ที่ดี



### บทที่ 3

#### เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องวัด pH (pH meter) (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น F20, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น HP-8453
- เครื่องกวนแม่เหล็ก (Stirrer)
- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่งของ Mettler Toledo
- เครื่อง DRS-UV spectrophotometer ของบริษัท Agilent Technologies รุ่น Cary 60

##### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Rainin ขนาด 100-1000  $\mu$ l
- ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Thermo scientific ขนาด 1-5 ml
- Quartz cell ขนาด 5 ml, optical length = 1 cm
- บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 500 ml
- ขวดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 10.00, 50.00, 100.00, 250.00 ml
- กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 50 ml
- ปิเปต (Pipette) ขนาด 25.00 ml
- ลูกยางปิเปต (Pipette blub)
- กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- หลอดทดลอง (Test tube)
- Parafilm
- กระดาษอะลูมิเนียมฟรอยด์
- กระบอกน้ำกลั่น (Wash bottle)
- Magnetic bar
- หลอดหยด (Dropper)
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- นาฬิกาจับเวลา (Clock)
- กรวยกรอง (Funnel)
- กระดาษกรอง (Filter paper)

- กระจกนาฬิกา (Watch glass)
- คีมหนีบ (Forcep)

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	มวลโมเลกุล (g $\text{mol}^{-1}$ )	เกรด
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101.96	Analytical Reagent
Al(OH) <sub>3</sub>	78.00	Analytical Reagent
Montmorillonite	540.46	Analytical Reagent
Methanol	32.04	Analytical Reagent
BaCl <sub>2</sub>	208.23	Analytical Reagent
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106.00	Analytical Reagent
KAlSO <sub>4</sub>	474.38	Analytical Reagent
HCl	38.50	Analytical Reagent
NaOH	40.00	Analytical Reagent

### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

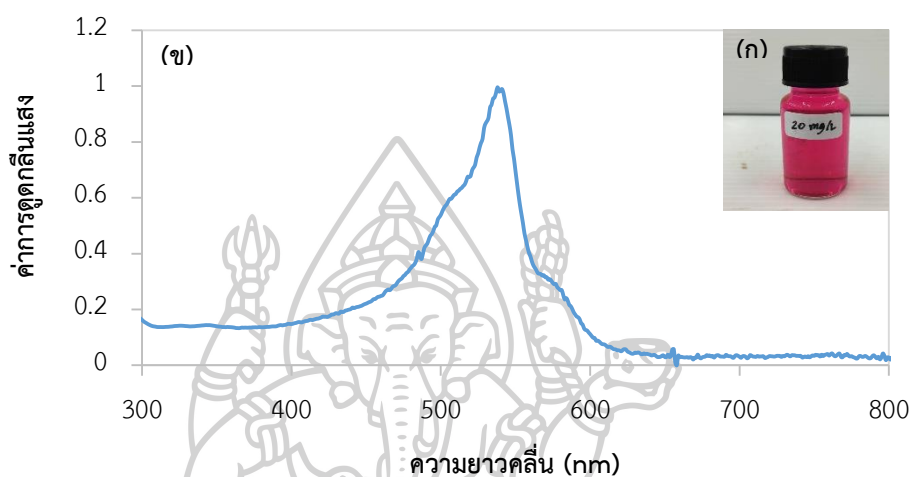
#### 3.4.1 การสกัดสารบราซิลีน (Brazilein)

สารบราซิลีนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเตรียมตามขั้นตอนในวิจัยที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Rondão et al., 2013) โดยเริ่มจากการแช่ไม้ฝางสับหยาบ (ขนาดประมาณไม้จิ้มฟัน) 500 g ในเมทานอลบริสุทธิ์ ปริมาตร 1,800 ml เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นกรองไม้ฝางออกจากสารละลายผ่านผ้าขาวบาง และทำการกรองซ้ำโดยใช้กระดาษกรอง แล้วนำน้ำฝางไประเหยตัวทำละลายออก โดยใช้เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ จนเหลือน้ำฝางปริมาตรประมาณ 150 ml หลังจากนั้นนำน้ำฝางที่ได้ไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 °C เป็นเวลา 4 วัน เพื่อให้บราซิลีนตกผลึก ออกมา จากนั้นกรองตะกอนออกด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเมทานอลบริสุทธิ์เย็น แล้วผึ่งตะกอนให้แห้งจะได้ผงบราซิลีนเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

#### 3.4.2 การเตรียมสารละลายบราซิลีน

สารละลายสต็อก (stock solution) เข้มข้น 300 mg/L เตรียมโดยละลายบราซิลีน จำนวน 0.03 g ในเมทานอลต่อน้ำ (20:80 v/v) ปริมาตร 100 ml และเตรียมสารละลายบราซิลีนที่ความ

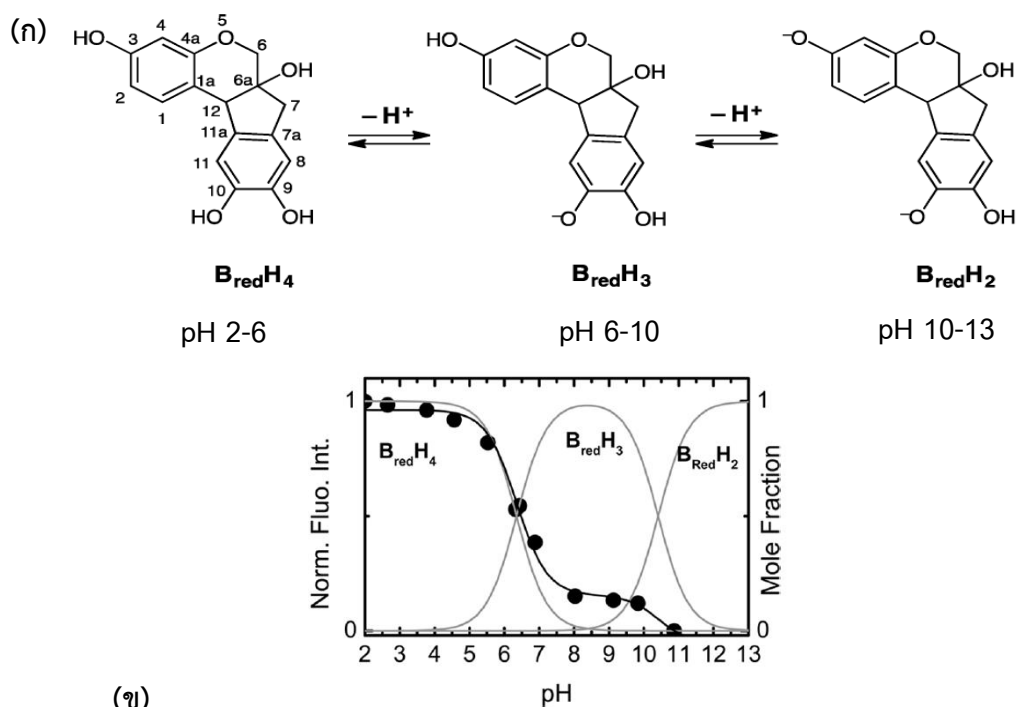
เข้มข้นอื่นๆ โดยวิธีการเจือจางด้วยเมทานอลต่อน้ำ (20:80 v/v) โดยสารละลายบราซิลีน ที่ pH 7 มีสีชมพูดังรูปที่ 11 (ก) และมีตำแหน่งความยาวคลื่นดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{\max}$ ) ที่ 540 nm ดังสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในรูปที่ 11 (ข) นอกจากนี้ โครงสร้างในรูปที่ 12 (ก) และสีของสารละลายบราซิลีนในรูปที่ 12 (ข) สามารถเปลี่ยนตาม pH ของสารละลายบราซิลีน



รูปที่ 11 (ก) สารละลายบราซิลีนความเข้มข้น 20 mg/L ที่ pH 7 และ (ข) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ สารละลายบราซิลีนความเข้มข้น 10 mg/L ที่ pH 7







(ข)



รูปที่ 12 โครงสร้างบราซิลินที่ pH ต่าง ๆ (Rondão et al., 2013) (ก) และสารละลายบราซิลินที่ pH ต่าง ๆ (ข)

### 3.4.3 การหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินจากกราฟมาตรฐาน

- เตรียมสารละลายบราซิลินในสารละลายเมทานอล : น้ำ (20:80) ที่ pH 7 ความเข้มข้น 1, 3, 5, 8 และ 10 mg/L
- นำสารละลายบราซิลินที่เตรียมที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm
- สร้างกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น แล้วหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายบราซิลิน

### 3.4.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลินจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

#### 3.4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์

- เตรียมสารละลายบราซิลินที่มีความเข้มข้น 17.06 mg/L (0.06 mM) ปรับ pH ของสารละลายเป็น 5, 7, 9, 10 และ 12 โดยใช้ 1 M NaOH และ 1 M HCl
- ใส่อะลูมิเนียมออกไซด์ 0.25% w/v ลงในสารละลายบราซิลินที่เตรียมไว้ จากนั้นปั่นกวนสารละลายไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm จากนั้นนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแตนซ์
- คำนวณร้อยละการดูดซับบราซิลิน

#### 3.4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลิน

- เตรียมสารละลายบราซิลิน ที่มีความเข้มข้น 17.06 mg/L (0.06 mM) ที่ pH 7 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมออกไซด์ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2 % w/v ลงในสารละลายบราซิลิน จากนั้นปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm และนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแตนซ์
- คำนวณความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล ( $q_e$ )

### 3.4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสี้อม

- เตรียมสารละลายบราซิลีน pH 5 ที่ความเข้มข้น 8.53, 17.06, 34.11, 68.22 และ 102.34 mg/L (0.03, 0.06, 0.12, 0.24 และ 0.36 mM) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมออกไซด์ 0.25 % w/v ลงในสารละลายบราซิลีน 250 ml ในแต่ละความเข้มข้น จากนั้นปั่นกวนสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยในนาที่ที่ 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 18, 21, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150 และ 180 ให้เปิดสารละลายปริมาตร 200  $\mu$ l เติมลงในหลอดทดลองที่มีน้ำอยู่ 2.8 ml นำไปเหวี่ยงด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลาหนึ่งนาที่ จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน แล้วนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคฟิสิกส์ฟลักเตนซ์
- คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลีนที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และหาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลีนที่สมดุล ( $q_e$ ) ของการดูดซับที่ใช้สารละลายบราซิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

### 3.4.4.4 การศึกษา Adsorption kinetics

- นำค่า  $q_t$  ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอน 3.4.4.3 มาแทนค่าลงใน Pseudo-first order model และ Pseudo-second order model
- เปรียบเทียบค่า  $R^2$  และค่าอื่น ๆ ที่ได้จากการเส้นตรงของ Pseudo-first order model และ Pseudo-second order model

### 3.4.4.5 การศึกษา Adsorption isotherm

- นำค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอน 3.4.4.3 มาแทนค่าลงสมการของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm
- เปรียบเทียบค่า  $R^2$  และค่าอื่น ๆ ที่ได้จากการเส้นตรงของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

### 3.4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลินจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับ

#### 3.4.5.1 การศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

- เตรียมสารละลายบราซิลินที่มีความเข้มข้น 20 mg/L ปรับ pH ของสารละลายเป็น 5, 6, 7, 8 และ 9 โดยใช้ 1 M NaOH และ 1 M HCl
- ใส่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.25% w/v ลงในสารละลายบราซิลินที่เตรียมไว้ จากนั้นปั่นกวนสารละลายไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm จากนั้นนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณร้อยละการดูดซับบราซิลิน

#### 3.4.5.2 การศึกษาอิทธิพลของ pH ของสารละลายที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

- เตรียมสารละลายบราซิลินที่มีความเข้มข้น 20 mg/L
- เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 20 mM tris-HCl ลงในสารละลายบราซิลิน
- ปรับ pH ของสารละลายบราซิลิน เป็น 5, 6, 7, 8 และ 9 ด้วย 1 M NaOH และ 1 M HCl แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- ใส่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.25% w/v ลงในสารละลายบราซิลินที่เตรียมไว้ แล้วปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนที่แสงในช่วง 300-800 nm จากนั้นนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณร้อยละการดูดซับบราซิลิน

### 3.4.5.3 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลิน (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

- เตรียมสารละลายบราซิลิน ที่มีความเข้มข้น 20 mg/L ที่ pH 7 จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.1 0.25 0.5 1 และ 2 % w/v ลงในสารละลายบราซิลิน จากนั้นปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm และนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล ( $q_e$ )

### 3.4.5.4 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลิน (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

- เตรียมสารละลายบราซิลิน ที่มีความเข้มข้น 20 mg/L ที่ pH 7
- เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 20 mM tris-HCl pH 7 ลงในสารละลายบราซิลิน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.1 0.25 0.5 1 และ 2 % w/v ลงในสารละลายบราซิลิน จากนั้นปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน
- นำสารละลายบราซิลินหลังกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm นำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล ( $q_e$ )

### 3.4.5.5 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีข้อม (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

- เตรียมสารละลายบราซิลิน pH 7 ที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.25% w/v ลงในสารละลายบราซิลิน 250 ml ในแต่ละความเข้มข้น จากนั้นปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยในนาที่ที่ 1, 3, 5, 10, 15,

20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 และ 240 ให้เปิดสารละลาย ปริมาตร 500  $\mu\text{l}$  เติมลงในหลอดทดลองที่มีน้ำอยู่ 3.5 ml แล้วนำไปเหวี่ยงด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลาหนึ่งนาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm

- กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน แล้วนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และหาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล ( $q_e$ ) ของการดูดซับที่ใช้สารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

#### 3.4.5.6 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสียอม (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

- เตรียมสารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L จากนั้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์ 20 mM tris-HCl pH 7 ลงในสารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เติมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.25% w/v ลงในสารละลายบราซิลิน 250 ml ในแต่ละความเข้มข้น จากนั้นปั่นกวนสารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยในนาที่ที่ 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 210 และ 240 ให้เปิดสารละลาย ปริมาตร 500  $\mu\text{l}$  เติมลงในหลอดทดลองที่มีน้ำอยู่ 3.5 ml แล้วนำไปเหวี่ยงด้วยความเร็ว 500 rpm เป็นเวลาหนึ่งนาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm
- เมื่อทำการปั่นกวนสารละลายครบ 4 ชั่วโมง ให้กรองตะกอนผงสีที่ได้ด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน แล้วนำผงสีไปอบที่อุณหภูมิ 70-80  $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำผงสีไปวิเคราะห์ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีเฟลกแดนซ์
- คำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่เวลาใดๆ ( $q_t$ ) และหาค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุล ( $q_e$ ) ของการดูดซับที่ใช้สารละลายบราซิลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

### 3.4.5.7 การศึกษา Adsorption kinetics

- นำค่า  $q_t$  ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอน 5.1.7 มาแทนค่าลงใน Pseudo-first order model Pseudo-second order model และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน
- เปรียบเทียบค่า  $R^2$  และค่าอื่น ๆ ที่ได้จากสมการเส้นตรงของ Pseudo-first order model Pseudo-second order model และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน

### 3.4.5.8 การศึกษา Adsorption isotherm

- นำค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอน 5.1.7 มาแทนค่าลงในสมการของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm
- เปรียบเทียบค่า  $R^2$  และค่าอื่น ๆ ที่ได้จากสมการเส้นตรงของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

### 3.4.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลีนจากฝางโดยใช้มอนต์มอริลไลต์เป็นตัวดูดซับ

- ทำการทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 3.4.5.1-3.4.5.8 แต่มีการเปลี่ยนชนิดตัวดูดซับเป็นมอนต์มอริลไลต์



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลินจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับ

##### 4.1.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินของอะลูมิเนียมออกไซด์

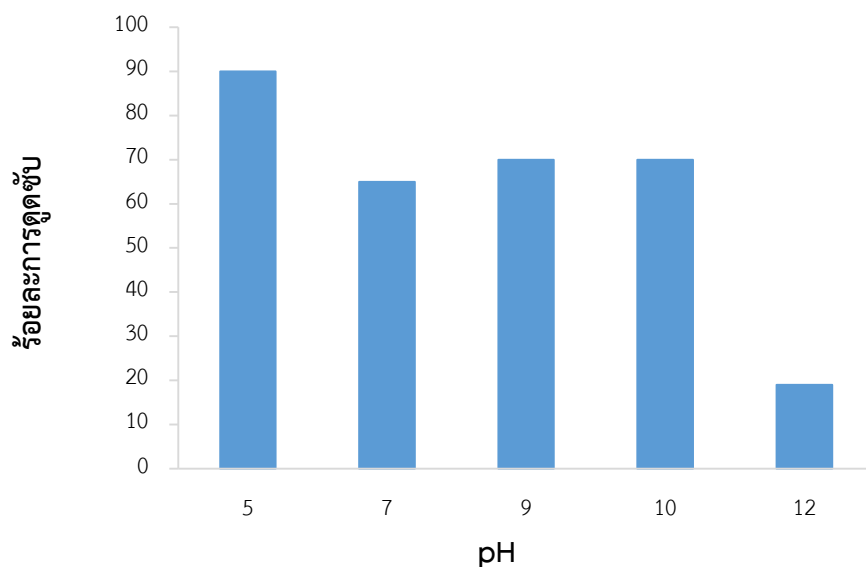
จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า pH 5 จึงเหมาะสมสำหรับการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยที่ pH 5 ร้อยละการดูดซับที่ได้จะมีค่าสูงที่สุดที่ 90 % และลดลงเป็น 65-70 % เมื่อ pH เพิ่มขึ้นเป็น 7-10 และร้อยละการดูดซับจะลดลงเหลือแค่ 20 % ที่ pH 12 เนื่องมาจากในการเติมอะลูมิเนียมออกไซด์ลงในสารละลายบราซิลินในสภาวะกรดมี pH สูงขึ้น จาก pH 5 ไปที่ pH ประมาณ 7 จึงทำให้บราซิลินมีประจุลบ ในขณะที่เดียวกันที่สภาวะดังกล่าว ผิวนอกของอะลูมิเนียมออกไซด์จะมีประจุบวก ( $pH_{pzc} = 8.0$ ) ทำให้สามารถจับกับบราซิลินได้ดี ร้อยละการดูดซับจึงมีค่าสูง นอกจากนี้ที่สารละลายบราซิลินเป็นเบสมากขึ้น ผิวนอกของอะลูมิเนียมออกไซด์จะเป็นลบ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นน้อยลง จากตารางที่ 5 และรูปที่ 14 ซึ่งแสดงรูปของผงสี ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่ได้ พบว่า ผงสีที่ได้จะมีสีชมพูอมม่วง และ pH ของสารละลายบราซิลินมีผลต่อความเข้มของสีของผงสีที่ได้ โดยเมื่อค่า pH สูงขึ้น ผงสีที่ได้มีสีชมพูที่อ่อนลง และค่า  $a^*$  (เป็นค่าที่แสดงแกนสีแดง) จะมีค่าน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่มีค่าลดลง

ตารางที่ 5 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ

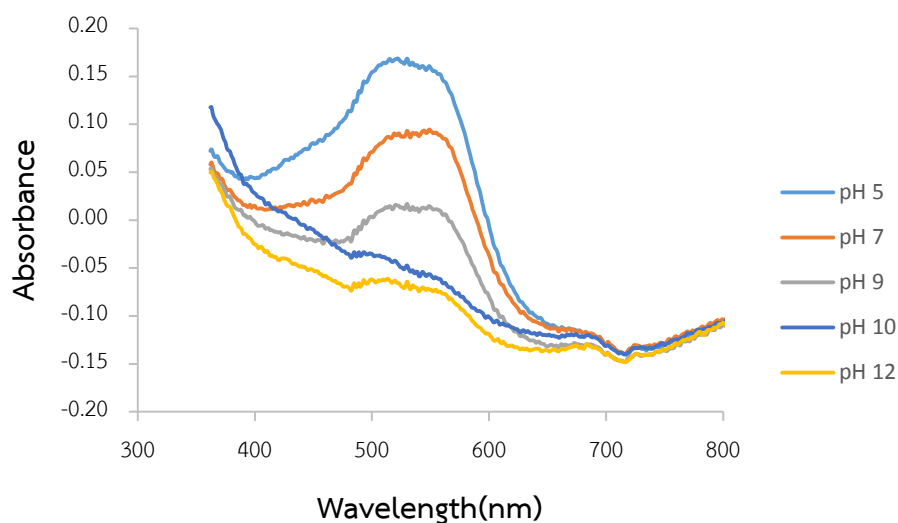


pH	5	7	9	10	12
$L^*$	86.62	96.53	102.05	106.98	107.31
$a^*$	27.84	18.72	13.04	5.08	3.88
$b^*$	-4.12	-2.07	0.87	5.10	8.56





รูปที่ 13 ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิไลน์ที่มีต่อการดูดซับบราซิไลน์ด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์

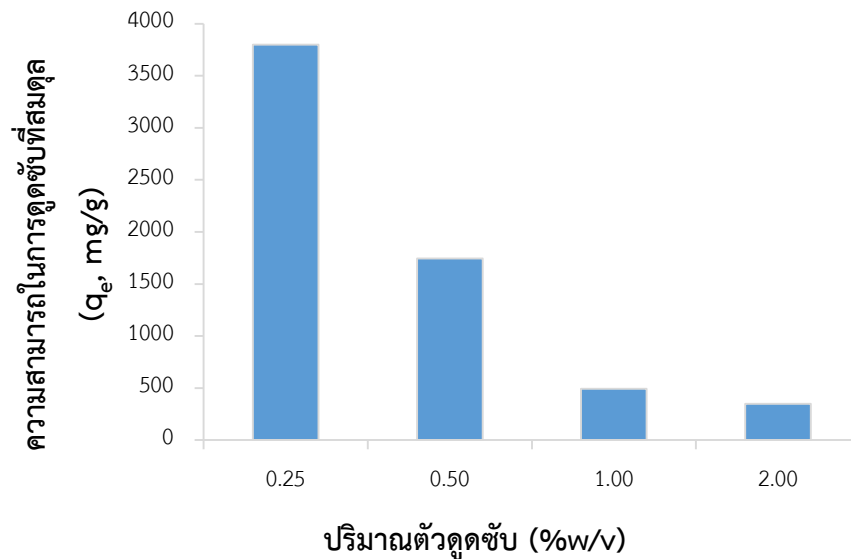


รูปที่ 14 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิไลน์ที่มีค่า pH ต่าง ๆ

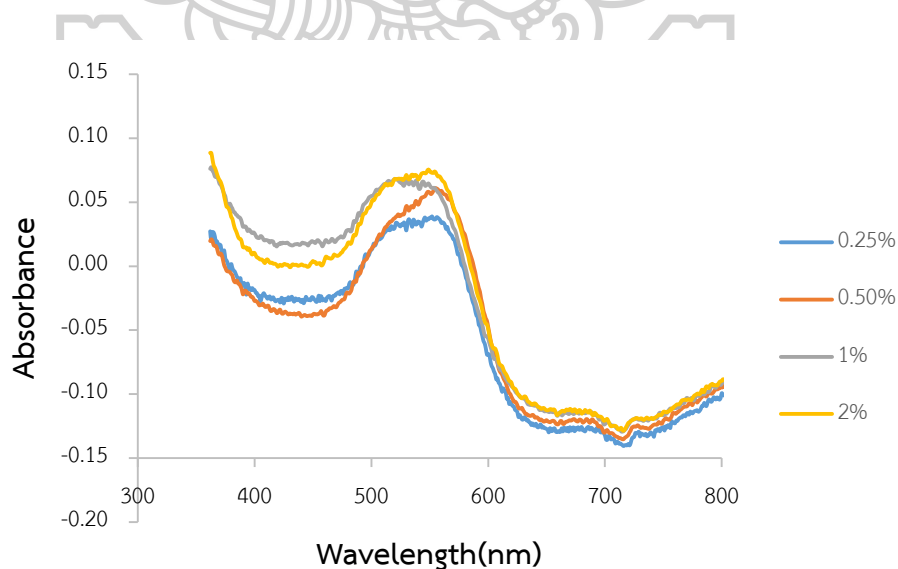
#### 4.1.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิไลน์

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่แสดงในรูปที่ 15 พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ 0.25 % w/v ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะมีค่าเท่ากับ 3798 mg/g และค่าความสามารถในการดูด

ซับที่สมดุลจะลดลงเป็น 349 mg/g เมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ 2 % w/v นอกจากนี้ จากรูปของผงสีและค่า CIELAB ของผงสีที่ได้ที่แสดงในตารางที่ 6 พบว่า ปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้มีผลต่อความเข้มของสีของผงสีที่โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้เพิ่มขึ้น สีชมพูอมม่วงของผงสีที่จะได้อ่อนลง และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีลดลง ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 16 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 6 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน



% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (w/v)	0.25	0.5	1	2
L*	98.57	97.98	100.65	99.16
a*	16.41	17.40	15.86	16.62
b*	0.94	-2.23	-2.07	-6.15

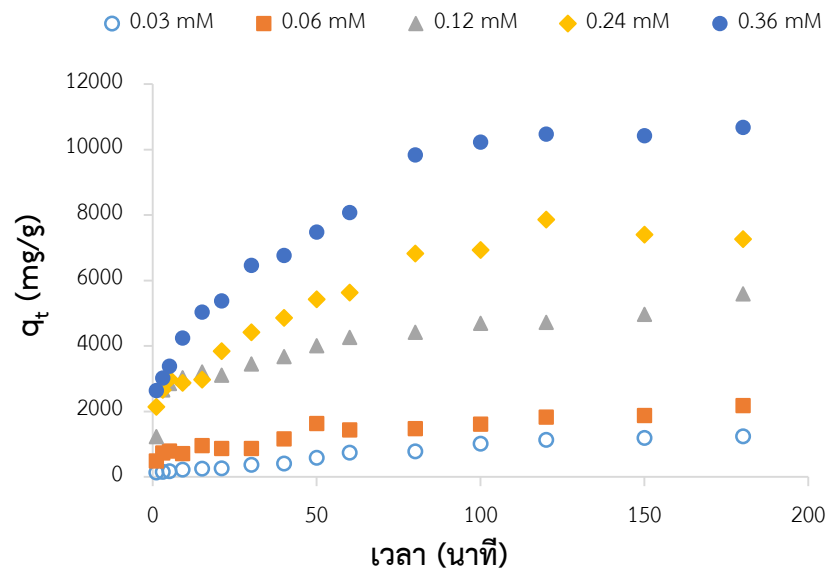
#### 4.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ

จากรูปที่ 17 ซึ่งแสดงผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลิน พบว่าในช่วง 80 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับบราซิลินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 120 นาที โดยความสามารถในการดูดซับที่สมดุลมีค่าเท่ากับ 592, 1636, 4016, 5427 และ 7484 mg/g สำหรับที่ความเข้มข้น 8.53, 17.06, 34.11, 68.22 และ 102.34 mg/L (0.03, 0.06, 0.12, 0.24 และ 0.36 mM) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย บราซิลินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลินเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ จากรูปของผงสีและค่า CIELAB ของผงสีที่แสดงในตารางที่ 7 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเพิ่มขึ้นสีของผงสีที่ได้จะเข้มขึ้น (ค่า a\* สูงขึ้น) และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 19

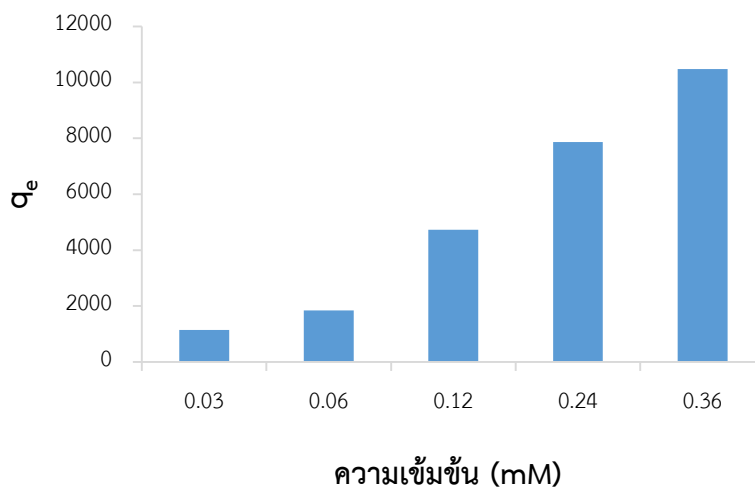
ตารางที่ 7 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน



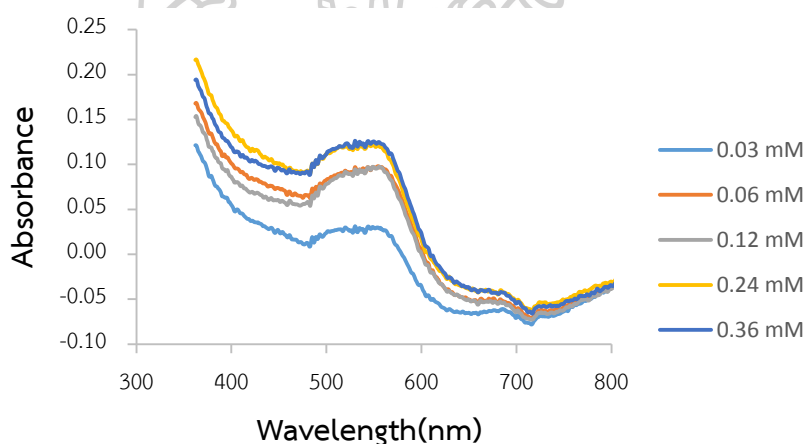
ความเข้มข้น (mM)	0.03	0.06	0.12	0.24	0.36
L*	99.53	94.70	94.96	93.03	92.68
a*	7.52	11.43	12.03	12.48	12.84
b*	2.84	1.87	0.59	3.05	1.69



รูปที่ 17 ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับบราซิลีนด้วย อะลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 18 ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซึลีน ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 120 นาที

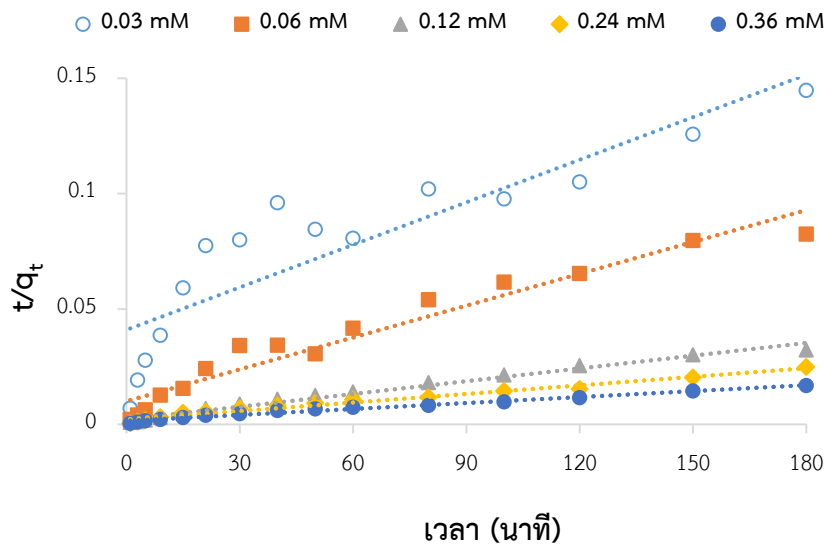
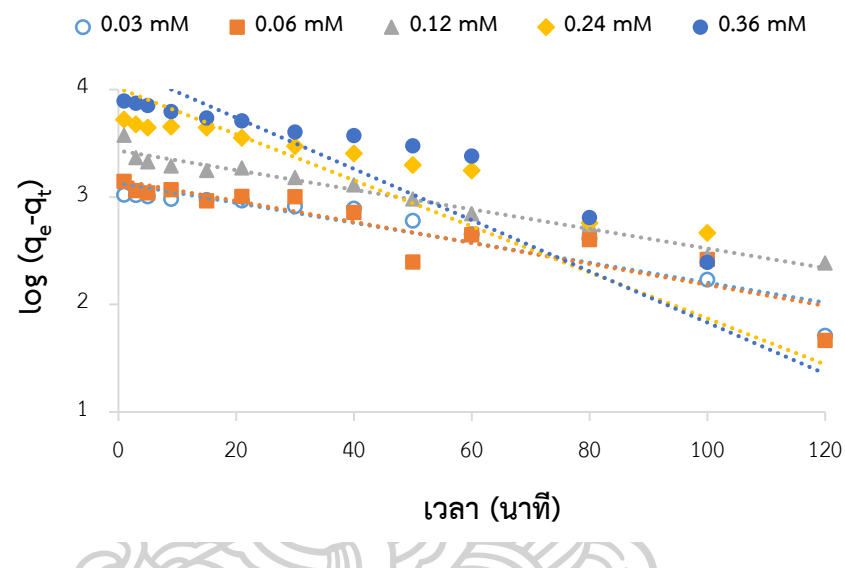


รูปที่ 19 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซึลีนที่แตกต่างกัน

#### 4.1.4 ผลการศึกษา Adsorption kinetics ของการดูดซับบราซึลีนด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์

จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้สมการปฏิกิริยา Pseudo-first order model และ ปฏิกิริยา Pseudo-second order model ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 20 และค่าตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 8 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ของปฏิกิริยา

Pseudo-second order model มีค่าเท่ากับ 0.936 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของปฏิกิริยา Pseudo-first order model ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8283 นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-second order model มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-first order model



**รูปที่ 20** ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) ของการดูดซับบราซิลินบนอะลูมิเนียมออกไซด์

ตารางที่ 8 ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model และปฏิกิริยา Pseudo-second order model

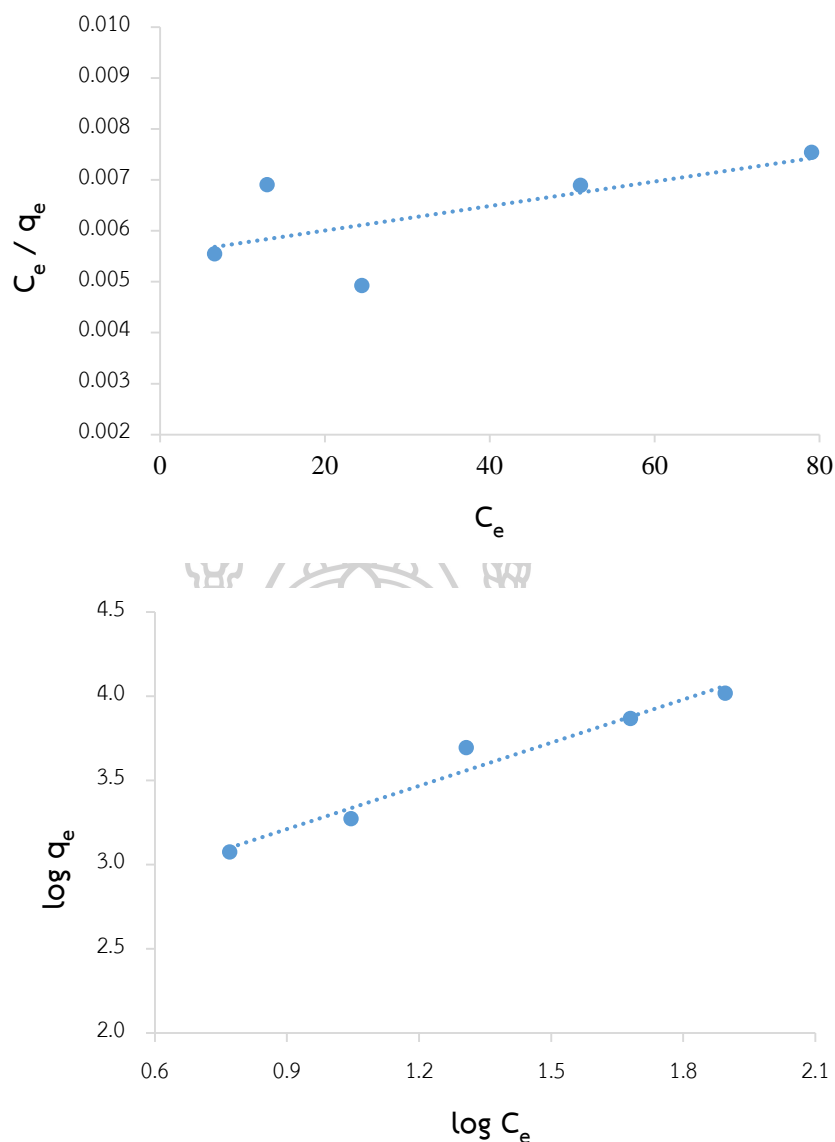
ความเข้มข้น (mM)	$q_e$ (exp)	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic		
		$R^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_2$ ( $\text{mg/g min}$ )	$q_e$ (cal)
0.03	1142	0.8804	$2.14 \times 10^{-2}$	1353	0.7881	$9.21 \times 10^{-6}$	1629
0.06	1837	0.8387	$2.23 \times 10^{-2}$	1441	0.9466	$2.10 \times 10^{-5}$	2174
0.12	4729	0.9688	$2.09 \times 10^{-2}$	2703	0.9833	$1.57 \times 10^{-5}$	5435
0.24	7863	0.6975	$4.92 \times 10^{-2}$	10320	0.9783	$7.40 \times 10^{-6}$	8065
0.36	10479	0.7560	$5.48 \times 10^{-2}$	16421	0.9837	$4.93 \times 10^{-6}$	11628

#### 4.1.5 ผลการศึกษา Adsorption isotherm ของการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 21 และตารางที่ 9 พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์คือแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากไอโซเทอมนี้นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่เป็นแบบหลายชั้น

ตารางที่ 9 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$R^2 = 0.4451$	$R^2 = 0.9609$
$K_L = 0.0036$	$K_F = 276.8471$
$Q_{\text{max}} = 50000$	$n = 1.1691$



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

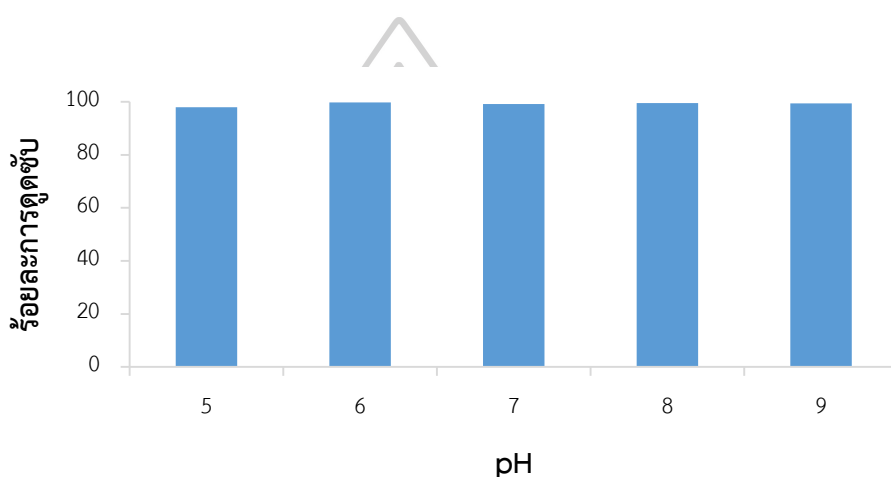
#### 4.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลินจากฝางโดยใช้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับ

##### 4.2.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

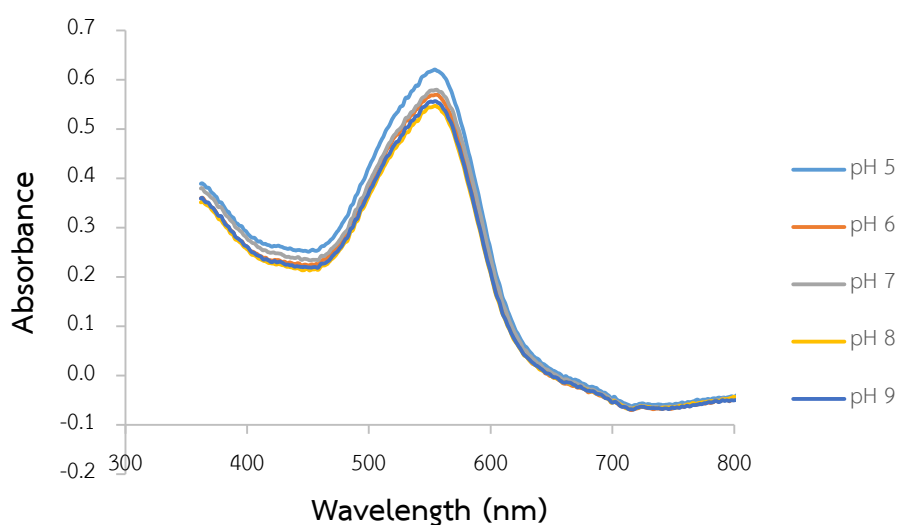
จากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่า ในช่วง pH 5-9 ร้อยละการดูดซับที่ได้จะมีค่าสูง โดยมีค่ามากกว่า 95 % pH ของสารละลายบราซิลินในช่วงนี้ไม่มีผลต่อสีของผงสีที่ได้ เนื่องจากเมื่อมีการเติม



อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายบราซิลินจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายบราซิลินจากที่ pH 5-9 ไปเป็น pH ประมาณ 7 (จากตารางที่ 11) อาจจะเป็นเนื่องจากสมบัติ amphoteric (สารที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส) ของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยที่ pH 7 โครงสร้างของบราซิลินมีประจุเป็นลบ ทำให้สารละลายมีสีชมพูอมม่วง ส่วนผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีประจุเป็นบวก ( $\text{pH}_{\text{pzc}} = 7.6$ ) ทำให้สามารถจับกับบราซิลินได้ดี ความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นเท่าๆกัน ผงสีที่ได้มีสีชมพู มีค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีจากตารางที่ 10 และรูปที่ 23 เท่า ๆ กัน



รูปที่ 22 ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 23 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ

ตารางที่ 10 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ



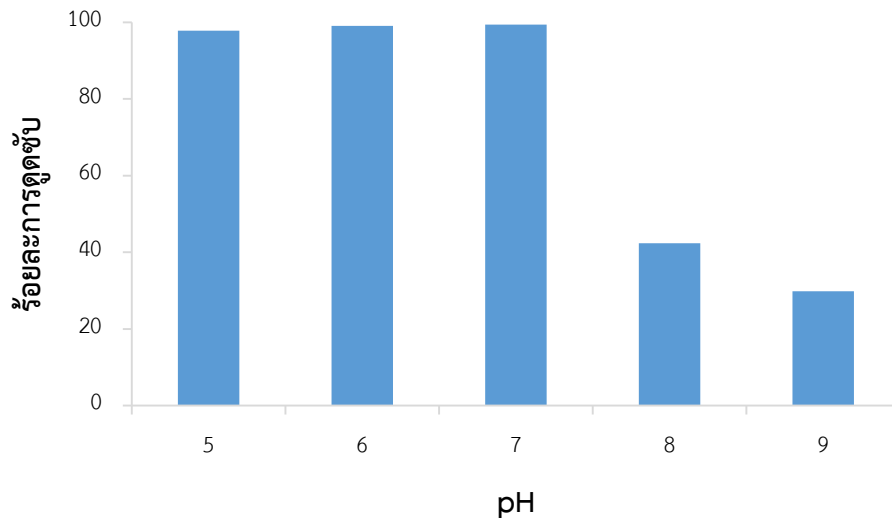
pH	5	6	7	8	9
L*	68.59	71.08	70.30	72.14	71.75
a*	42.19	40.90	40.13	39.43	39.95
b*	-15.69	-15.11	-15.17	-14.66	-14.74

ตารางที่ 11 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

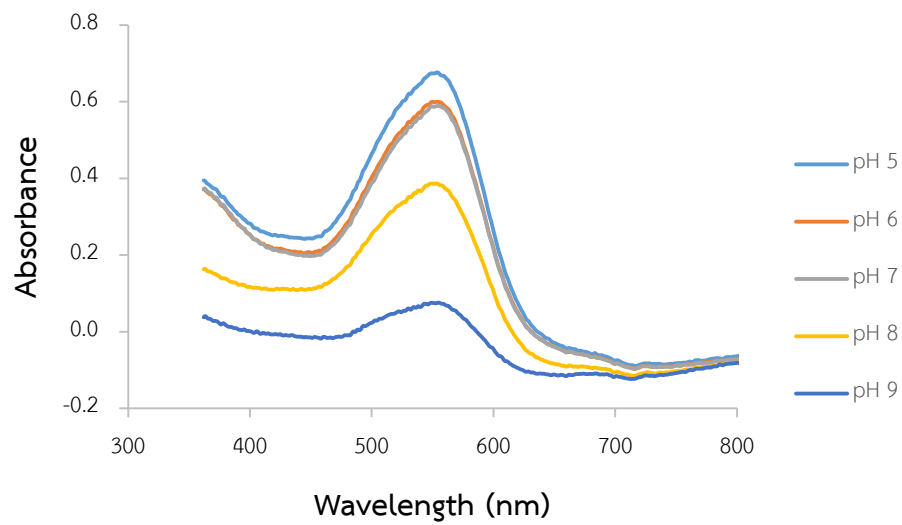
pH	pH เริ่มต้น	pH 30 นาที	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
5	5.67	7.27	7.45	7.40
6	6.71	7.64	7.76	7.54
7(ปกติ)	7.78	7.86	7.92	7.32
8	8.37	7.90	7.91	7.47
9	9.17	7.93	7.89	7.5

#### 4.2.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH ของสารละลายที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

จากรูปที่ 24 จะเห็นได้ว่า ที่ pH 5-7 ร้อยละการดูดซับที่ได้จะมีค่าสูง โดยมีค่ามากกว่า 95 % และร้อยละการดูดซับจะมีลดลงเป็น 40% และ 30% ที่ pH 8 และ 9 ตามลำดับ ในช่วง pH 5-9 โครงสร้างของ บราซิลีนจะมีประจุเป็นลบ จึงจับกับผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $pH_{pzc} = 7.6$ ) มีประจุเป็นบวกที่ pH 5-7 ได้ดี ในทางตรงกันข้ามผิวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 8-9 มีประจุลบ จึงทำให้ยึดจับกับบราซิลีนได้ไม่ดีจากตารางที่ 12 และรูปที่ 25 ซึ่งแสดง รูปของผงสีค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่ได้ พบว่า pH ของสารละลายบราซิลีนมีผลต่อสีของผงสีที่ได้ โดยที่ pH 5-7 ผงสีที่ได้มีสีชมพูอมแดง ในขณะที่ pH 8 และ 9 ผงสีที่ได้จะมีสีชมพูอมม่วงและชมพูอมม่วงอ่อนตามลำดับ ดังนั้น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับบราซิลีนลงบนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ควรจะอยู่ในช่วง 5-7



รูปที่ 24 ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 25 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ

ตารางที่ 12 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ



pH	5	6	7	8	9
L*	67.19	70.57	71.09	80.77	98.39
a*	49.26	46.37	45.60	37.87	16.63
b*	-18.29	-17.54	-17.76	-13.75	-4.22

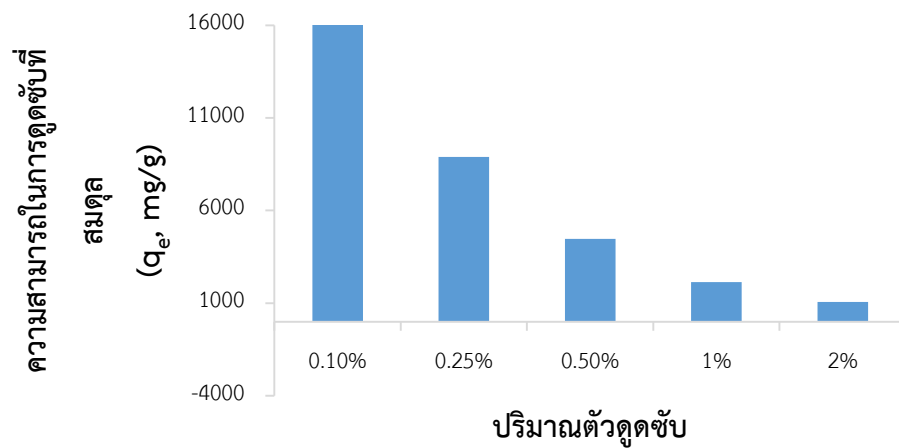
#### 4.2.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลีน (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่แสดงในรูปที่ 26 พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.1 % w/v ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะมีค่าเท่ากับ 20265 mg/g และค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะลดลงเป็น 1074 mg/g เมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 2 % w/v นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่ได้ที่แสดงในตารางที่ 13 และรูปที่ 27 พบว่า ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความเข้มของสีของผงสี โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพิ่มขึ้น สีชมพูอมม่วงของผงสีจะอ่อนลง ค่า a\* น้อยลง และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีก็ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจากตารางที่ 14 แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายบราซิลีนพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย

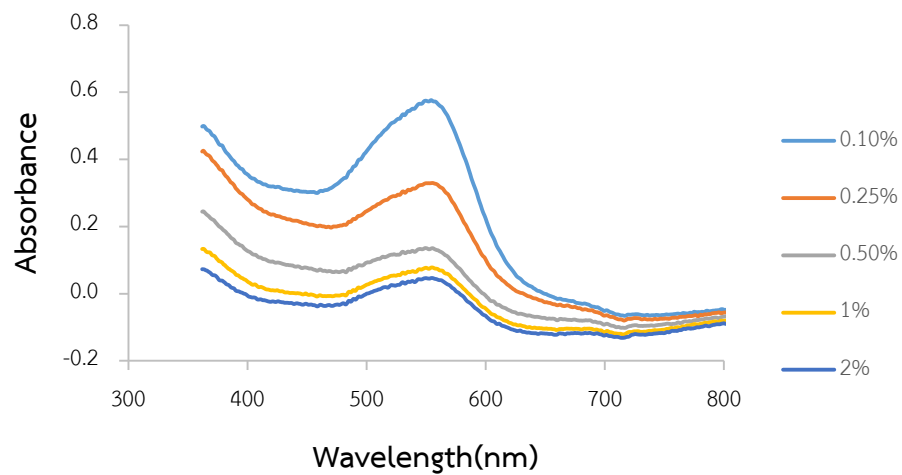
ตารางที่ 13 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน



% อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (w/v)	0.1	0.25	0.5	1	2
L*	70.19	81.92	93.67	98.16	100.48
a*	39.20	25.23	16.36	15.48	14.84
b*	-7.65	-0.74	0.77	-2.89	-3.51



รูปที่ 26 ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซีลีนด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

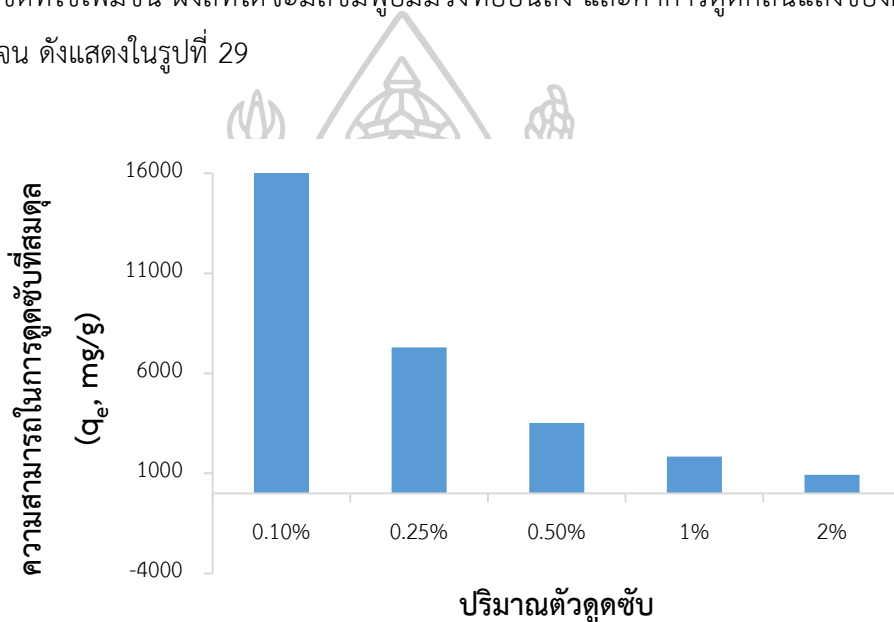


รูปที่ 27 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ตารางที่ 14 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

% อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (w/v)	pH เริ่มต้น	pH 30 นาที	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
0.1	7.38	7.68	7.81	7.72
0.25	7.35	7.64	7.71	7.38
0.5	7.35	7.74	7.93	7.37
1	7.45	7.79	7.87	7.37
2	7.45	7.88	7.97	7.43

#### 4.2.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลีน (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่แสดงในรูปที่ 28 พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 0.1 % w/v ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะมีค่าเท่ากับ 17689 mg/g และค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะลดลงเป็น 916 mg/g เมื่อใช้ปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ 2 % w/v นอกจากนี้จากรูปของผงสีและค่า CIELAB ของผงสีที่ได้ที่แสดงในตารางที่ 15 เมื่อเปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เพิ่มขึ้น ผงสีที่ได้จะมีสีชมพูอมม่วงที่อ่อนลง และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 29

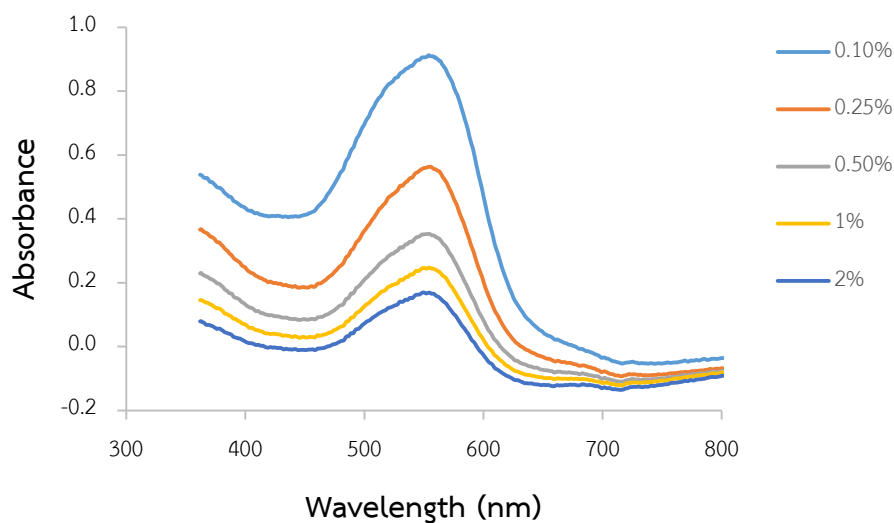


รูปที่ 28 ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 15 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน



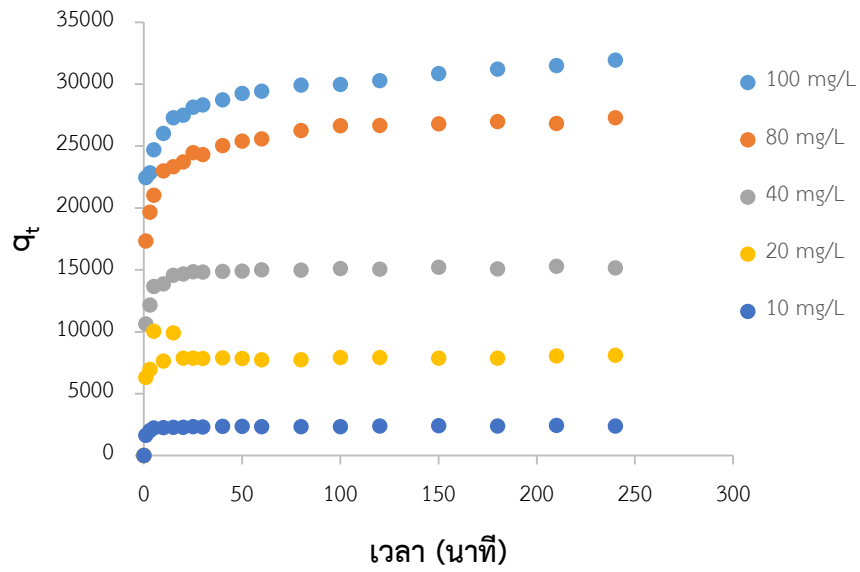
% อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (w/v)	0.1	0.25	0.5	1	2
L*	55.71	72.19	82.78	88.94	93.80
a*	52.40	43.49	34.68	29.48	26.17
b*	-17.51	-17.61	-14.21	-12.24	-10.23



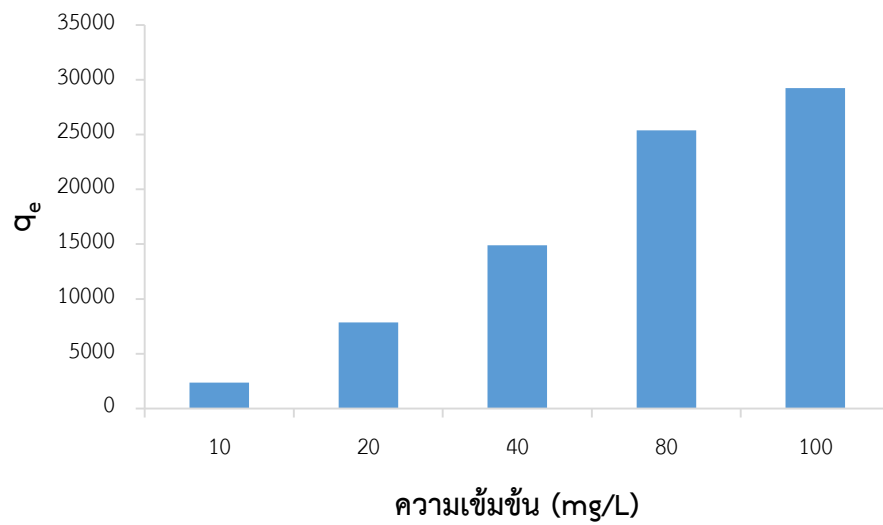
รูปที่ 29 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

#### 4.2.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

รูปที่ 30 แสดงผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลิน พบว่าในช่วง 20 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับบราซิลินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 50 นาที โดยความสามารถในการดูดซับที่สมดุลมีค่าเท่ากับ 2358, 7840, 14892, 25391 และ 29262 mg/g สำหรับที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลินเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่แสดงในตารางที่ 16 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเพิ่มขึ้น สีของผงสีที่ได้จะเข้มขึ้นด้วยและค่าการดูดกลืนแสงของผงสีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 30 ผลของอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซีลีนที่มีต่อการดูดซับบราซีลีนด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



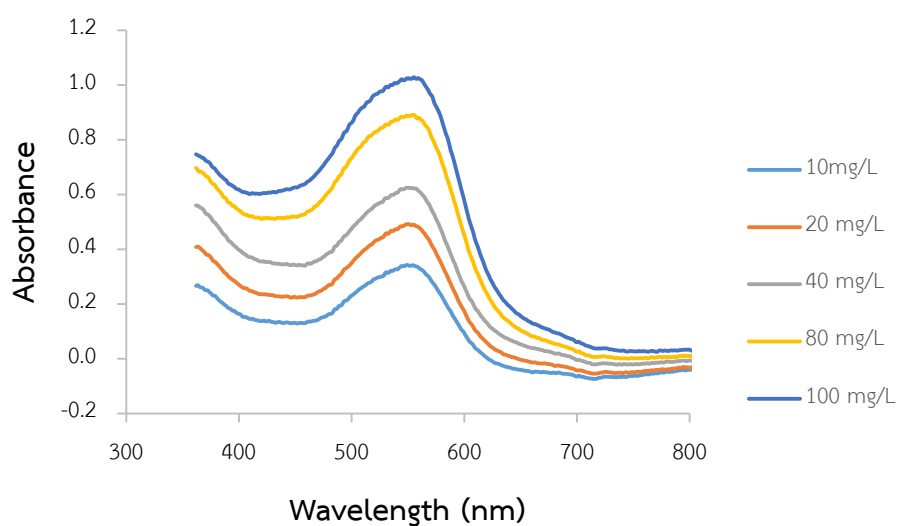
รูปที่ 31 ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซีลีน ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 50 นาที



ตารางที่ 16 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน



ความเข้มข้น (mg/L)	10	20	40	80	100
L*	82.20	74.36	67.12	55.15	49.15
a*	30.69	36.46	38.25	45.84	46.48
b*	-9.51	-9.97	-8.04	-8.45	-8.43

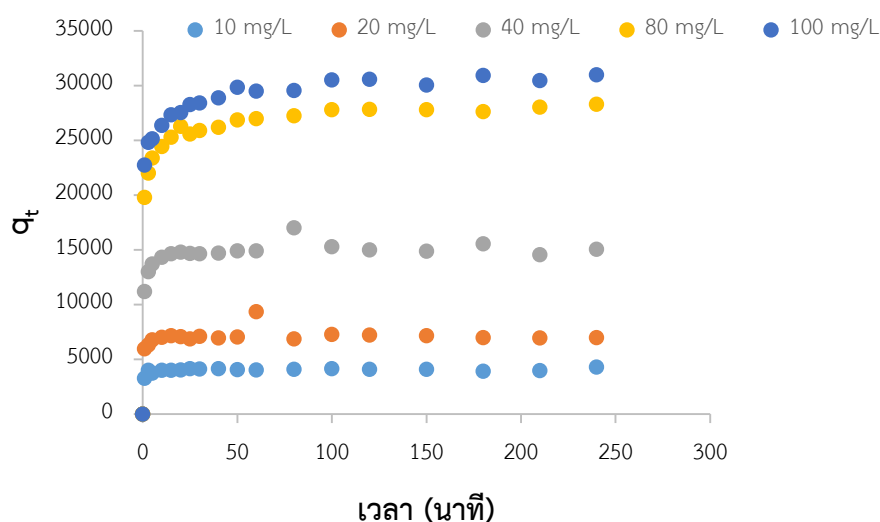


รูปที่ 32 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน  
ตารางที่ 17 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

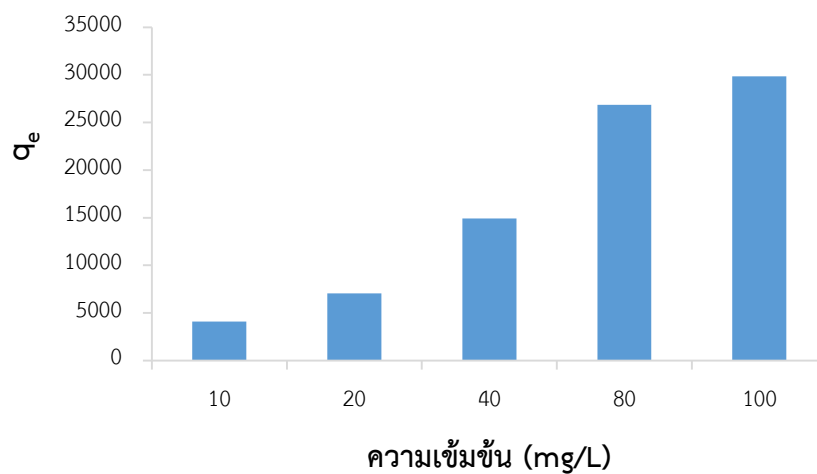
ความเข้มข้น (mg/L)	pH เริ่มต้น	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
10	7.30	7.63	7.47
20	7.40	7.83	7.64
40	7.25	7.74	7.67
80	7.10	7.63	7.36
100	7.13	7.86	7.69

#### 4.2.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

รูปที่ 33 แสดงผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลิน พบว่าในช่วง 20 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับบราซิลินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 50 นาที โดยความสามารถในการดูดซับที่สมดุลมีค่าเท่ากับ 4076, 7051, 14903, 26857 และ 29840 mg/g สำหรับที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลินเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่แสดงในตารางที่ 18 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเพิ่มขึ้น สีของผงสีที่ได้จะเข้มขึ้นด้วยและค่าการดูดกลืนแสงของผงสีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 35



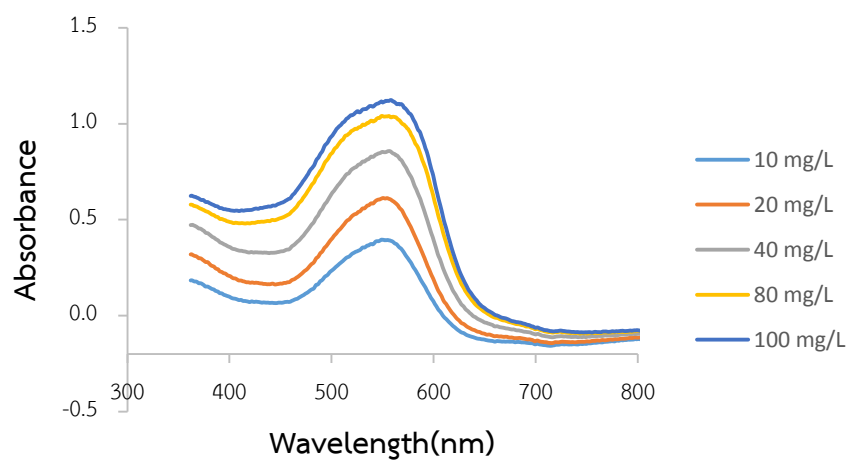
รูปที่ 33 ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 34 ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลา 50 นาที

ตารางที่ 18 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้น (mg/L)	10	20	40	80	100
L*	82.02	71.76	59.68	50.50	47.06
a*	43.27	52.92	57.20	56.64	56.38
b*	-17.24	-20.04	-19.33	-16.17	-14.47



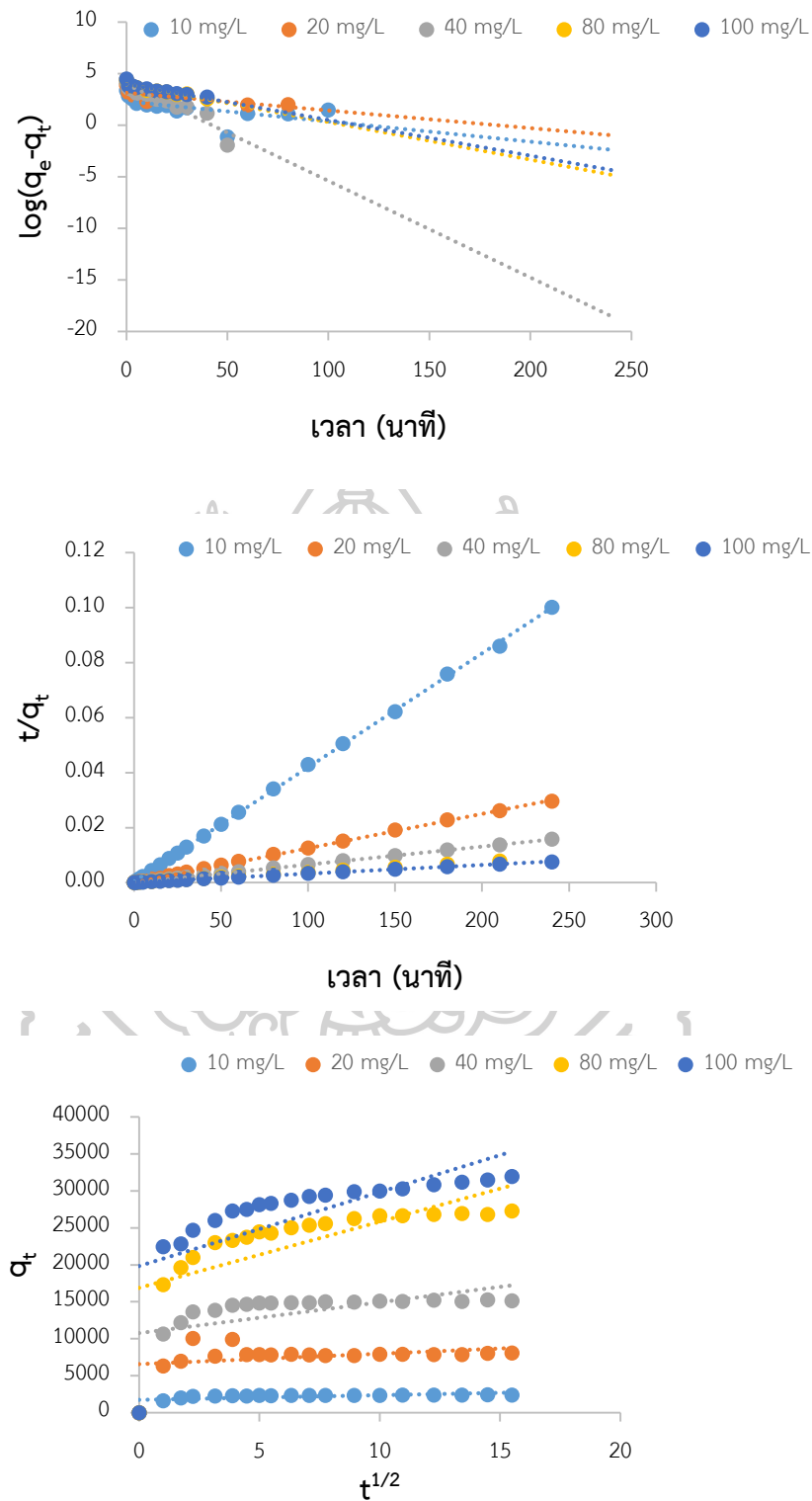
รูปที่ 35 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน

#### 4.2.7 ผลการศึกษา Adsorption kinetics ของการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

จากการศึกษา Adsorption kinetics โดยใช้สมการปฏิกิริยา Pseudo-first order, ปฏิกิริยา Pseudo-second order และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 36 และค่าตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 19 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่รูพรุน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ของปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าเท่ากับ 0.9996 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและการแพร่เข้าสู่รูพรุน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7149 และ 0.3241 นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลินที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-first order

**ตารางที่ 19** ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน

ความเข้มข้น (mg/L)	$q_e$ (exp)	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic			การแพร่เข้าสู่รูพรุน	
		$R^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_2$ (mg/g min)	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_p$ (g/mg .min <sup>1/2</sup> )
10	2358	0.3388	0.04491	202	0.9997	$4.50 \times 10^{-4}$	2500	0.2957	63.977
20	7840	0.6217	0.03961	1423	0.9996	$1.62 \times 10^{-3}$	10000	0.1115	142.09
40	14892	0.8849	0.21556	9181	0.9999	$9.02 \times 10^{-5}$	14286	0.3118	417.06
80	25391	0.8746	0.08406	9135	0.9997	$1.72 \times 10^{-5}$	25000	0.4584	895.11
100	29262	0.8547	0.07968	9397	0.9993	$1.30 \times 10^{-5}$	33333	0.4433	997.73



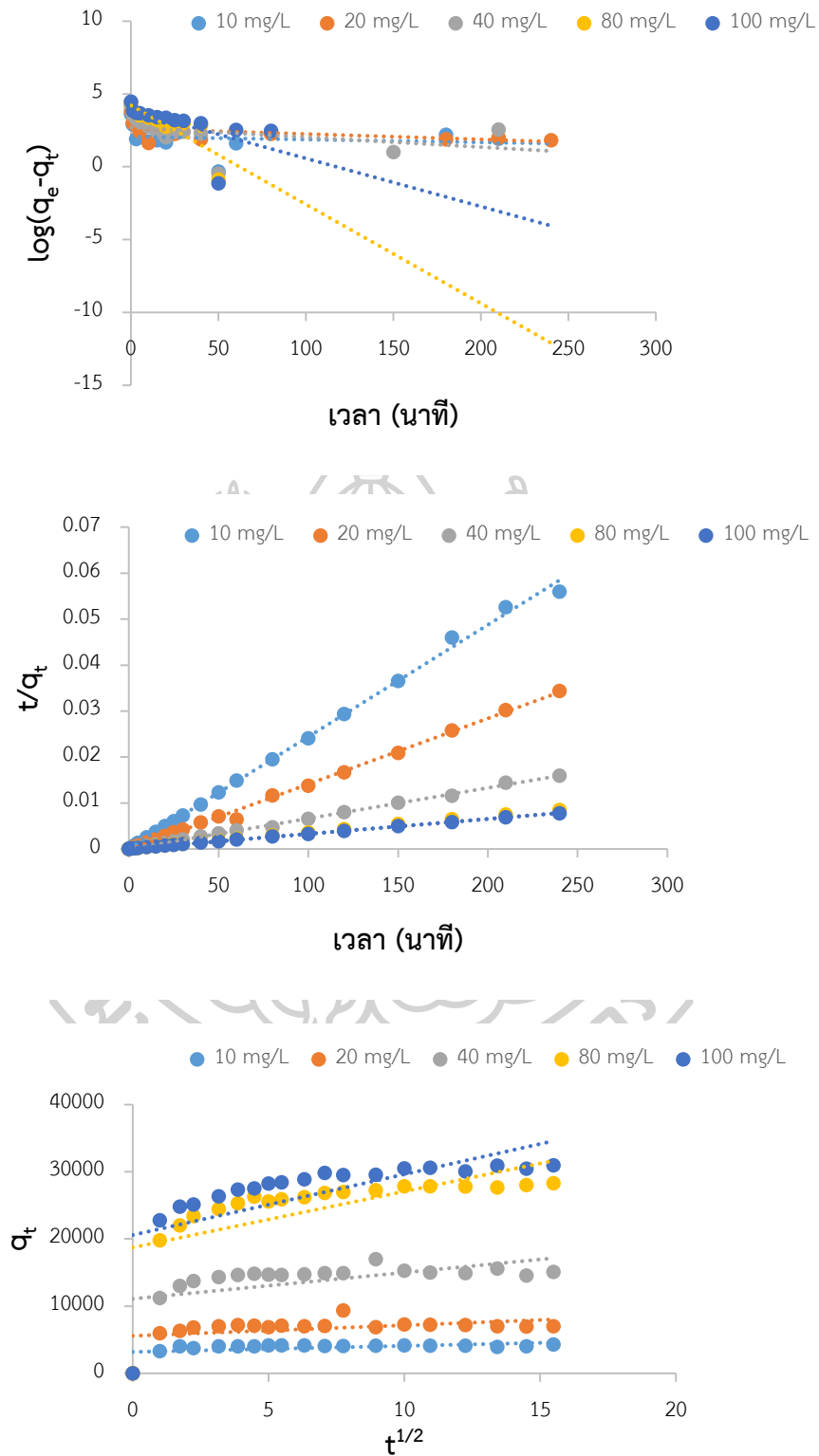
**รูปที่ 36** ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิโนโนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

#### 4.2.8 ผลการศึกษา Adsorption kinetics ของการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากการศึกษา Adsorption kinetics โดยใช้สมการปฏิกิริยา Pseudo-first order, ปฏิกิริยา Pseudo-second order และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 37 และค่าตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 20 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่รูพรุน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ของปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าเท่ากับ 0.9986 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและการแพร่เข้าสู่รูพรุน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4853 และ 0.2837 นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลีนที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-first order

**ตารางที่ 20** ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน

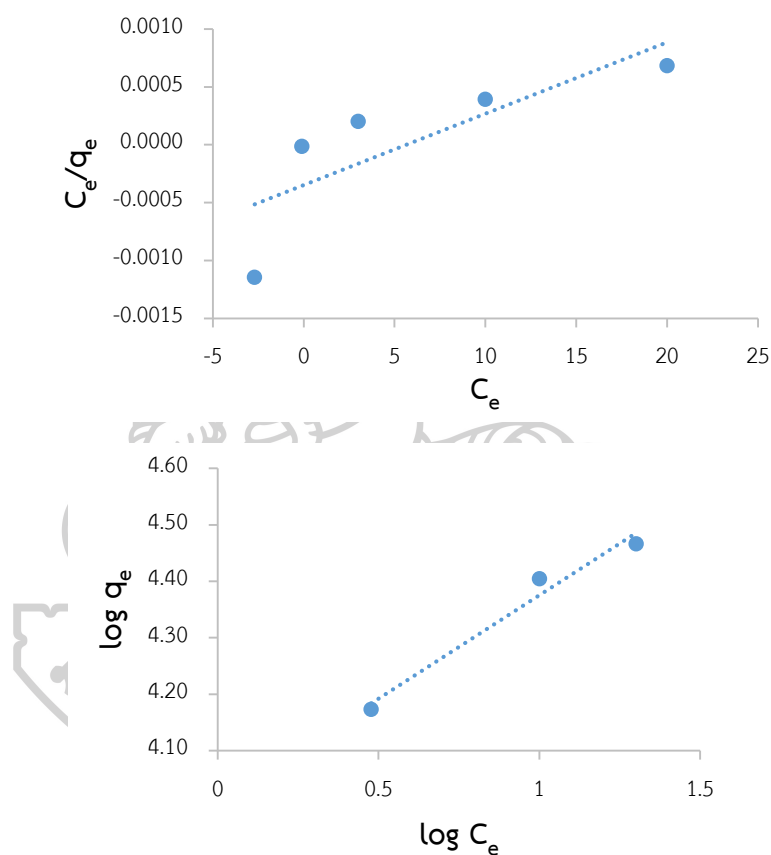
ความเข้มข้น (mg/L)	$q_e$ (exp)	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic			การแพร่เข้าสู่รูพรุน	
		$R^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_2$ ( $\text{mg/g min}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_p$ ( $\text{g/mg} \cdot \text{min}^{1/2}$ )
10	4076	0.1055	0.00691	191	0.9979	$6.69 \times 10^{-4}$	5000	0.2064	91.1
20	7051	0.5373	0.01497	502	0.9976	$-1.00 \times 10^{-4}$	10000	0.1814	157.45
40	14903	0.2679	0.01543	813	0.9982	$-5.00 \times 10^{-4}$	14286	0.2702	390.22
80	26857	0.7626	0.02257	5006	0.9998	$2.31 \times 10^{-5}$	25000	0.3803	833.32
100	29840	0.7532	0.04698	7101	0.9997	$1.87 \times 10^{-5}$	33333	0.3802	906.17



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิโนบนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

#### 4.2.9 ผลการศึกษา Adsorption isotherms ของการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 38 และตารางที่ 21 พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับบราซิลินด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากไอโซเทอมนี้นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่เป็นแบบหลายชั้น



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich



ตารางที่ 21 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

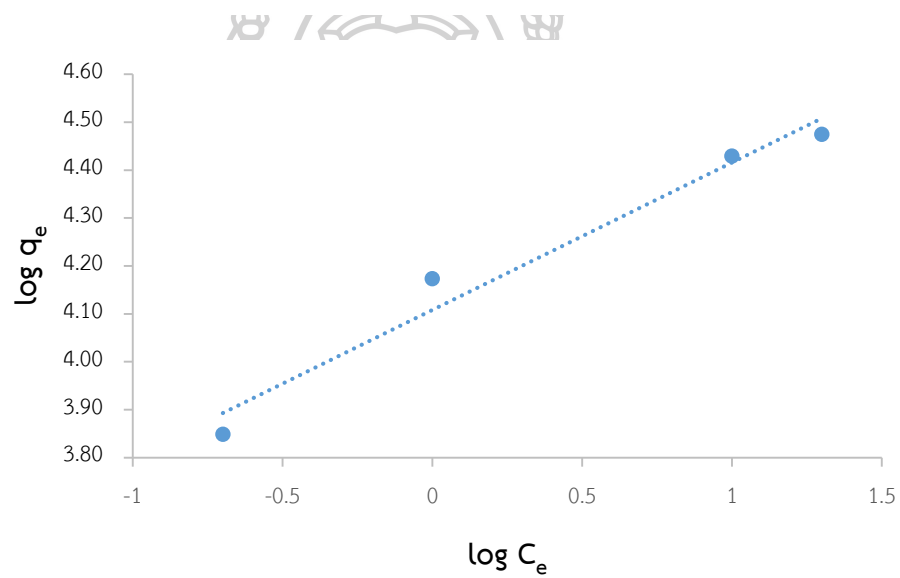
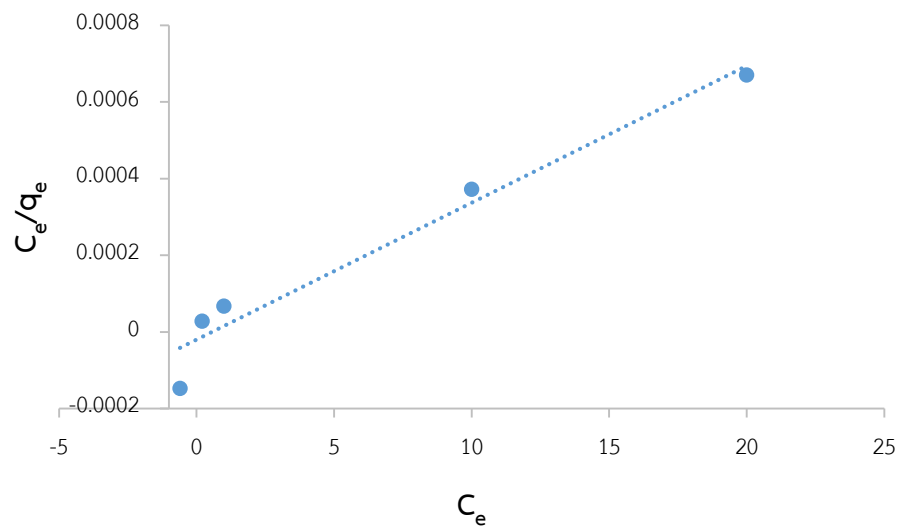
Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$R^2 = 0.6432$	$R^2 = 0.9718$
$K_L = -0.2000$	$K_F = 10216$
$Q_{max} = 16666.7$	$n = 2.734$

#### 4.2.10 ผลการศึกษา Adsorption isotherms ของการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 39 และตารางที่ 22 พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับบราซิลีนด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากไอโซเทอมนี้นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่เป็นแบบหลายชั้น

ตารางที่ 22 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$R^2 = 0.9586$	$R^2 = 0.9696$
$K_L = 2.000$	$K_F = 3.000$
$Q_{max} = 25000$	$n = 3.185$

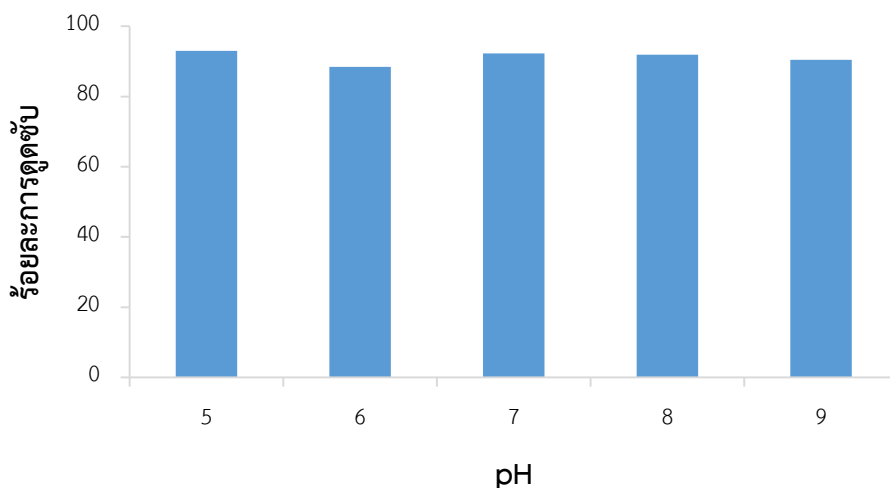


รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

### 4.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมของการดูดซับบราซิลีนจากฝางโดยใช้มอนต์มอริลโลไนท์เป็นตัวดูดซับ

#### 4.3.1 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH เริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

จากรูปที่ 40 จะเห็นได้ว่า ที่ pH 5-9 เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ได้จะมีค่าสูง โดยมีค่ามากกว่า 85 % เนื่องมาจากเมื่อมีการเติมมอนต์มอริลโลไนท์ลงในสารละลายบราซิลีนจะมีผลทำให้ pH ของสารละลายลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก pH 5-9 ไปเป็น pH ประมาณ 4-7 (จากตารางที่ 24) ทำให้โครงสร้างของบราซิลีนมีประจุบวก (ถูก Protonate) สามารถยึดจับกับผิวของมอนต์มอริลโลไนท์ที่มีประจุลบได้ดี ( $pH_{pzc} = 2.2$ ) จากตารางที่ 23 และรูปที่ 41 ซึ่งแสดงรูปของผงสี ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่ได้ พบว่า pH ของสารละลายบราซิลีนมีผลต่อสีของผงสีที่ได้ จากการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายบราซิลีนที่ pH 5-6 ไปเป็น pH 4 ทำให้สารละลายมีสีเหลือง ผงสีที่ได้มีสีน้ำตาลเหลือง และจาก pH 7-9 ไปเป็น pH 7 ทำให้สารละลายมีสีแดงอมชมพู ผงสีที่ได้จะมีสีชมพูอมม่วง การดูดกลืนแสงของสารละลายบราซิลีนที่ pH 5-6 จึงแตกต่างจากการดูดกลืนแสงของสารละลายบราซิลีนที่ pH 7-9

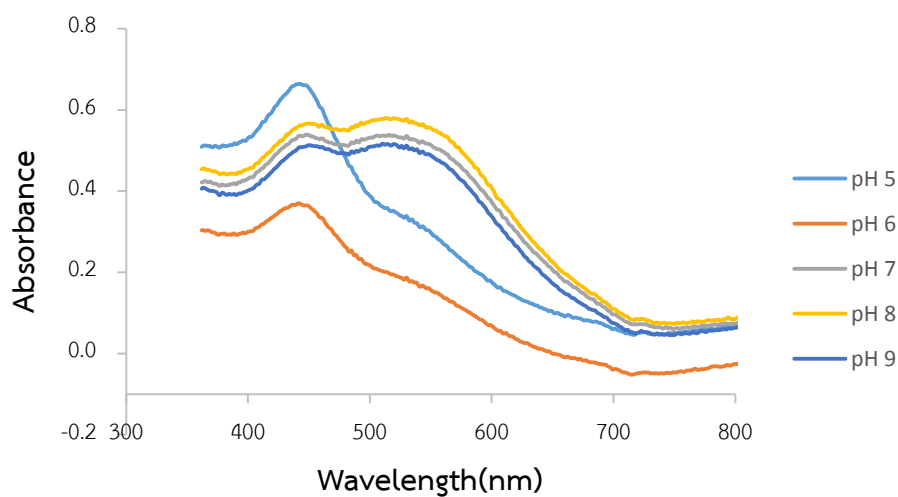


รูปที่ 40 ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

ตารางที่ 23 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ



pH	5	6	7	8	9
L*	76.33	70.80	56.96	58.79	62.12
a*	8.11	11.17	18.74	17.73	18.07
b*	31.52	31.68	9.55	7.58	8.58



รูปที่ 41 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลีนที่มีค่า pH ต่าง ๆ


ตารางที่ 24 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

pH	pH เริ่มต้น	pH 30นาที	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
5	5.3	4.12	4.14	6.15
6	6.24	4.42	4.43	7.07
7(ปกติ)	7.58	6.27	6.11	7.29
8	8.47	7.13	7.01	7.43
9	9.01	7.36	7.14	7.58

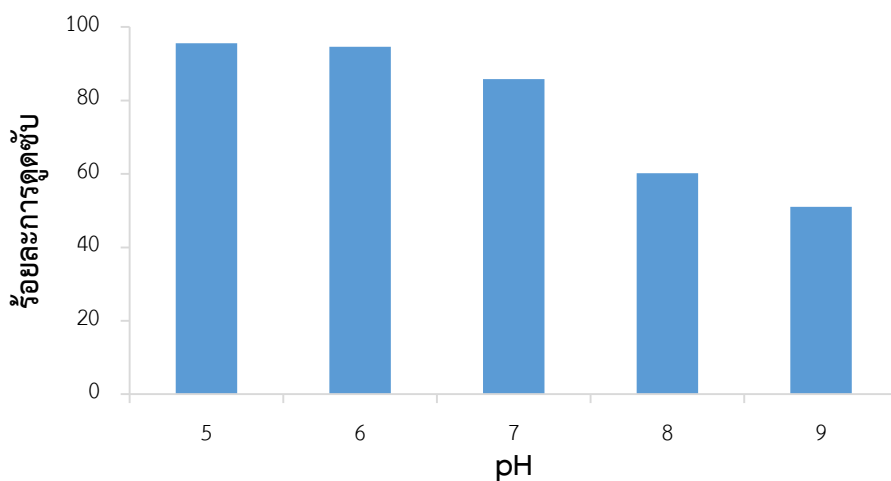
#### 4.3.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของ pH ของสารละลายที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิโนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

จากรูปที่ 42 จะเห็นได้ว่า สารละลายบราซิโนที่ pH 5-7 เปอร์เซ็นต์การดูดซับที่ได้จะมีค่าสูง โดยมีค่ามากกว่า 86 % แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซับจะมีค่าต่ำลงเหลือ 50-60 % เมื่อใช้สารละลาย บราซิโนที่มี pH 8 และ 9 ทั้งนี้เนื่องจากในช่วง pH 5-7 โครงสร้างของบราซิโนส่วนใหญ่จะมีประจุเป็นบวก จึงจับกับผิวของมอนต์มอริลโลไนท์ ( $pH_{pzc} = 2.2$ ) ที่ pH 5-7 มีประจุเป็นลบได้ดี ในทางตรงกันข้ามที่ pH 8-9 โครงสร้างของบราซิโนจะมีประจุเป็นลบ ผิวของมอนต์มอริลโลไนท์ที่ pH 8-9 มีประจุลบ จึงทำให้ยึดจับกับบราซิโนได้ไม่ดี จากตารางที่ 25 และรูปที่ 43 ซึ่งแสดงรูปของผงสี ค่า CIELAB และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่ได้ พบว่า pH ของสารละลายบราซิโนมีผลต่อสีของผงสีที่ได้ โดยที่ pH 5-6 ผงสีที่ได้มีสีชมพูอมแดง ในขณะที่ pH 7 และ 8 ผงสีที่ได้จะมีสีชมพูอมม่วงและชมพูอมม่วงอ่อน ตามลำดับ และที่ pH 9 ผงสีที่ได้จะมีสีขาว ดังนั้น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับบราซิโนลงบนมอนต์มอริลโลไนท์ ควรจะอยู่ในช่วง 5-7

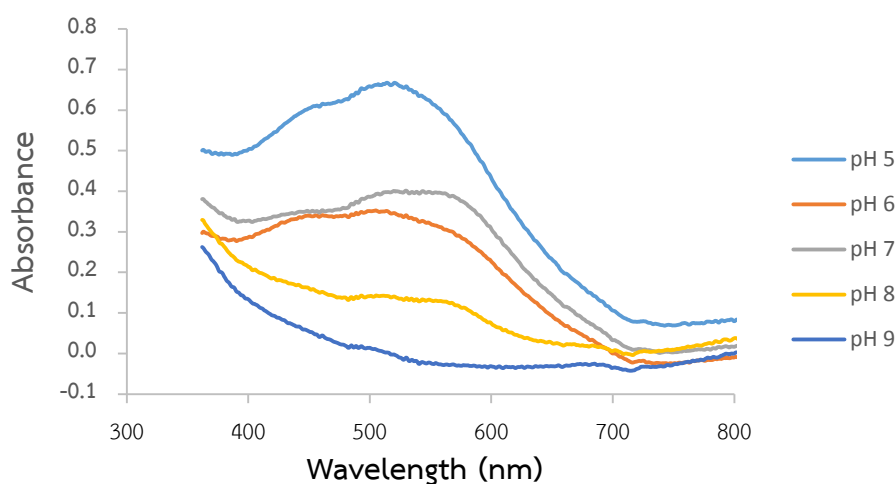
ตารางที่ 25 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิโนที่มีค่า pH ต่าง ๆ



pH	5	6	7	8	9
L*	60.40	77.13	72.33	90.39	101.72
a*	21.96	13.50	14.31	6.07	-1.63
b*	5.63	5.87	-0.33	6.18	10.41



รูปที่ 42 ผลของอิทธิพลของ pH ของสารละลายบราซิลินที่มีต่อการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์



รูปที่ 43 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้สารละลายบราซิลินที่มีค่า pH ต่าง ๆ

#### 4.3.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ที่มีต่อการดูดซับบราซิลิน (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

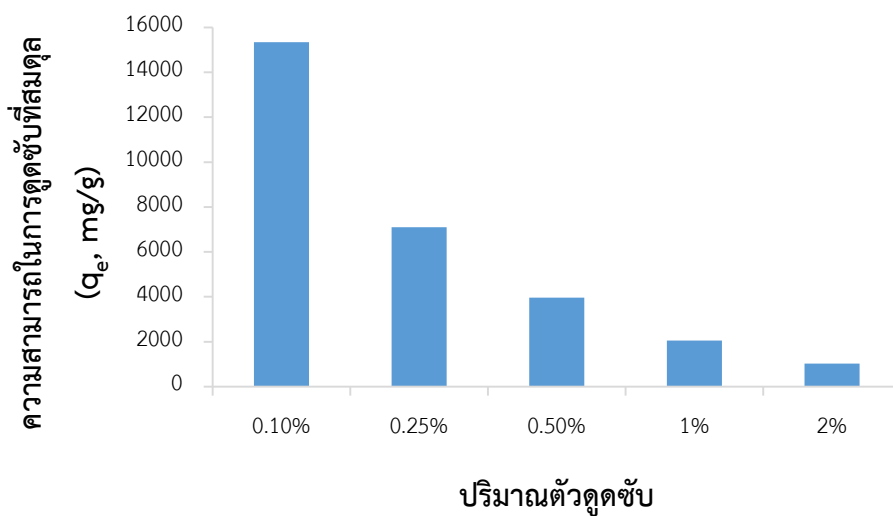
ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่แสดงในรูปที่ 44 พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ 0.1 % w/v ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะมีค่าเท่ากับ 15333 mg/g และค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะลดลงเป็น 1024 mg/g เมื่อใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ 2 % w/v นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่ได้ที่แสดงในตารางที่ 26 พบว่า ปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ที่มีผลต่อเฉดสีของผงสี เนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์มอนต์มอริลโลไนท์ที่ใช้เพิ่มขึ้น ค่า pH ของสารละลายบราซิลินลดลง ดังแสดง

ในตารางที่ 27 ทำให้ผงสีที่ได้จะมีเฉดสีที่แตกต่างกันจากสีชมพูเข้ม, ชมพูอ่อน, เหลืองอมชมพู, เหลือง และเหลืองอ่อน เมื่อใช้มอนต์มอริลโลไนท์ในปริมาณ 0.1 0.25 0.5 1 และ 2 % w/v ตามลำดับ และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีได้ดังแสดงในรูปที่ 45

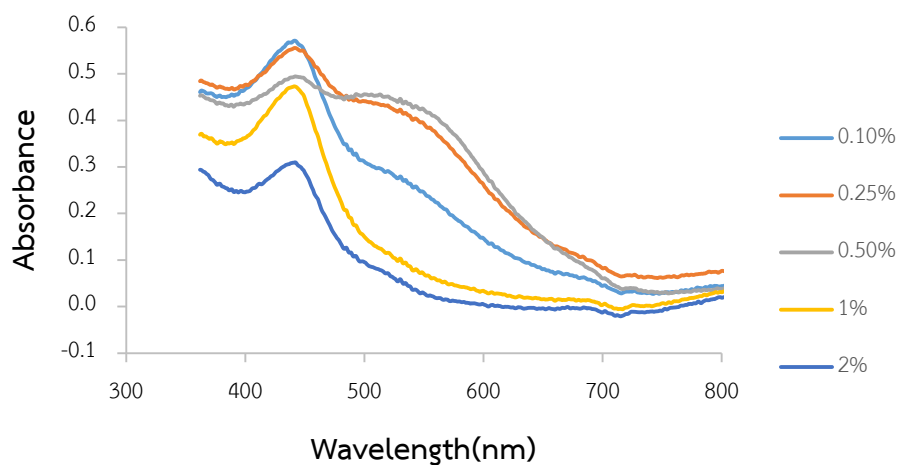
ตารางที่ 26 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน



% มอนต์มอริลโลไนท์ (w/v)	0.1	0.25	0.5	1	2
L*	58.71	67.73	76.71	89.67	93.02
a*	17.73	14.10	5.61	-3.97	-3.76
b*	12.04	19.01	28.45	34.92	27.53



รูปที่ 44 ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์



รูปที่ 45 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

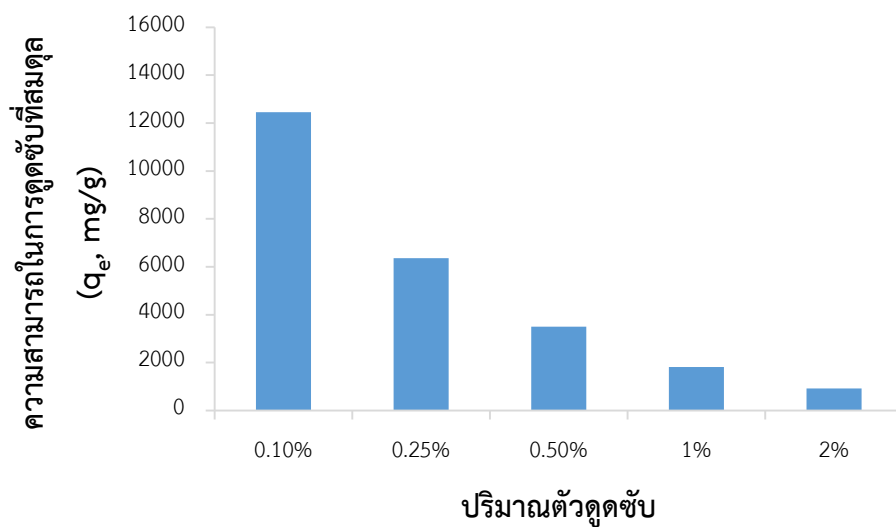
ตารางที่ 27 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

% มอนต์มอริลโลไนท์ (w/v)	pH เริ่มต้น	pH 30นาที	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
0.1	7.38	7.43	7.58	7.32
0.25	7.54	6.97	6.76	6.85
0.5	7.54	5.18	5.29	6.69
1	7.44	4.36	4.37	6.67
2	7.44	3.92	3.99	6.79

#### 4.3.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ที่มีต่อการดูดซับบราซิซิน (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่แสดงในรูปที่ 46 พบว่า ความสามารถในการดูดซับที่สมดุลลดลงเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ 0.1 % w/v ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะมีค่าเท่ากับ 12459 mg/g และค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลจะลดลงเป็น 925 mg/g เมื่อใช้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ 2 % w/v นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่ได้ที่แสดงในตารางที่ 28 พบว่าปริมาณมอนต์มอริลโลไนท์ที่ใช้มีผลต่อความเข้มของสีของผงสีที่โดยเมื่อเปอร์เซ็นต์มอนต์มอริลโลไนท์ที่ใช้เพิ่มขึ้น สีชมพูอมม่วงของผงสีที่จะได้อ่อนลง และค่าการดูดกลืนแสงของผงสีลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 47



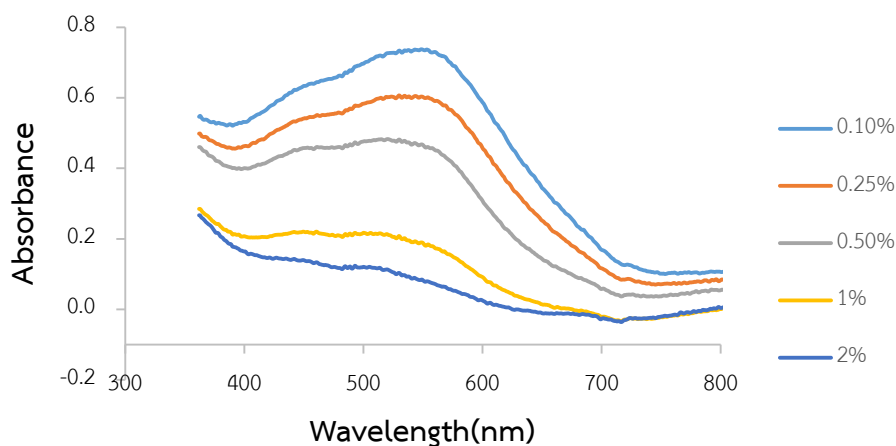


รูปที่ 46 ผลของอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อความสามารถในการดูดซับบราซิซีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

ตารางที่ 28 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน



% มอนต์มอริลโลไนท์ (w/v)	0.1	0.25	0.5	1	2
L*	54.01	61.01	69.25	86.91	94.01
a*	18.71	18.12	18.88	11.95	6.44
b*	-2.37	0.55	5.60	7.77	9.13



รูปที่ 47 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

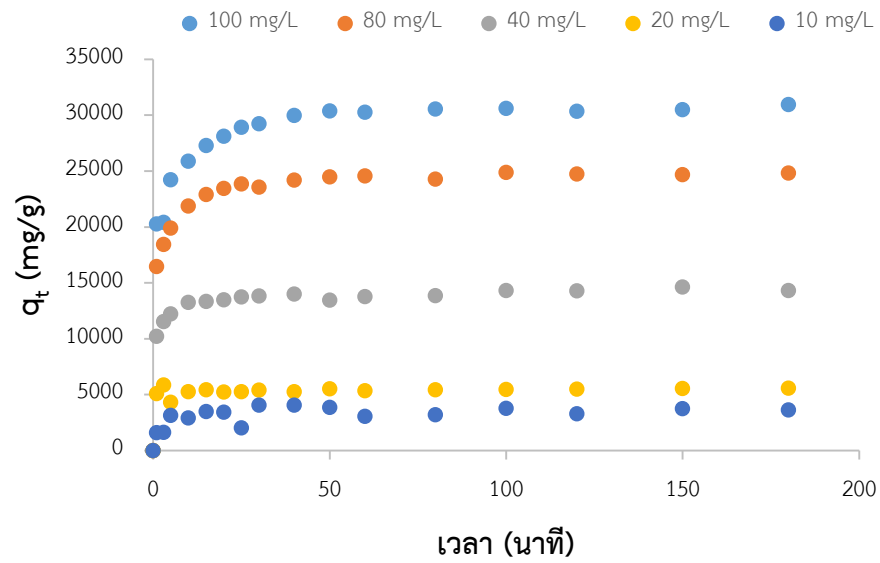
#### 4.3.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

รูปที่ 48 แสดงผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีน พบว่า ในช่วง 20 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับบราซิลีนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 50 นาที โดยความสามารถในการดูดซับที่สมดุลมีค่าเท่ากับ 3876, 5527, 13471, 24496 และ 30390 mg/g สำหรับที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลีนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่แสดงในตารางที่ 29 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนเพิ่มขึ้น สีของผงสีที่ได้จะเข้มขึ้นด้วยและค่าการดูดกลืนแสงของผงสีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 50

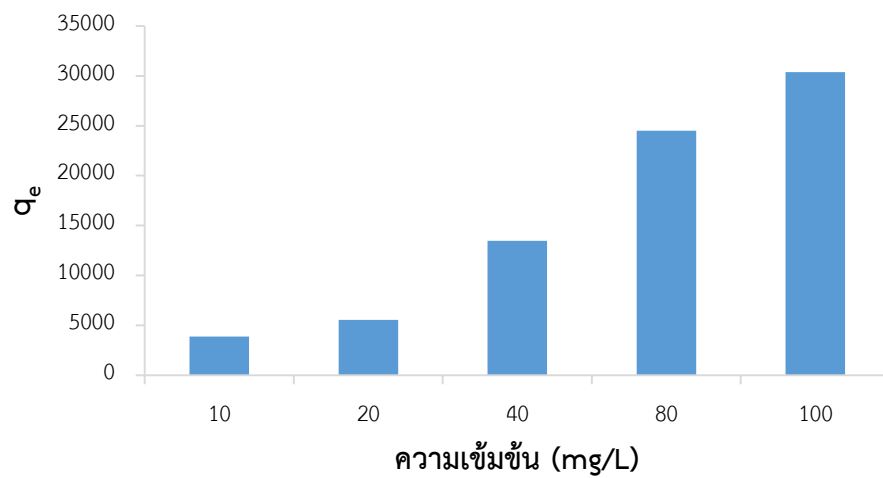
ตารางที่ 29 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่แตกต่างกัน



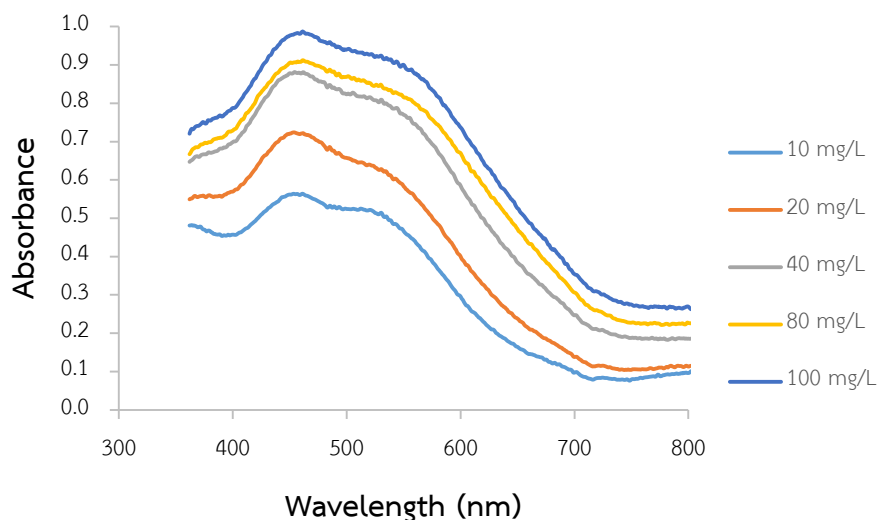
ความเข้มข้น (mg/L)	10	20	40	80	100
L*	68.85	61.84	51.83	45.22	48.72
a*	18.06	17.95	17.11	14.33	14.12
b*	14.32	16.74	12.77	9.18	9.84



รูปที่ 48 ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซีลินที่มีต่อการดูดซับบราซีลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์



รูปที่ 49 ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ที่ได้จากการใช้สารละลายบราซีลินที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 50 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน

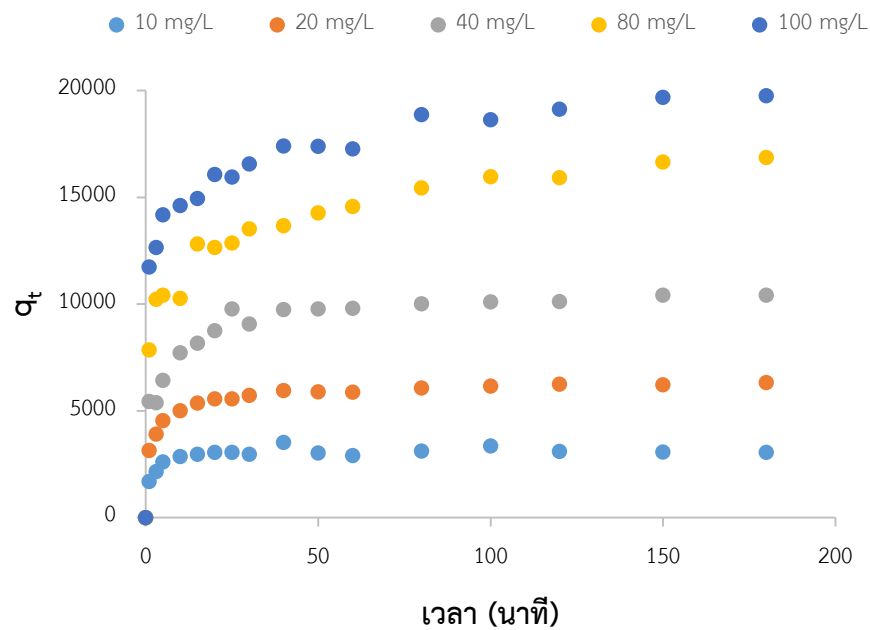
ตารางที่ 30 แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของ pH

ความเข้มข้น (mg/L)	pH เริ่มต้น	pH ก่อนกรอง	pH หลังกรอง
10	7.46	5.86	7.11
20	7.41	5.95	7.07
40	7.23	4.66	5.65
80	7.07	5.37	5.59
100	7.39	5.18	5.55

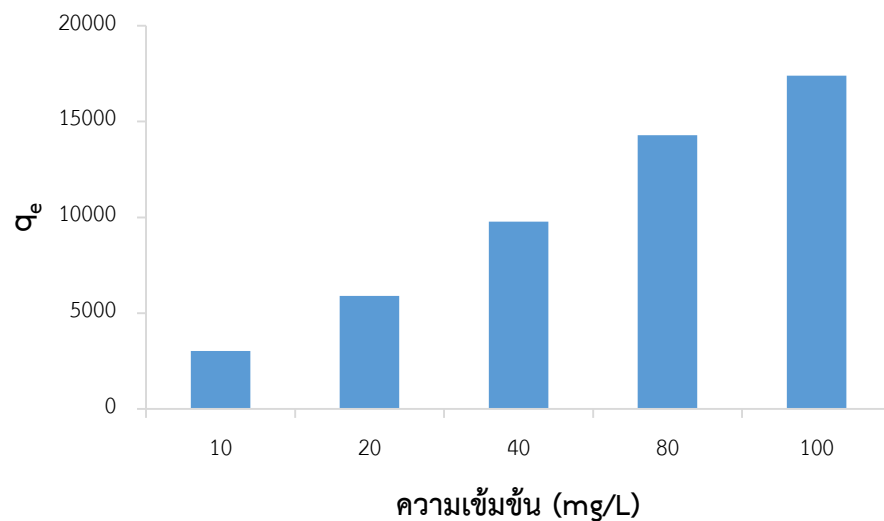
#### 4.3.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

รูปที่ 51 แสดงผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลิน พบว่าในช่วง 20 นาทีแรกของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับบราซิลินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลการดูดซับที่เวลา 50 นาที โดยความสามารถในการดูดซับที่สมดุลมีค่าเท่ากับ 3033, 5895, 9772, 14282 และ 17396 mg/g สำหรับที่ความเข้มข้น 10, 20, 40, 80 และ 100 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับบราซิลินเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินเป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นในสารละลายกับบริเวณผิวของตัวดูดซับ

นอกจากนี้ จากสีและค่า CIELAB ของผงสีที่แสดงในตารางที่ 31 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนเพิ่มขึ้น สีของผงสีที่ได้จะเข้มขึ้นด้วยและค่าการดูดกลืนแสงของผงสีเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 53




รูปที่ 51 ผลของอิทธิพลของผลความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

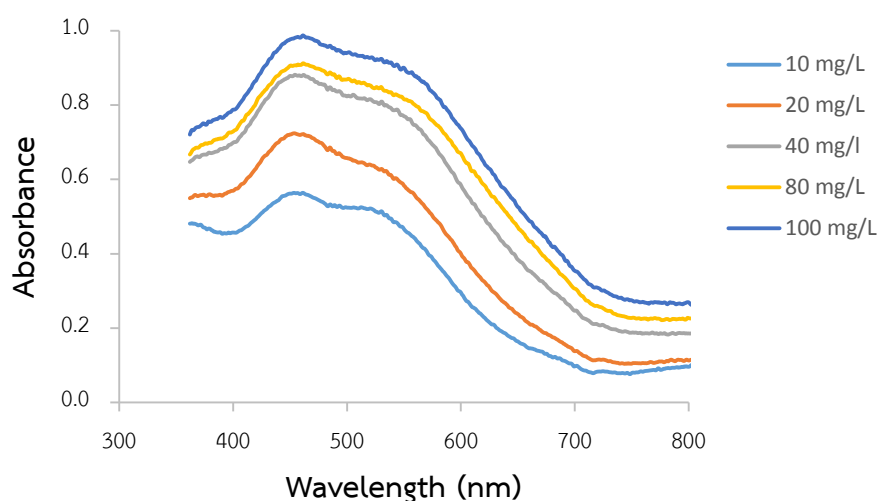


รูปที่ 52 ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ , mg/g) ที่ได้จากการใช้สารละลายบราซิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 31 CIELAB ของผงสีที่เตรียมโดยการใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน



ความเข้มข้น (mg/L)	10	20	40	80	100
L*	76.78	65.64	59.11	53.60	55.86
a*	15.09	14.32	13.14	13.52	14.31
b*	5.65	2.95	2.68	2.80	2.59



รูปที่ 53 ค่าการดูดกลืนแสงของผงสีที่เตรียมโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายบราซิลินที่แตกต่างกัน

#### 4.3.7 ผลการศึกษา Adsorption kinetics ของการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์

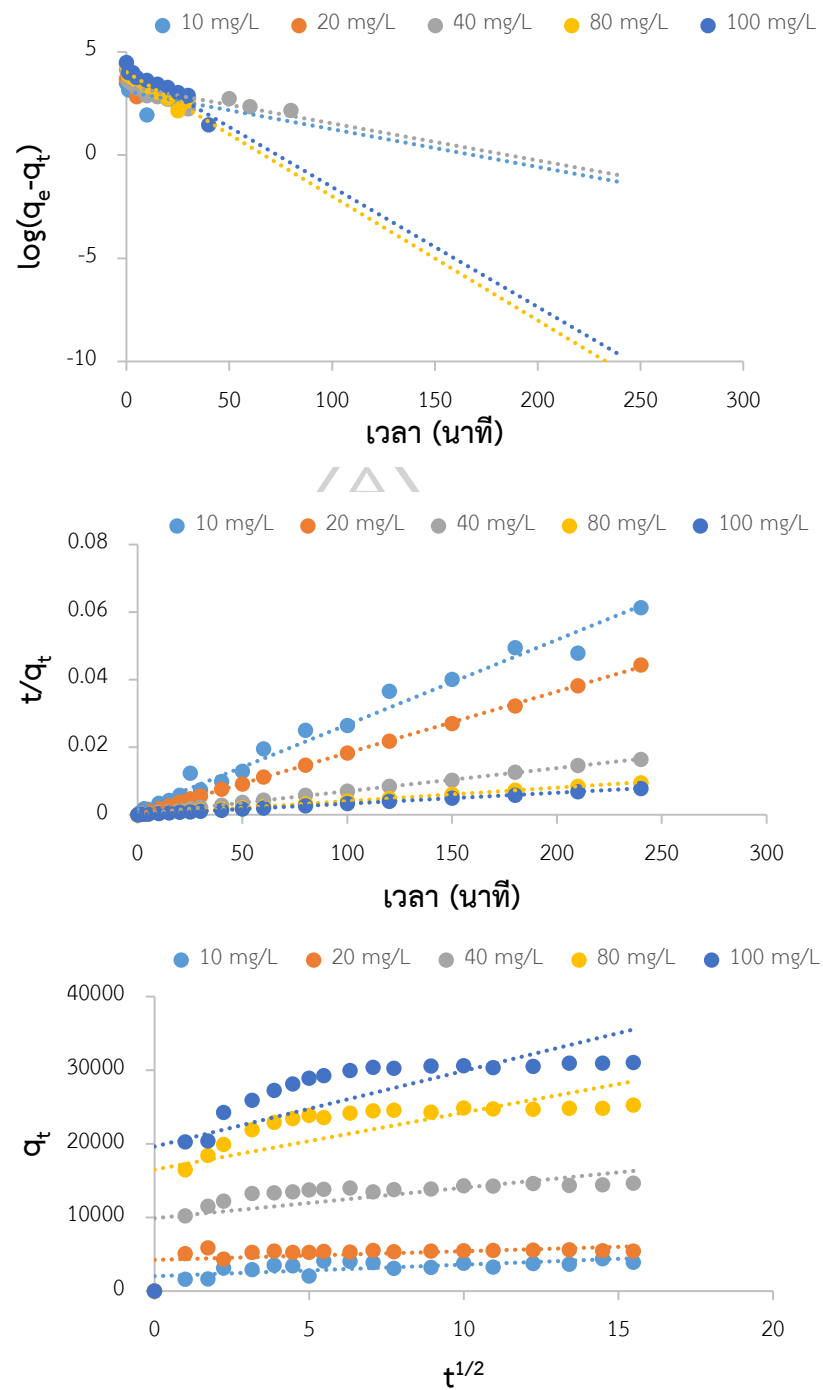
(กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

จากการศึกษา Adsorption kinetics โดยใช้สมการปฏิกิริยา Pseudo-first order, ปฏิกิริยา Pseudo-second order และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 54 และค่าตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 32 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่รูพรุน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ของปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าเท่ากับ 0.9959 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและการแพร่เข้าสู่รูพรุน ซึ่งมีค่า

เท่ากับ 0.6947 และ 0.3677 นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิลีนที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-first order

**ตารางที่ 32** ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน

ความเข้มข้น (mg/L)	$q_e$ (exp)	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic			การแพร่เข้าสู่รูพรุน	
		$R^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_2$ (mg/g min)	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_p$ (g/mg .min <sup>1/2</sup> )
10	3876	0.1060	0.0421	1206	0.9805	$4.16 \times 10^{-5}$	3333	0.4666	158.45
20	5527	1.000	0.4037	5000	0.9997	$3.64 \times 10^{-4}$	5000	0.1939	118.42
40	13471	0.5871	0.0392	2144	0.9996	$5.51 \times 10^{-5}$	14286	0.351	414.68
80	24496	0.8754	0.1382	10086	0.9998	$3.33 \times 10^{-5}$	25000	0.3908	774.65
100	30390	0.9048	0.1338	17993	0.9999	$2.17 \times 10^{-5}$	33333	0.4368	1027.2



รูปที่ 54 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิโนโนมอนด์มอริลโลไนท์

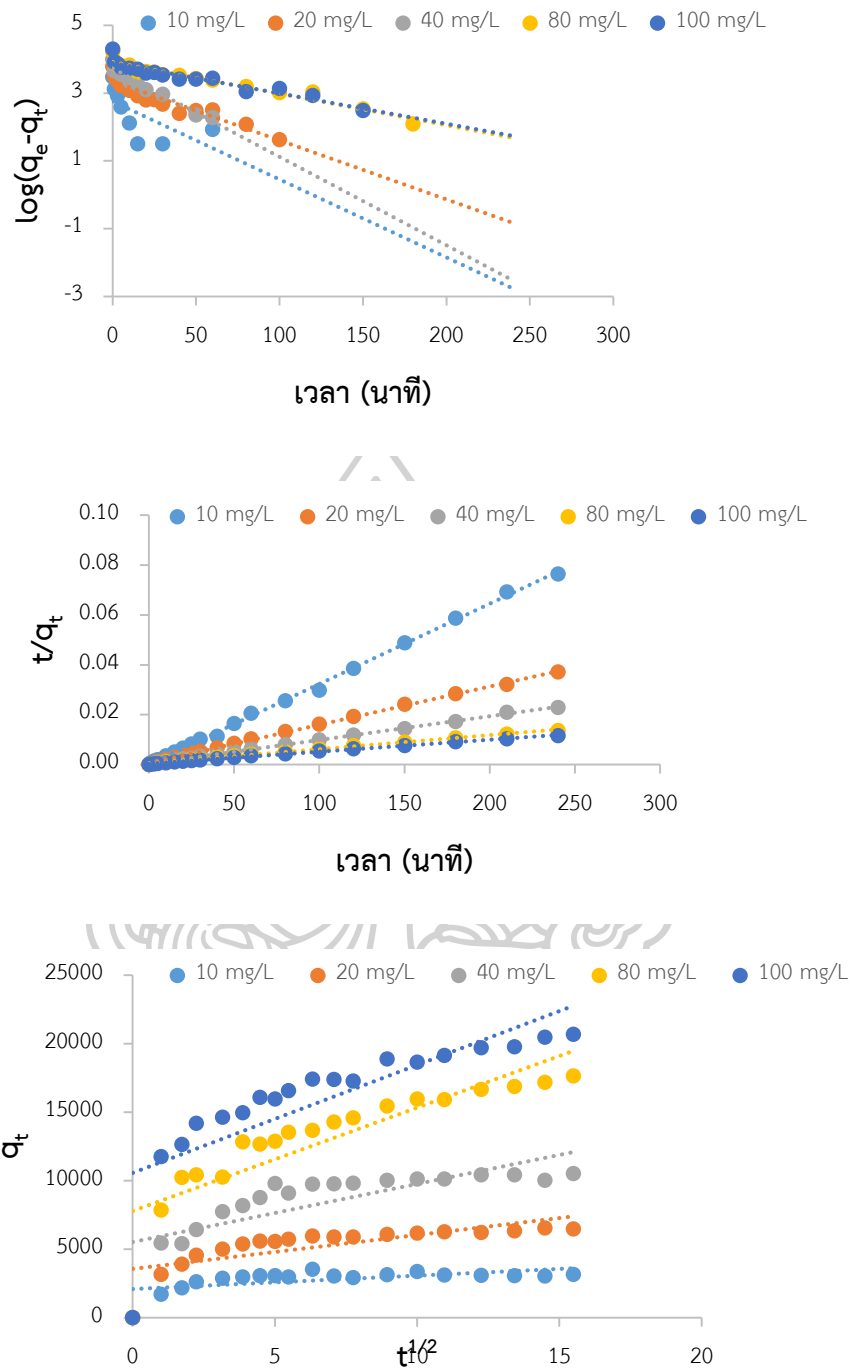


#### 4.3.8 ผลการศึกษา Adsorption kinetics ของการดูดซับบราซิซินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากการศึกษา Adsorption kinetics โดยใช้สมการปฏิกิริยา Pseudo-first order, ปฏิกิริยา Pseudo-second order และสมการปฏิกิริยาการแพร่เข้าสู่รูพรุน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 55 และค่าตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 33 เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ที่ได้จากแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order แบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่รูพรุน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ย ( $R^2$ ) ของปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าเท่ากับ 0.9982 ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เฉลี่ยของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและการแพร่เข้าสู่รูพรุน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8191 และ 0.5685 นอกจากนี้ ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายบราซิซินที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-second order มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการปฏิกิริยา Pseudo-first order

**ตารางที่ 33** ค่าตัวแปรของปฏิกิริยา Pseudo-first order model, ปฏิกิริยา Pseudo-second order model และการแพร่เข้าสู่รูพรุน

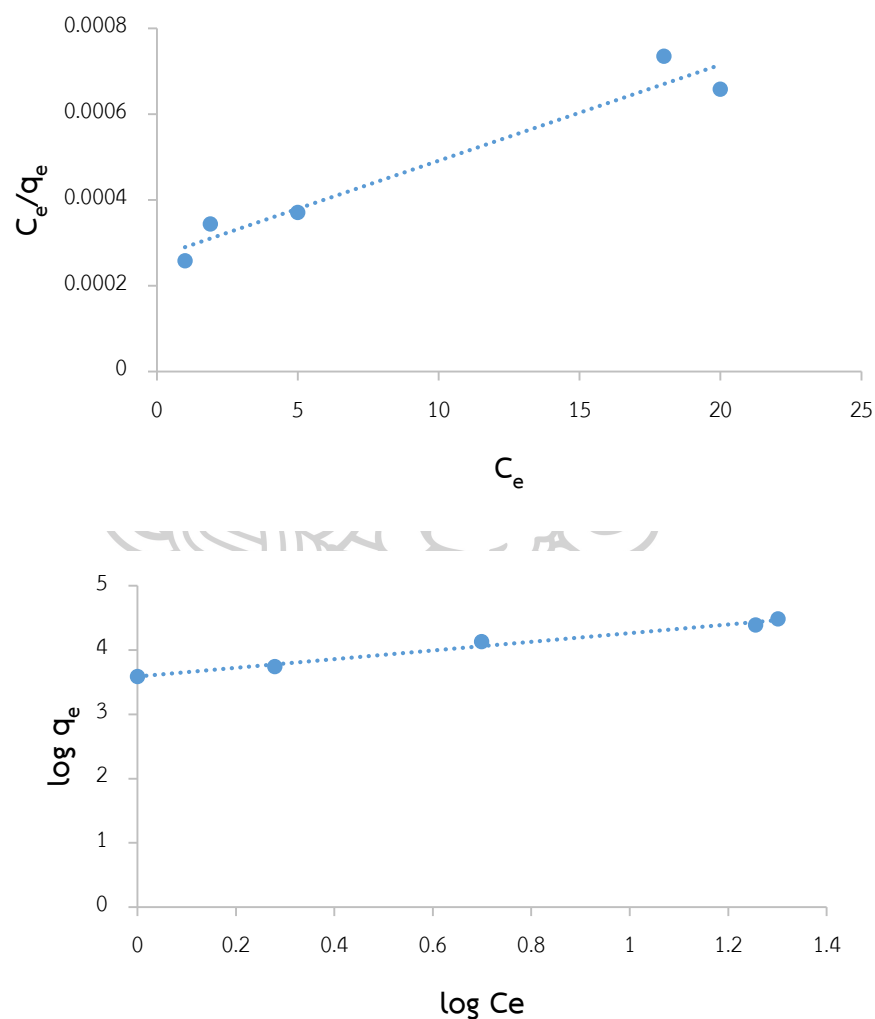
ความเข้มข้น (mg/L)	$q_e$ (exp)	Pseudo first order kinetic			Pseudo second order kinetic			การแพร่เข้าสู่รูพรุน	
		$R^2$	$K_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_2$ (mg/g min)	$q_e$ (cal)	$R^2$	$K_p$ (g/mg .min <sup>1/2</sup> )
10	3125	0.3997	0.05297	564	0.9986	$1.46 \times 10^{-3}$	3333	0.3470	98.255
20	6079	0.8921	0.04007	2228	0.9992	$5.41 \times 10^{-5}$	5000	0.5548	246.7
40	10019	0.9556	0.06011	5302	0.9986	$4.98 \times 10^{-5}$	10000	0.5771	424.38
80	15441	0.9482	0.02142	8243	0.9969	$1.05 \times 10^{-5}$	16667	0.7251	753.86
100	18885	0.9000	0.02073	7754	0.9976	$9.35 \times 10^{-6}$	20000	0.6384	796.8



รูปที่ 55 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-first order model (ก) และแบบจำลองการดูดซับของปฏิกิริยา Pseudo-second order model (ข) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (ค) ของการดูดซับบราซิโนนบนมอนต์มอริลโลไนท์

#### 4.3.9 ผลการศึกษา Adsorption isotherms ของการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ (กรณีที่ไม่มีการควบคุม pH ของสารละลาย)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 56 และตารางที่ 34 พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับบราซิลีนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากไอโซเทอมนี้นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่เป็นแบบหลายชั้น



รูปที่ 56 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

ตารางที่ 34 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

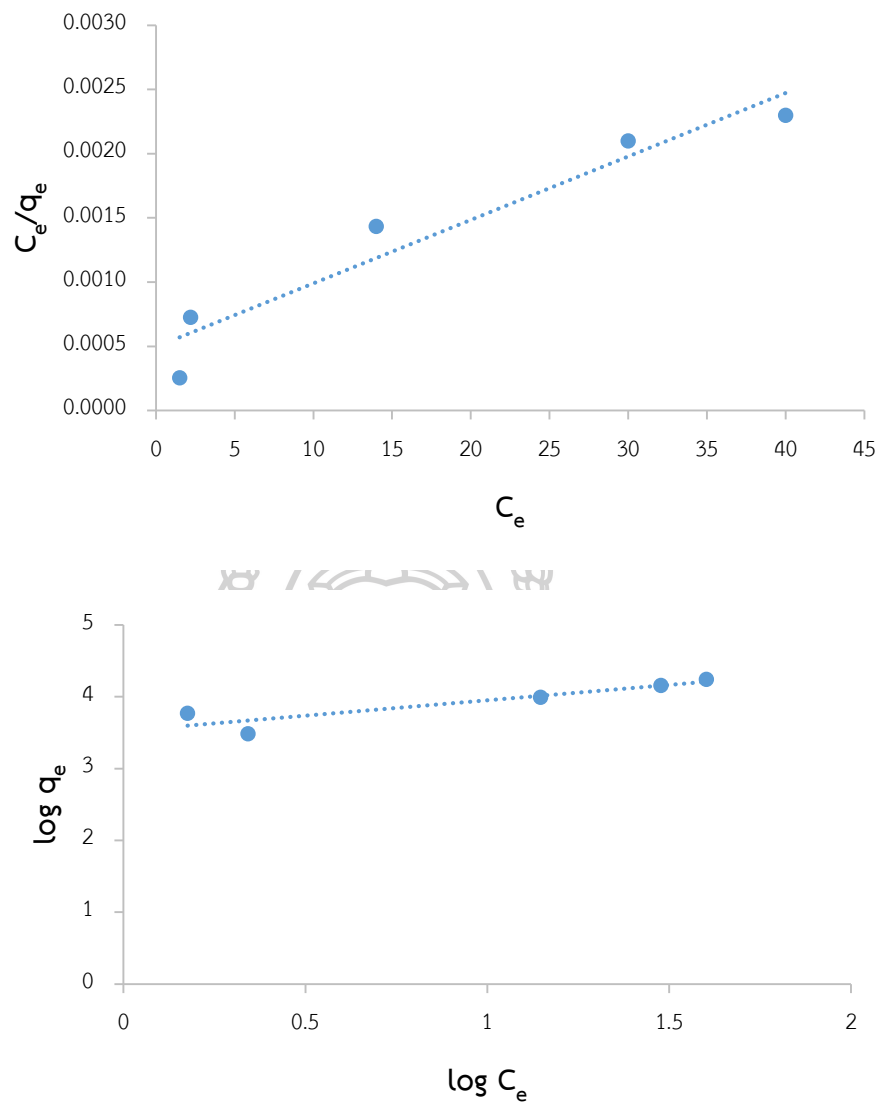
Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$R^2 = 0.9453$	$R^2 = 0.9864$
$K_L = 0.06667$	$K_F = 3893$
$Q_{max} = 50000$	$n = 1.485$

4.3.10 ผลการศึกษา Adsorption isotherms ของการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ (กรณีที่มีการควบคุม pH ของสารละลายเท่ากับ 7)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 57 และตารางที่ 35 พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับบราซิลินด้วยมอนต์มอริลโลไนท์คือ แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir เนื่องจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ที่ได้จากไอโซเทอมนี้นี้มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดเป็นแรงทางเคมีที่เป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 35 ค่าตัวแปรของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$R^2 = 0.9284$	$R^2 = 0.8238$
$K_L = 0.1000$	$K_F = 3337$
$Q_{max} = 20000$	$n = 2.347$



รูปที่ 57 ความสัมพันธ์ตามแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของ Freundlich

## บทที่ 5

## สรุปผลการทดลอง

ผงสีธรรมชาติจากฝางสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการดูดซับ โดยใช้อะลูมิเนียมออกไซด์, อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนท์ เป็นตัวดูดซับ โดยเฉดสีของผงสีที่เตรียมได้จะมีสีชมพูอ่อน, สีชมพูอมม่วงเข้ม และสีชมพูอมม่วง ตามลำดับ

## อะลูมิเนียมออกไซด์



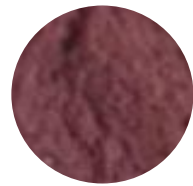
ชมพูอ่อน

## อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



ชมพูอมม่วงเข้ม

## มอนต์มอริลโลไนท์



ชมพูอมม่วง

โดย pH ที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมผงสีของอะลูมิเนียมออกไซด์คือ pH 5

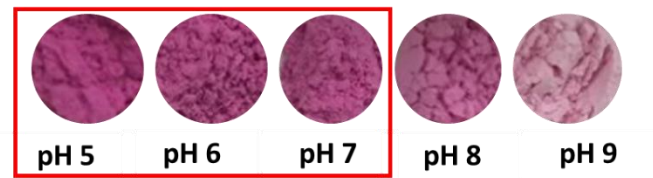
pH ที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมผงสีของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คือ pH 5-7

pH ที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมผงสีของมอนต์มอริลโลไนท์คือ pH 5-7

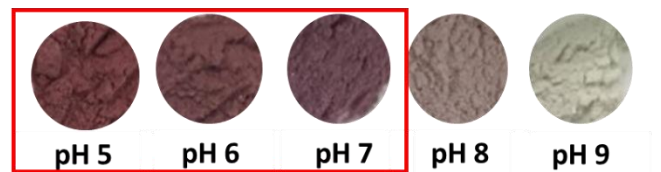
## อะลูมิเนียมออกไซด์



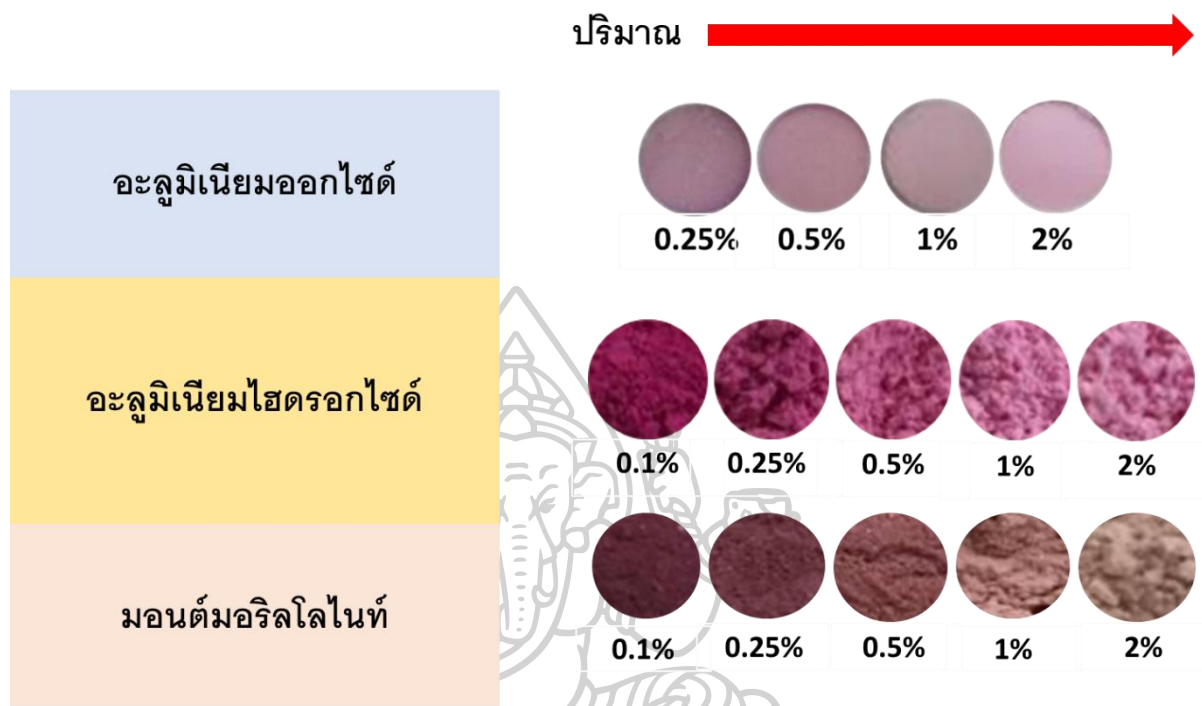
## อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



## มอนต์มอริลโลไนท์



นอกจากนี้จากการศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้ผงสีที่ได้มีสีซีดลง



และจากการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ความสามารถในการดูดซับบราซิลีนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีน โดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายบราซิลีนเพิ่มขึ้นจะทำให้ผงสีที่ได้มีสีเข้มขึ้น



ในขณะที่การดูดซับของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดจะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของ Pseudo-second order และไอโซเทอมการดูดซับเป็นแบบ Freundlich ยกเว้น ในกรณีของการดูดซับบราซิโนด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ที่มีการควบคุม pH ของสารละลายบราซิโน การดูดซับจะมีความสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir





## รายการอ้างอิง

- Annadurai, G., Ling, L. Y., & Lee, J. F. (2007). Adsorption of reactive dye from an aqueous solution by chitosan: isotherm, kinetic and thermodynamic analysis. *Hazard Mater*, 152(1), 337-346.
- Bendaho, D., Ainad, D. T., & Djillali, B. (2015). Removal of Anionic Dye by Natural Algerian Montmorillonite. *Environ Anal Chem*, 2(130), 2380-2391.
- Cao, J., Jiang, Y., Sun, Y., Zhang, X., Li, L., & Man, Y. (2012). Immunosuppression of NF- $\kappa$ B by intragastric brazilein in motor neuron of spinal cord connected with injured sciatic nerve in mouse. *Biomedical Research*, 23(2), 199-206.
- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061-1085.
- de Oliveira, L. F. C., Edwards, H. G. M., Velozo, E. S., & Nesbitt, M. (2002). Vibrational spectroscopic study of brazilin and brazilein, the main constituents of brazilwood from Brazil. *Vibrational Spectroscopy*, 28(2), 243-249.
- Engineering, D. o. C. a. B. (2011). Surface Area.
- Gürses, A., Doğar, C., Yalçın, M., Açıkyıldız, M., Bayrak, R., & Karaca, S. (2006). The adsorption kinetics of the cationic dye, methylene blue, onto clay. *Hazard Mater*, 131(1-3), 217-228.
- Kasprzyk-Hordern, B. (2009). Chemistry of alumina, reactions in aqueous solution and its application in water treatment. *Adv Colloid Interface Sci.*, 110(1-2), 19-48.
- Kim, M. S., & Chung, J. G. (2002). Removal of copper(II) ion by kaolin in aqueous solutions. *Environ. Eng. Res.*, 7(1), 49 – 57.
- Li, Y., Du, Q., Liu, T., Peng, X., Wang, J., Sun, J., . . . Xia, L. (2013). Comparative study of methylene blue dye adsorption onto activated carbon, graphene oxide, and carbon nanotubes. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(2), 361-368.
- Li, Y., Gao, B., Wu, T., Wang, B., & Li, X. (2008). Adsorption properties of aluminum magnesium mixed hydroxide for the model anionic dye Reactive Brilliant Red K-2BP. *Hazardous Materials*, 164(2-3), 1098-1104.
- Messina, P. V., & Schulz, P. C. (2006). Adsorption of reactive dyes on titania–silica

- mesoporous materials. *Colloid and Interface Science*, 299(1), 305-320.
- Nirmal, N., & Panichayupakaranant, P. (2014). *Anti- Propionibacterium acnes assay-guided purification of brazilin and preparation of brazilin rich extract from Caesalpinia sappan heartwood* (Vol. 52).
- Nuruzzaman, M., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). *Nanoencapsulation, Nano-Guard for Pesticides: A New Window for Safe Application* (Vol. 64).
- Pal, U., Sandoval, A., Madrid, S., Corro, G., Sharma, V., & Mohanty, P. (2016). Mixed titanium, silicon, and aluminum oxide nanostructures as novel adsorbent for removal of rhodamine 6G and methylene blue as cationic dyes from aqueous solution. *Chemosphere*, 163, 142-152.
- Rani, B., Kumar, V., Singh, J., Bisht, S., Teotia, P., Sharma, S., & Kela, R. (2014). Bioremediation of dyes by fungi isolated from contaminated dye effluent sites for bio-usability. *Microbiol*, 45(3), 1055-1063.
- Rondão, R., Sérgio Seixas de Melo, J., Pina, J., Melo, M. J., Vitorino, T., & Parola, A. J. (2013). Brazilwood Reds: The (Photo)Chemistry of Brazilin and Brazilein. *Journal of Phys. Chem.*, 117(41), 10650–10660.
- Shukla, R., & Madras, G. (2014). Facile synthesis of aluminium cobalt oxide for dye adsorption. *Environmental Chemical Engineering*, 2(4), 2259-2268.
- Uçar, B., Güvenç, A., & Mehmetoğlu, U. (2011). Use of Aluminium Hydroxide Sludge as Adsorbents for the Removal of Reactive Dyes: Equilibrium, Thermodynamic, and Kinetic Studies. *Hydrology Current Research*, 2(2), 2157-7587.
- Wawrzkiwicz, M., WiŚniewska, M., Gun'ko, V. M., & Zarkoc, V. I. (2015). Adsorptive removal of acid, reactive and direct dyes from aqueous solutions and wastewater using mixed silica–alumina oxide. *Powder Technology*, 278, 306-315.
- ชนิษฐา. (2007). สีย้อม.
- โคตรแสง, ธ. (2016). ผ้าย้อมคราม.
- จิรวรรณ พิจาราย วาสนา พันชน มิถิ กัณณะ สรวุฒิ สมนาม และสัมพันธ์ วงศ์นาวา. (2558). การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลูและเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเพนตัน. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 29(1), 174-185.
- โตศรีสวัสดิ์เกษม, น. (2010). ฟางต้นไ้ม้มากคุณค่า.

ปทุมชาติพัฒน์, ผ. ว. (2017). ฝาง : สมุนไพรหลายร้อยสรรพคุณ.

ภัทรานิษฐ์ สิทธิณพนธ์ พริยะ แก่นทับทิม และประเทืองทิพย์ ปานบำรุง. (2557). การพัฒนาผลผลิตผลิตภัณฑ์แบบผ้ามัดย้อมด้วยการย้อมจากสีธรรมชาติ. วารสารวิชาการราชภัฏตะวันตก, 9(1), 81-89.

ราษฎร์วิจิตร, อ. (2012). อะลูมิเนียม ไฮดรอกไซด์ (Aluminium Hydroxide).

ลิมปิจำนงค์, ช. (2013). การศึกษาโลหะออกไซด์และโลหะซัลไฟด์เชิงคำนวณสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่.

สายอินทวงศ์, ด. ค. (2008). Montmorillonite (Smectite).

เอกลักษณ์การเกษตร. (2013). ครั้ง.



ภาคผนวก  
ผลงานทางวิชาการ



**Adsorption kinetics of natural dye (Sappanwood) on aluminium oxide**

Ployphat Suppharatthanya, Supanee Chayabutra and Jitnapa Sirirak\*

*Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University,  
Nakhon Pathom, 73000, Thailand*

\*e-mail: jitnapasirirak@gmail.com

**Abstract:** Sappanwood (*Caesalpiniasappan*), which consists of the reddish dye named “Brazilein”, is a safe natural coloring agent for dyeing and food industries. Using adsorption method, natural dye solution from sappanwood can be transformed into red lake pigments which can be used in many more applications. There are many adsorbents available for adsorbing dye on their surface such as aluminium oxide, zinc oxide, kaolin and bentonite. In this study, the effect of pH, the amount of adsorbents and the concentration of brazilein solution on the adsorption of brazilein on aluminium oxide were investigated. Their adsorption kinetics and adsorption isotherms were also explored. The results showed that the adsorption percentage was highest at pH 5 (~ 90%) followed by those of pH 7-10 (~ 65-70%) and become lowest at pH 12 (~19%). The adsorption capacity of aluminium oxide at equilibrium ( $q_e$ , mg/g) decreased when the amount of aluminium oxide increased. In contrast, when the concentration of brazilein increased, adsorption capacity of aluminium oxide at equilibrium ( $q_e$ , mg/g) increased. In addition, adsorption kinetics fitted well with a pseudo-second order kinetics model while the adsorption at equilibrium was governed by the Freundlich adsorption isotherm.

**Keywords:** natural dyes; sappanwood; brazilein; aluminium oxide; adsorption kinetics



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล Ployphat Suppharatthanya  
วัน เดือน ปี เกิด 1 พฤศจิกายน 2536  
สถานที่เกิด สมุทรสงคราม

