



อิทธิพลของค่าความเป็นกรด - ด่าง ของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ต่อการดูดซับสีของมบิลเลียนต์กรีน



โดย

นางสาวศิริวรรณ สมจิตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของค่าความเป็นกรด – ต่าง ของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ต่อการดูดซับสีย้อมบิล  
เลียนต์กรีน



โดย  
นางสาวศิริวรรณ สมจิตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

INFLUENCE OF CONDENSED TANNIN GEL'S PH ON THE ADSORPTION OF  
BRILLIANT GREEN DYE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (ENVIRONMENTAL SCIENCE)  
Department of ENVIRONMENTAL SCIENCE  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ อธิพจน์ของค่าความเป็นกรด – ต่าง ของเจลคอนเด็นส์แทนนิน ต่อ  
การดูดซับสีย้อมบิลิเลนตกรีน  
โดย ศิริวรรณ สมจิตต์  
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา  
มหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภวรรณ รัตสุข

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

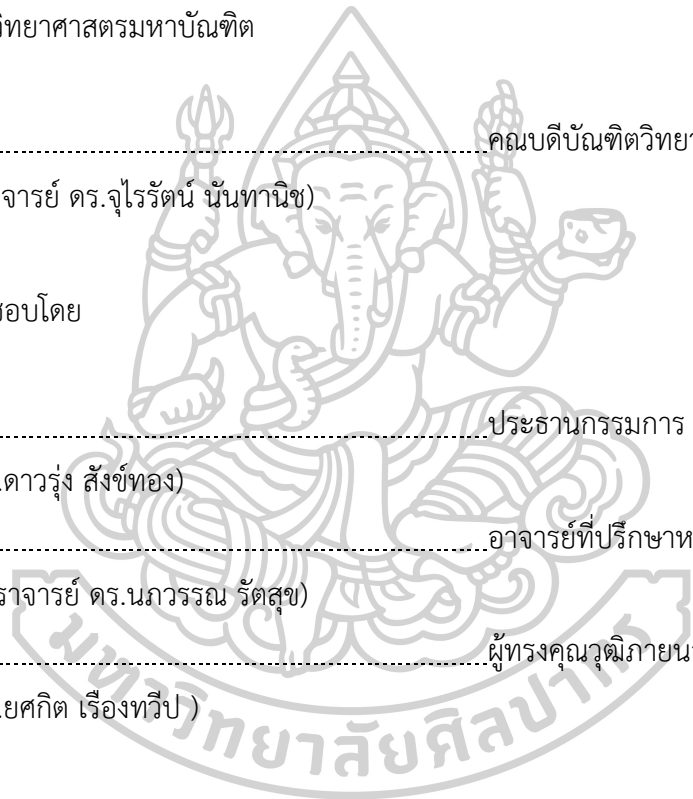
..... คุณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ดาวรุ่ง สัจข์ทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(อาจารย์ ดร.ยศกิต เรืองทวีป)



57311320 : วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : การดูดซับ, บริลเลียนต์กรีน, คอนเด็นซ์, แทนนินเจล, ความเป็นกรด-ด่าง

นางสาว ศิริวรรณ สมจิตต์: อิทธิพลของค่าความเป็นกรด - ด่าง ของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ต่อการดูดซับสีย้อมบริลเลียนต์กรีน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภวรรณ รัตสุข

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ ทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมบริลเลียนต์กรีนโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน โดยมีตัวแปรคือ พีเอชของเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่มีค่า 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 พีเอชของสีย้อมบริลเลียนต์กรีนซึ่งมีค่า 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 และ ระยะเวลาสัมผัส ผลการทดสอบแสดงว่า เจลที่เตรียมในทุกสภาวะพีเอชสามารถกำจัดสีย้อมบริลเลียนต์กรีนออกจากสารละลายแต่ละพีเอชได้เป็นอย่างดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดอยู่ในช่วงร้อยละ 84.05 - 92.25 การดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นในสารละลายสีย้อมมีพีเอช 5.0 และเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 โดยมีระยะเวลาสัมผัสนาน 90 นาที จากนั้นประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายสีย้อมบริลเลียนต์กรีนเพิ่มขึ้น การดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนินทั้งหกสภาวะพีเอช เกิดขึ้นแบบขั้นเดียว เป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่อธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับมากที่สุดมีค่าระหว่าง 0.26 - 105.26 มิลลิกรัมต่อกรัม



57311320 : Major (ENVIRONMENTAL SCIENCE)

Keyword : adsorption Brilliant Green condense tannin gel pH

MISS SIRIWAN SOMJIT : INFLUENCE OF CONDENSED TANNIN GEL'S PH ON THE ADSORPTION OF BRILLIANT GREEN DYE THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. NOPAWAN RATTASUK

The objective of this study is to find optimal conditions for the adsorption of Brilliant Green dye (BG) using condensed tannin gel (TG). Tested conditions include pHs of TG that are 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 and 12.0; pH of BG solution which are 5.0 6.0 7.0 and 8.0; and the contact time. Results show that BG in any solution pHs is effectively removed by TG prepared in all pH conditions. The BG removal efficiencies are in the range of 84.05% - 92.25%. The highest adsorption efficiency is observed when the condition includes BG solution pH of 5.0 and TG pH of 12.0, with a contact time of 90 minutes. Beyond that, the dye removal efficiency is decreased as pH of the BG solution increases. Adsorption of BG onto surface of all six TG samples occurs as monolayer via a physical adsorption process. All of them are best described by the Langmuir isotherm. The maximum BG adsorption capacities of TGs are in the range of 0.26 - 105.26 mg/g.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ รัตสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ทำให้ผู้วิจัยได้หัวข้อในการทำวิทยานิพนธ์ และกรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้วิจัย ได้ให้ข้อมูล คำแนะนำ ความช่วยเหลือ แรงกระตุ้นในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนสละเวลาอันมีค่าตรวจสอบความถูกต้องของงานผู้วิจัยด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ดาวรุ่ง สังข์ทอง ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และดูแลความเรียบร้อยระหว่างปฏิบัติงานวิจัย และอาจารย์ ดร. ยศกิต เรืองทวีป กรรมการกิตติมศักดิ์ ที่ให้คำแนะนำ และตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อมคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่าน อันผู้วิจัยมิได้เอ่ยนาม ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ ความรู้และความช่วยเหลือด้านต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณปวีณา บุศตา ที่คอยให้ความช่วยเหลืองานวิจัยด้านการปฏิบัติ การดำเนินงานต่างๆ การนำข้อมูลลง thesis ตั้งแต่ต้นจนจบงานวิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ลำไย สมจิตต์ พี่สาว และน้องๆ ที่ช่วยสนับสนุนในด้านการศึกษแก่ผู้วิจัย ให้ความรัก ความเข้าใจและกำลังใจสำคัญจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงลงได้

ศิริวรรณ สมจิตต์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 สีย้อม.....	4
2.2 ลักษณะของสีย้อม.....	4
2.3 สีย้อมปริลเลียนต์กรีน (Brilliant green).....	6
2.3.1 ลักษณะทั่วไป .....	6
2.3.2 ชื่อทางการค้าอื่น ๆ.....	6
2.3.3 คุณสมบัติและความเป็นพิษ .....	6
2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน .....	7
2.5 การดูดซับ (Adsorption).....	8
2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ.....	8
2.5.2 ลักษณะการดูดซับ .....	9



2.5.3 สมดุลของการดูดซับ (Equilibrium adsorption) .....	11
2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ .....	14
2.6 สีเสียดเทศ .....	16
2.7 แทนนิน (Tannin) .....	18
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 แผนการศึกษา.....	29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	30
3.3 การสกัดแทนนินจากสีเสียดเทศ .....	30
3.4 การเตรียมเจลคอนเด็นซ์แทนนิน .....	30
3.5 สีย้อม .....	31
3.5.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม .....	31
3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสีย้อม .....	31
3.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม.....	31
3.6.1 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส .....	31
3.6.2 การศึกษาอิทธิพลของพีเอชของเจลคอนเด็นซ์แทนนินต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม .....	32
3.6.3 การหาค่าไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน .....	32
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
4.1 อิทธิพลของพีเอช ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม .....	34
4.2 ไอโซเทอมการดูดซับ .....	49
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ .....	54
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55
รายการอ้างอิง .....	57



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี .....	10
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของสี่เสียดเทศ .....	17
ตารางที่ 3 Adsorption isotherm parameters ของการดูดซับ .....	51



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างกลุ่มไฮดรอกซิลเมเทน.....	5
ภาพที่ 2 โครงสร้างของบริลเลียนต์กรีน.....	7
ภาพที่ 3 การเคลื่อนตัวของตัวดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ.....	9
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของ Langmuir adsorption isotherm.....	13
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของ Freundlich adsorption isotherm.....	14
ภาพที่ 6 ขนาดอนุภาคของตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ.....	15
ภาพที่ 7 ลักษณะเครื่องยาสีเสียดเทศ.....	18
ภาพที่ 8 โครงสร้างของแทนนิน.....	19
ภาพที่ 9 โครงสร้างของคอนเด็นซ์แทนนิน A-ring : R1=OH, R2=H, Phloroglucinolic ; R1=R2=H, Resorcinolic ; R1=H, R2=OH, Pyrogallolic. B-ring : R3=H, Catecholic ; R3= OH, Pyrogallolic..	21
ภาพที่ 10 แผนผังการทดลอง.....	29
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายสี้อมบรินเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 และ เจลคอนเด็นซ์แทนนิน (TG) พีเอช (a) 2.0 (b) 4.0 (c) 6.0 (d) 8.0 (e) 10.0 และ (f) 12.0 ในการดูดซับสี้อมบรินเลียนต์กรีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร.....	37
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสี้อมบรินเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช (a) 2.0 (b) 4.0 (c) 6.0 (d) 8.0 (e) 10.0 และ (f) 12.0 ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 – 9 ชั่วโมง ในการดูดซับสี้อมบรินเลียนต์กรีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร.....	41
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสี้อมบรินเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน พีเอช 2.0.....	43
ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสี้อมบรินเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน พีเอช 4.0.....	44

ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน  
 พีเอช 6.0 ..... 45

ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน  
 พีเอช 8.0 ..... 46

ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน  
 พีเอช 10.0 ..... 47

ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน  
 พีเอช 12.0 ..... 48

ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงของสี Phenolphthalein เปลี่ยนสีไปมาได้ระหว่างไม่มีสีและสีชมพูเข้ม  
 ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ  $H^+$  และ  $OH^-$  ในสารละลาย (ในวงสีแดง) ..... 55

ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงสีของ Methylene blue จากรูปที่มีสีน้ำเงินกลายเป็นไม่มีสี ..... 56



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตสิ่งทอต้องใช้น้ำปริมาณมากในเกือบทุกขั้นตอน จึงเกิดน้ำทิ้งปริมาณมาก และในบรรดาน้ำทิ้งจากขั้นตอนต่าง ๆ น้ำทิ้งจากการย้อมผ้าจะมีสีและสารเคมีตกค้างอยู่เป็นจำนวนมาก เพราะการทำปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมกับเส้นใยมักจะเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) สีย้อมในน้ำทิ้งบางชนิดมีความเป็นพิษสูง เช่น สีย้อมบิลเลียดกรีน สีชนิดนี้มีความเป็นพิษต่อมนุษย์ โดยลดการสร้าง RNA และโปรตีนในสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ยังเป็นสารก่อมะเร็ง(จิวรรณ สังดวงยาง, อ้อมใจ หนูเพ็ง, & มณฑล เลิศคณาวณิชกุล, 2555) น้ำทิ้งที่มีสีย้อมปนเปื้อนหากบำบัดอย่างไม่ถูกวิธีก่อนจะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม อาจไปสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้เป็นเวลานาน นอกจากนี้คุณภาพของสีบางชนิดจะไปกีดกั้นการกระจายแสงลงสู่แหล่งน้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของระบบนิเวศในน้ำตามมา และอาจทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย และทำให้สัตว์น้ำตาย สีย้อมยังทำให้แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ขาดความสวยงาม เกิดสภาพที่ไม่น่าดูหรือที่เรียกว่า มลพิษทางสายตา จากปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งก่อนที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งทอ มีหลายอย่าง แบ่งออกเป็น (1) วิธีทางชีวภาพ เช่น การย่อยสลายโดยจุลชีพในระบบเลี้ยงตะกอนเร่ง เป็นการลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำส่วนใหญ่ลง ทำให้ค่าบีโอดีและซีโอดีลดลง แต่มักจะไม่สามารถกำจัดสีย้อมที่ปนมากับน้ำทิ้งได้ นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดยังเป็นพิษต่อจุลชีพในระบบบำบัด (วนิดา ชูอักษร, 2555) (2) วิธีทางเคมี เช่น การสร้างและรวมตะกอน การออกซิเดชันทางเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน สามารถกำจัดสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ แต่ไม่มีผลกับสีย้อมที่ละลายน้ำได้ เหมาะกับน้ำเสียปริมาณไม่มากนัก วิธีนี้จะทำให้เกิดกากตะกอน ซึ่งอาจเป็นอันตราย ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากตะกอนต่อไป (3) วิธีทางกายภาพ เช่น การดูดซับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง เนื่องจากสามารถกำจัด สี กลิ่น สารแขวนลอยต่าง ๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก ดูแลง่าย ตัวดูดซับบางชนิดสามารถนำไปฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ได้อีก (พิพัฒน์ พิทักษ์สุธีพงศ์, 2547)

วัสดุธรรมชาติหลายชนิดเป็นวัสดุดูดซับที่ดี มีต้นทุนการผลิตต่ำ จึงมีการนำมาใช้ในการบำบัดสารมลพิษหลายชนิด รวมทั้งสีย้อม เจลคอนเด็นซ์แทนนินเป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งได้แก่ คอนเด็นซ์แทนนิน เป็นโพลีเมอร์ธรรมชาติที่มีราคาไม่แพงและมีจำหน่ายในท้องตลาด และในปัจจุบันมีการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Thakur & Choubey, 2014)

คอนเด็นซ์แทนนินเป็นพฤษเคมีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีโครงสร้างสลับซับซ้อนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพวก ฟิเอนolic มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน สารชนิดนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ใน

อุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมพอกหนัง การทำน้ำหมึกพิมพ์ การย้อมสีด้ายและผ้า ทำกาวย เครื่องสำอาง และยารักษาโรค คอนเด็นซ์แทนนินดูดซับโลหะได้ดี แต่สารประกอบชนิดนี้ ละลายน้ำได้ จึงมีข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อแก้ไขปัญหา จึงมีการเชื่อมโยง โมเลกุลของพอลิเมอร์แทนนินเข้าด้วยกัน (Cross-link) เพื่อให้มีโครงสร้างขนาดใหญ่ขึ้น จนอยู่ใน สภาพเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่ไม่ละลายน้ำ

ในการทดสอบของ Akter et al. (2016) ซึ่งศึกษาการกำจัดสีย้อมบิลเลียนด์กรีน โดยใช้ เจลแทนนินที่ไม่ปรับสภาพ และเจลที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารกลุ่มเอมีน ผลการทดลองพบว่า เจลทั้งสองชนิดกำจัดสีบิลเลียนด์กรีนได้ดีที่พีเอช 7.0 โดยเจลปกติสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 88.38 ในขณะที่เจลผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารกลุ่มเอมีนสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94.05 โดยก่อนหน้านั้น Rahman et al. (2014) ได้ทดสอบนำแทนนินจากต้นพลับมาผลิตเป็นเจล โดยใช้ พอร์มาลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent และนำไปดูดซับสีบิลเลียนด์เรด (Brilliant red) ที่ความ เข้มข้นต่าง ๆ และมีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส ปริมาณของตัวดูดซับ ค่าพีเอช และความ เข้มข้นของสารรบกวนอื่น ๆ ผลการทดลองพบว่า ในสารละลายสีที่มีพีเอช 2.0 กระบวนการดูดซับ เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 งานวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็น ว่าพีเอชของสารละลายสี และสถานะของเจลคอนเด็นซ์แทนนินมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม เพื่อขยายองค์ความรู้ในเรื่องการบำบัดสีย้อม งานวิจัยนี้จึงทดสอบว่านอกจากการปรับสภาพด้วยสาร กลุ่มเอมีนแล้ว สถานะความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช) ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่จะมีผลต่อ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมอย่างไร โดยได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์กรีนของเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่เตรียมขึ้นในสถานะพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมโดยการดูดซับด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่เตรียมใน สถานะพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0
2. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่เตรียม ในสถานะพีเอช 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 และ 10.0

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. เจลคอนเด็นซ์แทนนินที่ใช้ในการศึกษาเตรียมจากผงแทนนิน ซึ่งสกัดจากสีเสียดเทศ
2. การเตรียมเจลคอนเด็นซ์แทนนินแต่ละชนิดทำในพีเอชโดยที่มีปัจจัยอื่น ๆ เหมือนกัน สถานะพีเอชที่ต่างกันคือ 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0
3. สีสังเคราะห์ในการศึกษา คือ สีย้อมบิลเลียนด์กรีน
4. ศึกษาประสิทธิภาพของเจลคอนเด็นซ์แทนนินแต่ละชนิด ในการดูดซับสารละลายสีย้อม บิลเลียนด์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 และ 10.0

5. ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ โดยใช้สารละลายสี้อมบิลเลียนท์กรีนในสภาวะพีเอชที่  
เจลดอนเด็นซ์แทนนินแต่ละชนิดดูดซับได้ดีที่สุด





## บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 สีย้อม

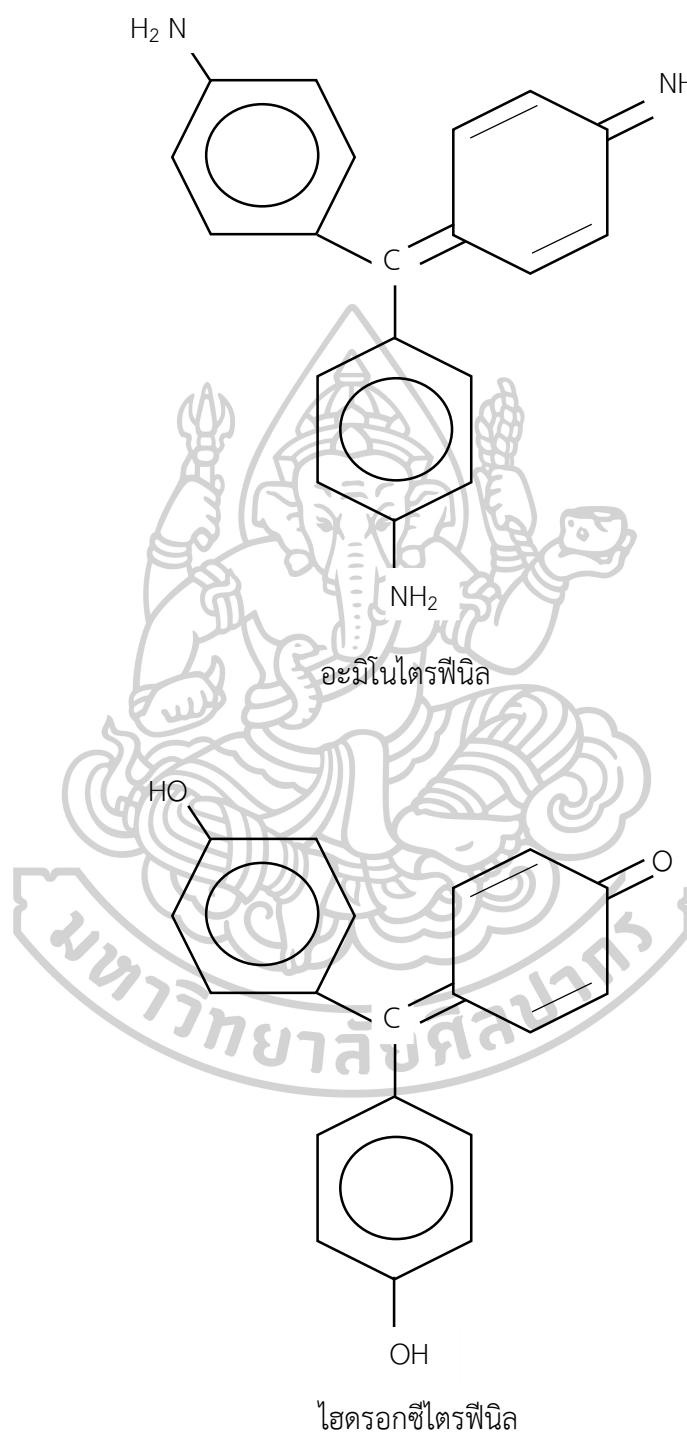
สีย้อม คือสารที่ให้สี สามารถละลายน้ำได้ หรือทำให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ ดูดติดเส้นใย ทำให้ปรากฏสีแก่สายตาคนปกติมองเห็นได้ การเกิดสีเกิดมาจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุลของสีย้อม ได้แก่ กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ (Chromophore) กลุ่มอะตอมต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) โดยดูดกลืนแสงสีขาวยุ่บางแถบแสง และปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีที่แตกต่างกันออกไป (เป็นสยาม ภูมิพาณิชย์, 2546) กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochrome) เป็นกลุ่มอะตอมที่รับหรือให้อิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของสีย้อม ทำให้สีย้อมยึดติดกับเส้นใย และกลุ่มอะตอมโครมาเจน (Chromagen) เป็นโมเลกุลสีที่ขาดกลุ่มอะตอมออกโซโครม จะทำให้คุณสมบัติในการยึดติดกับเส้นใยลดลง (พงษ์ศักดิ์ ชาวอินทร์, 2555)

### 2.2 ลักษณะของสีย้อม

สีที่นำมาใช้ในการย้อมสีมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด สามารถจำแนกตามการใช้งาน ได้แก่ สีดีสเพอร์ส สีแอซิด สีย้อมอะโซอิก สีย้อมไคโรส สีย้อมมอแดนท์ สีย้อมแวท สีย้อมซัลเฟอร์ สีย้อมรีแอคทีฟ สีเบสิกหรือสีแคทไอออน การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาใช้ในการย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำโดยสามารถทำให้เกิดสถานะเช่นนี้ขึ้นได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (Substativity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะ (Bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้กว้าง ๆ ว่าแรงกระทำหรือพันธะที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้ คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals' forces) แรงไอออน (Ionic force) พันธะโคเวเลนต์ (Covalent bond) แรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด คือ พันธะโคเวเลนต์ การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใย นอกจากเกิดจากแรงกระทำหรือพันธะแล้วรูปร่างและขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมาก เช่น โมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมาก ๆ จะทำให้การติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น เป็นต้น

สีเบสิกหรือสีแคทไอออน (Basic or cationic dyes) เป็นสีที่สดใสที่สุดในกลุ่มสีสังเคราะห์ไม่ทนแสง ละลายน้ำได้ มีกลุ่มอะมิโนหรืออนุพันธ์ของกลุ่มอะมิโน ละลายในสารละลายกรด ไม่ละลายในสารละลายเบส (ศานิต ไชยยะ, 2547) กลุ่มของสีย้อมจะเป็นไดและไตรเอริลคาร์บอเนียม (Di- and

tri-arycarbonium) ซึ่งในโครงสร้างจะมีกลุ่มไตรเอริลมีเทน (Triarylmethane) (อรุณี คงดี อัลเดร, 2558) ดังแสดงตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างกลุ่มไตรเอริลมีเทน  
ที่มา: อรุณี คงดี อัลเดร (2558)

สีย้อมเบสิกจะเกิดการติดติด (Substantivity) โดยตรงกับไหมและขนสัตว์ สามารถย้อมเส้นใยสังเคราะห์ได้บางชนิด แต่ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่ติดเลย ต้องใช้สารช่วยย้อม (Mordant) เช่น ใช้กรดแทนทานิคในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสให้สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีก่อน เพื่อทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สีย้อมเบสิกที่นิยมใช้ย้อมไหมและขนสัตว์ คือ สีย้อมบริลเลียนต์กรีน (Brilliant green) และสีย้อมเมทิลไวโอเล็ต (Methy violet) (รัชณี ทรัพย์มากมี, 2548) สีย้อมชนิดนี้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ให้ประจุบวก บางครั้งจึงเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน เมื่อแตกตัวในน้ำโมเลกุลสีจะมีประจุบวก สามารถย้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของสีจะจับกับประจุลบของเส้นใย (เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ, 2547) สีย้อมเบสิกสามารถนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์กระดาษคาร์บอนสำหรับทำกระดาษสำเนา หรือใช้สำหรับผลิตเป็นแถบหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ดีด และยังสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อใช้ผลิตหมึกเขียนและหมึกพิมพ์อีกด้วย

## 2.3 สีย้อมบริลเลียนต์กรีน (Brilliant green)

### 2.3.1 ลักษณะทั่วไป

บริลเลียนต์กรีน หรือ มาลาไคต์กรีน เป็นผงสีเขียว ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายสีเขียวอมฟ้า มีสูตรทางเคมี  $C_{23}H_{25}N_2$  บริลเลียนต์กรีน ที่ใช้กันปัจจุบันมีอยู่ 2 รูป คือ รูปของมาลาไคต์กรีน ออกซาเลต (Malachite green oxalate) และรูปของมาลาไคต์กรีน ไฮโดรคลอไรด์ (Malachite green hydrochloride)

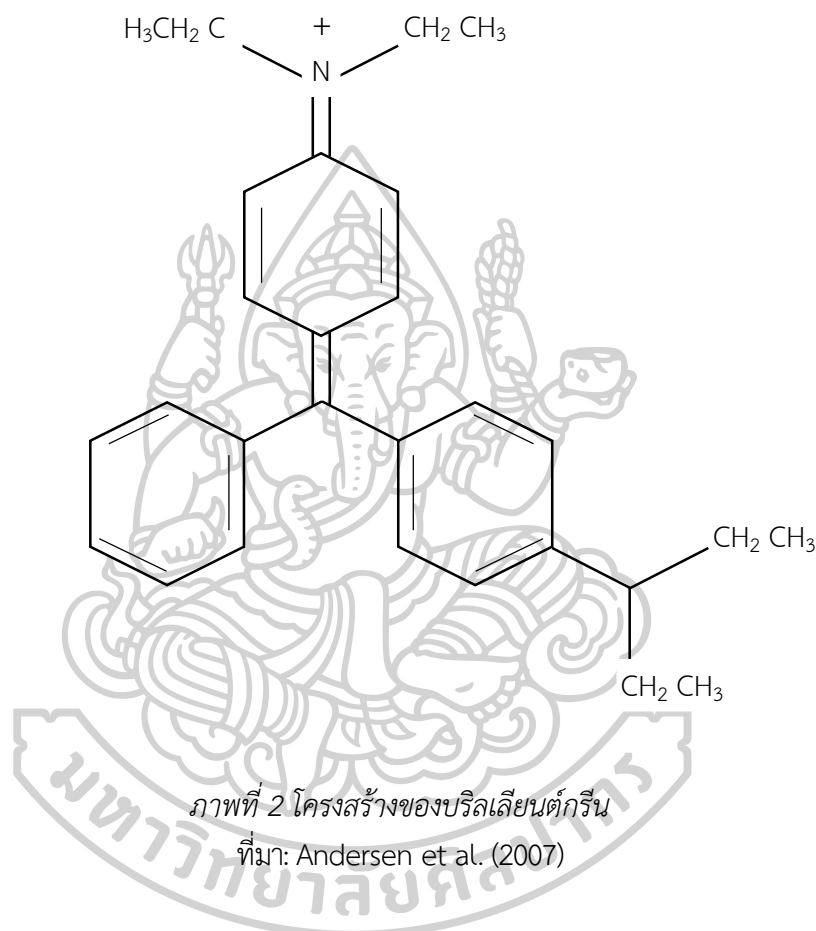
### 2.3.2 ชื่อทางการค้าอื่น ๆ

มาลาไคต์กรีน (Malachite green) วิคทอเรียกรีน (Victoria green) แอนิลีนกรีน (Aniline green) เบนซัลดีไฮด์กรีน (Benzaldehyde green) ไชนากรีน (China green) ไดมอนด์กรีน (Diamond green)

### 2.3.3 คุณสมบัติและความเป็นพิษ

บริลเลียนต์กรีน เป็นสีสังเคราะห์ มีโครงสร้างดังแสดงตามภาพที่ 2 ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่าง ๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ฝ้าย และกระดาษ บริลเลียนต์กรีนมีความเป็นพิษโดยตรงต่อปลาและเป็นสารก่อมะเร็ง เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนรูปไปเป็นลูโคมาลาไคต์กรีน (Leucomalachite) ที่ไม่มีสี หากถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะถูกดูดซึมเข้าสู่ปลาได้อย่างรวดเร็ว และถูกสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อปลา พบมากที่บริเวณไขมันในช่องท้อง พบน้อยในน้ำเลือด เนื่องจากแพร่กระจายไปได้อย่างกว้างขวางทั่วทุกเนื้อเยื่อของปลา อัตราการดูดซึมขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ ส่งผลให้เกิดการเนื้อมันในการเกิดเนื้องอก และสามารถก่อมะเร็งที่ต่อมไทรอยด์ ตับ ในสัตว์น้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความผิดปกติทางพันธุกรรมในสัตว์น้ำ โดยการเพิ่มความยาวของสาย DNA การพัฒนาของตัวอ่อนหลังฟักออกจากไข่ มีความผิดปกติไปจากเดิมถึง 3 – 5 เท่า เป็นพิษโดยตรงต่อระบบหายใจของสัตว์น้ำและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเลือด ระดับ

แคลเซียมและโปรตีนในเลือดลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นพิษอย่างรุนแรงต่อพืชน้ำ สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ทั้งน้ำจืดและน้ำทะเล ความเป็นพิษต่อมนุษย์ จะส่งผลกระทบต่อระบบการหายใจ ทำให้เกิดอาการวิงเวียน ศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน หากสะสมอยู่ในร่างกายมากเกินไป จะทำให้เป็นอัมพาตที่แขน ขา ส่งผลกระทบต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (สุนีรัตน์ เรื่องสมบุรณ์ & ปวีณา ทวีกิจการ, 2557)



#### 2.4 การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน

น้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีลักษณะที่แตกต่างกันตามชนิดของเส้นใยและสีย้อมที่ใช้ ในกระบวนการย้อม และชนิดของกระบวนการย้อม โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีลักษณะสำคัญ คือ มีปริมาณสารอินทรีย์สูง สามารถดูได้จากค่า BOD (Biological oxygen demand) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งจะมีค่าอยู่ประมาณ 100 - 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า COD (Chemical oxygen demand) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความสกปรกของน้ำเสีย โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ จะมีค่าอยู่ประมาณ 500 - 1200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียที่มีสีย้อม จะมีความเข้มข้นของสี

สูง ซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยสลายที่เส้นใยดูดซับสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นสีย้อมที่หลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้ง ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5 - 50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ สีในน้ำทิ้งมีผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้พบเห็น แม้ว่าค่า BOD ของน้ำหลังผ่านการบำบัดจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแล้ว แต่ยังคงจัดว่าเป็นน้ำเสียอยู่ดี

การบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการลดปริมาณสารมลพิษที่ละลายหรือกระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย โดยการแยกหรือทำให้เกิดการสลายตัว ซึ่งสารมลพิษในน้ำเสียจะสามารถถูกกำจัดไปได้บางส่วนจากการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีย้อม

## 2.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์การสะสมของอนุภาคที่มีองค์ประกอบหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอนุภาคบนพื้นผิวของสารที่ทำการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่มีลักษณะของรูพรุน องค์ประกอบของการดูดซับประกอบด้วย ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และตัวดูดซับ (Adsorbent) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals) หรือด้วยแรงทางเคมี หรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดซับแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารอินทรีย์ ถ่านกัมมันต์ และสารอินทรีย์สังเคราะห์ (ปณิตา สาลี, 2547)

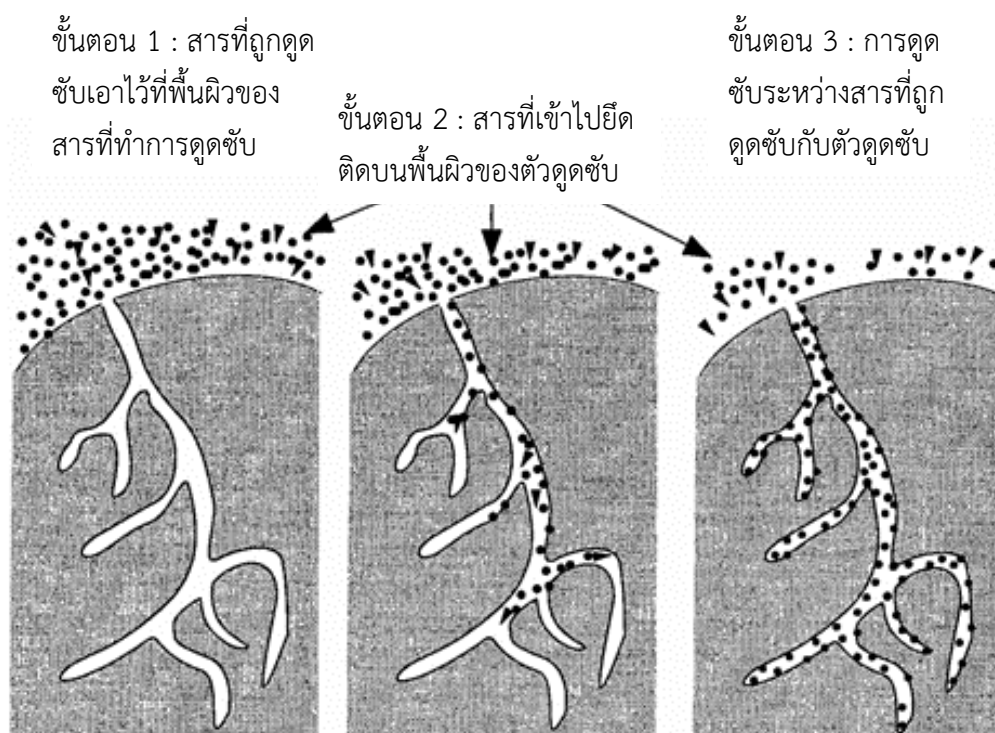
### 2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าที่อยู่ระหว่างสาร 2 สถานะ (รัชนีทรัพย์มากมี, 2548) เช่น ของเหลวกับของแข็ง ก๊าซกับของเหลว และก๊าซกับของแข็ง โดยมีการสะสมสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่า Adsorbate สารที่พื้นผิวเกิดการดูดซับ (ฐิติภรณ์ ปรางเทศ, 2554) ใช้เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ รวมถึงสารที่ก่อให้เกิดรา กลิ่น ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการบำบัดขั้นที่ 3 สำหรับการกำจัดมลสารที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งมีกลไกในการดูดซับดังแสดงตามภาพที่ 3 คือ

1) ตัวดูดซับ (Adsorbent) เป็นวัตถุที่จับเก็บสารที่จะถูกดูดซับเอาไว้ที่พื้นผิวของสารที่ทำการดูดซับ (Diffusion to adsorbent surface) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัตถุที่มีลักษณะของรูพรุน ปกติมีอยู่ตามธรรมชาติ แต่ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์ตัวดูดซับตามคุณสมบัติที่ต้องการได้

2) สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) เป็นสารที่จะเข้าไปยึดติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (Migration into pores of adsorbent) มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าขนาดของรูพรุนในตัวดูดซับ

3) การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับตัวดูดซับ เกิดเร็วมากและอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน (สนธิรัตน์ กลั่นกรอง, 2547)



ภาพที่ 3 การเคลื่อนตัวของตัวดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ  
ที่มา: รัฐติภรณ์ ปรางเทศ (2554)

## 2.5.2 ลักษณะการดูดซับ

กระบวนการดูดซับแบ่งแยกออก ดังนี้

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption or physisorption) เป็นการดูดซับโดยการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับด้วยแรงค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) แรง ไดโพลกับไดโพล (Dipole – dipole forces) เป็นต้น (รัชณี ทรัพย์มากมี, 2548) โดยที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม ตัวดูดซับที่มีความพรุนสูง ของเหลวหรือแก๊สที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของระบบจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เกิดการผันกลับ (Reversible interaction) (สุกานดา กาสังข์, 2548) ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนออกจากตัวดูดซับนั้น และเรียกปรากฏการณ์ช่วงนี้ว่า Desorption

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการดูดซับ โดยการสร้างสารประกอบใหม่ระหว่างตัวถูกดูดซับกับหมู่

ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับนั้น และเนื่องจากการดูดซับเกิดเฉพาะบนพื้นผิวบางแห่ง ทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยกว่าการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับแบบนี้จะไม่สามารถเกิด Desorption ได้ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสถานะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าองค์ประกอบบางชนิดที่อุณหภูมิปกติจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ (ฐิติภรณ์ ปรางเทศ, 2554)

ในตารางที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ไม่มีการแตกตัวของชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	1. อาจเกี่ยวข้องกับการแตกตัว
2. ไม่มีการถ่ายเทหรือการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกัน อย่างไรก็ตามอาจเกิดภาวะรังสีของแสงซึ่งมีการสั่นในระนาบเดียวเท่านั้นของตัวถูกดูดซับ	2. เกิดการถ่ายเทไอเล็กตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้า
3. มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่ำเท่านั้น	3. อาจเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ
4. เกิดอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการกระตุ้น สามารถผันกลับได้ในสถานะอุณหภูมิเดียวกัน	4. เกิดการกระตุ้น อาจเกิดได้ช้า ผันกลับไม่ได้
5. สามารถเกิดได้ทั่ว ๆ ไปบนพื้นผิวตัวดูดซับไม่มีบริเวณจำเพาะ	5. จะเกิดในบริเวณจำเพาะเท่านั้น
6. ในการเกิดกระบวนการดูดซับภายใต้สภาวะความดัน และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการดูดซับหลายชั้นได้	6. จะเกิดแบบชั้นเดียวเท่านั้น
7. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับจะน้อยกว่า (<2 หรือ 3 เท่า ของความร้อนแฝงของการระเหย)	7. ความร้อนที่ได้จากการดูดซับจะมากกว่า (>2 หรือ 3 เท่า ของความร้อนแฝงของการระเหย)

ที่มา: รัชณี ทรัพย์มากมี (2548)

### 2.5.3 สมดุลของการดูดซับ (Equilibrium adsorption)

เมื่อเกิดการดูดซับ ตัวถูกละลายจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับจะดำเนินไปเรื่อย ๆ แต่จะไม่ได้ค่า Maximum capacity เพราะมีผลของการถ่ายเทมวลสารเข้ามาเกี่ยวข้องกับ การสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง ทำให้ตัวถูกละลายเกิดการดูดซับและการคายการดูดซับไปพร้อม ๆ กัน จนกระทั่งอัตราการดูดซับ (Adsorption) เท่ากับอัตราการคายซับ (Desorption) ซึ่งเรียกว่าระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับ (Equilibrium adsorption) ที่อุณหภูมิคงที่ ณ ภาวะสมดุลนี้ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ สามารถอธิบายสมดุลที่เกิดขึ้นด้วยไอโซเทอมของการดูดซับ (สร้อยดาว วินิจ นันทรัตน์ & เฉลิมขวัญ ชางปิง, 2548)

#### 1) ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

สมดุลของการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) เคลื่อนย้ายจากน้ำเข้ามายังตัวดูดซับ (Adsorbent) จนกระทั่งความเข้มข้นของ Adsorbate ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นใน Adsorbent ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ นั้นเราใช้ Adsorption isotherm เป็นตัวแทน ในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น Adsorption isotherm คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของ Adsorbent และความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ แล้วนำไปสร้างกราฟ ลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอน และปริมาณสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนัก Adsorbent เป็นแกนตั้ง เส้นที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำ และเพื่อเปรียบเทียบชนิด Adsorbent ที่ดีที่สุด Adsorption isotherm มีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่นำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ Langmuir adsorption isotherm และ Freundlich adsorption isotherm

1.1) Langmuir adsorption isotherm แลงเมียร์ (Langmuir) ได้เสนอแบบจำลองการดูดซับและการคายซับของก๊าซจากผิวของแข็ง เพื่ออธิบายการดูดซับเชิงปริมาณ (Quantitative) ไว้ ซึ่งอันที่จริงแบบจำลองของ Langmuir นั้นพัฒนาสำหรับการดูดซับเชิงเคมี แต่ก็มี การประยุกต์ใช้สำหรับการดูดซับเชิงกายภาพด้วย เนื่องจากอุณหภูมิมิผลอย่างมากต่อการดูดซับ ข้อมูลการดูดซับมักรายงานออกมาในรูปของไอโซเทอมการดูดซับแบบจำลองของแลงเมียร์จึงมีชื่อเรียก Langmuir adsorption isotherm โดยมีสมมติฐานที่สำคัญของแบบจำลองแลงเมียร์ ดังนี้

(1) ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทุกจุดมีความสามารถในการดูดซับได้เท่าเทียมกัน

(2) โมเลกุลที่ดูดซับอยู่ไม่ทำปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน

(3) การดูดซับเกิดขึ้นจากกลไกที่เหมือนกัน และสารที่ดูดซับมีโครงสร้างเหมือนกัน



## (4) การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียวบนผิวของแข็ง

Langmuir adsorption isotherm มีสมการ ดังนี้

$$x = \frac{abC}{1 + bC} \quad \text{สมการที่ 1}$$

จากสมการที่ 1 เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{a} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ

$x$  คือ ปริมาณมลสาร (Adsorbate) ที่ถูกจำกัด  $= (C_0 - C) V$

$m$  คือ ปริมาณตัวดูดซับ (Adsorbent)

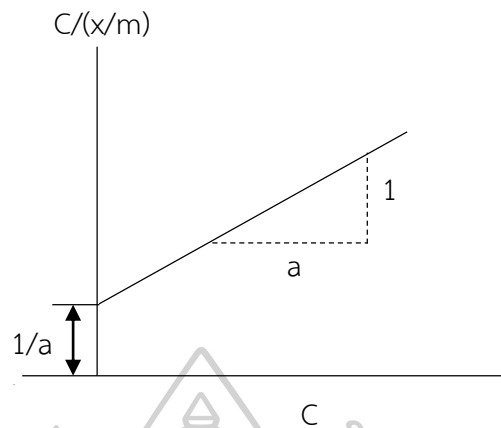
$C_0$  (มิลลิกรัมต่อลิตร) คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของมลสารก่อนผ่านการดูดซับ

$C$  (มิลลิกรัมต่อลิตร) คือ ความเข้มข้นของมลสารหลังจากการดูดซับ

$V$  (ลิตร) คือ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

$a, b$  คือ ค่าคงที่

จากสมการที่ 2 และผลการทดลองการดูดซับที่ได้ สร้างกราฟระหว่าง ค่า  $C$  และ  $C/(x/m)$  ในกระดาษกราฟธรรมดา ดังแสดงตามภาพที่ 4 สำหรับการคำนวณค่า  $a$  และ  $b$  สามารถหาได้จากค่าความชัน และจุดตัดแกน  $y$  ของเส้นกราฟดังกล่าว



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของ Langmuir adsorption isotherm

ที่มา: สร้อยดาว วินิจนันทรัตน์ & เฉลิมขวัญ ช่างปิง (2548)

ค่า  $a = 1/\text{slope}$

Intercept =  $1/ab$

1.2) Freundlich adsorption isotherm ฟรอนด์ลิช (Freundlich) ได้พัฒนาสมการไอโซเทอมซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในน้ำเสีย สมการของ Freundlich adsorption isotherm มีดังนี้

$$\frac{x}{m} = K_f C^n$$

สมการที่ 3

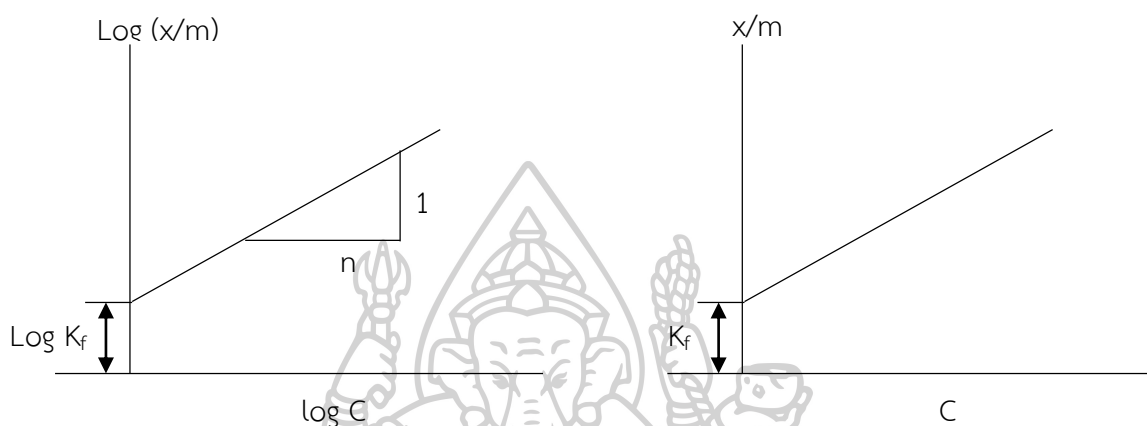
เมื่อ  $K_f, n =$  ค่าคงที่

จากสมการที่ 3 ทำให้อยู่ในรูปของ Logarithm ได้ดังนี้

$$\log \frac{x}{m} = \log K_f + \frac{1}{n} \log C$$

สมการที่ 4

จากสมการที่ 4 และผลการทดลองการดูดซับที่ได้สามารถสร้างกราฟระหว่างค่า  $\log C$  และ  $\log (x/m)$  ในกราฟธรรมดา หรือพล็อตค่า  $C$  และ  $(x/m)$  ในกระดาษกราฟ Log - log เพื่อนำกราฟเส้นตรงที่ได้ไปคำนวณค่าคงที่ ดังแสดงตามภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของ Freundlich adsorption isotherm

ที่มา: สร้อยดาว วินิจนันท์ & เฉลิมขวัญ ช่างปิง (2548)

Slope =  $1/n$

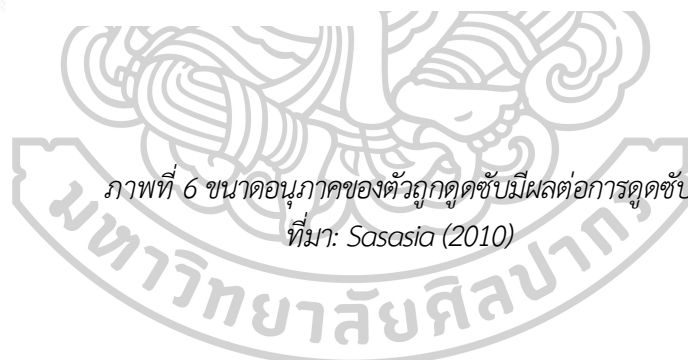
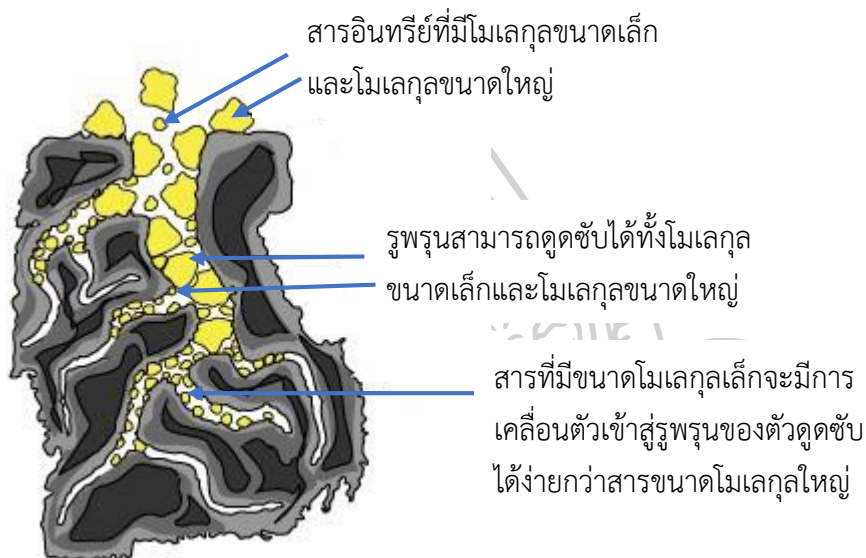
Intercept =  $\log K_f$

#### 2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area) พื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ โดยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ กล่าวคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมสามารถดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (สกุรัตน์ รัตนายน, 2551)

2) ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of adsorbent) การดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกดึงออกจากตัวทำละลาย และไปเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่อการดูดซับอีกด้วย เพราะการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารที่ถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัว

ดูดซับเพียงเล็กน้อย เนื่องจากจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างสาร และตัวดูดซับมากที่สุดจึงทำให้สารขนาดเล็กนี้ ถูกดูดเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับก่อน จากนั้นสารขนาดใหญ่จึงจะถูกดูดเข้าสู่รูพรุนเป็นลำดับต่อมา (สุธาทิพย์ ผลไสว, 2557) ดังแสดงตามภาพที่ 6



3) ความเร็วในการผสม (Mixing speed) อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับความเร็วในการผสมของระบบ และมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ถ้าน้ำมีความเร็วในการผสมสูง จะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลงโมเลกุลของตัวดูดซับจึงเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว

4) เวลาสัมผัส (Contact time) เวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

5) ค่าพีเอช (pH) ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบท่อการดูดซับ สารละลาย ถ้าค่าพีเอชลดลงอัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออน และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบท่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ ไฮโดรเนียมไอออน ( $H^+$ ) ที่เพิ่มมากขึ้น ยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลาง (Neutral) เสมอ เนื่องจากคาร์บอนเป็นนอนโพลาร์ค่อนข้างจะลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลนอนโพลาร์ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของคาร์บอนได้ดีขึ้น (ศานิต ไชยยะ, 2547)

6) อุณหภูมิมีผลต่อการดูดซับอย่างมาก ถ้าอยู่ในสถานะของเหลวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายจะทำให้อัตราเร็วของตัวถูกดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิอาจส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับลดลง และจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เพราะการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (ปณิตา สาลี, 2547)

## 2.6 สีเสียดเทศ

สีเสียดเทศเป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยาคล้ายกับสีเสียดไทย คือใช้สำหรับบรรเทาอาการท้องร่วง รักษาแผล และห้ามเลือดได้ มีชื่อเรียกท้องถิ่นคือ สีเสียดแขก ชื่อภาษาอังกฤษคือ Pale catechu, Gambir catechu หรือ Gambir ชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Uncaria gambir (Hunter) Roxb.* เป็นพืชในวงศ์ Rubiaceae ลักษณะทั่วไป สีเสียดเทศเป็นไม้เลื้อย ใบเป็นใบเดี่ยวจัดเรียงตัวแบบตรงข้าม ใบรูปไข่ ดอกเป็นช่อ กระจุกแน่น ช่อดอกกลม ออกดอกตามซอกใบ กลีบเลี้ยงเชื่อมติดกันเป็นหลอดรูปทรงกระบอก กลีบดอกมีสีแดง เชื่อมติดกันเป็นหลอดยาวประมาณ 1.25 เซนติเมตร ผลเป็นรูปกระสวย องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของสีเสียดเทศ ส่วนใหญ่เป็นสารกลุ่มแทนนิน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของสีเสียดเทศ

องค์ประกอบ	ส่วนประกอบภายใน	ร้อยละ
ทางเคมี	สารกลุ่มแทนนิน <ul style="list-style-type: none"> <li>● catechutannic acid</li> <li>● acacatechin</li> <li>● epicatechin</li> <li>● phlobatannin</li> <li>● procatechu tannins</li> <li>● pyrogallic tannins</li> <li>● epicatechin-3-O-gallate</li> <li>● epigallocatechin 3-O-gallate</li> </ul>	20 - 35
	สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ <ul style="list-style-type: none"> <li>● chalcane-flavan dimers</li> <li>● gambiridin A1, A2, B1 และ B2</li> <li>● (+) catechin</li> <li>● (+)-epi-catechin</li> <li>● dimeric ของ proanthocyanidins</li> <li>● procyanidin B1</li> <li>● procyanidin B3</li> <li>● gambiridin C</li> </ul>	
	สารกลุ่มอัลคาลอยด์ <ul style="list-style-type: none"> <li>● gambirine</li> <li>● gambirdine</li> <li>● isogambirdine</li> </ul>	
ทางกายภาพ	ปริมาณความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก
	ปริมาณเถ้ารวม	ไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก
	ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรด	ไม่เกินร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก
	ปริมาณสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายในเอทานอล	ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก
	ปริมาณสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายในน้ำ	ไม่เกินร้อยละ 33 โดยน้ำหนัก

ที่มา: ฐานข้อมูลเครื่องยาสมุนไพร (2554)

ก้อนสีเสียด (ภาพที่ 7) ได้จากการนำใบและกิ่งก้านของสีเสียดเทศ มาสกัดด้วยน้ำเดือด กรอง แล้วระเหยแห้ง จะได้สารสีน้ำตาลอ่อน แข็ง เป็นก้อนสีน้ำตาลอ่อน กลิ่นอ่อน รสฝาดและขม

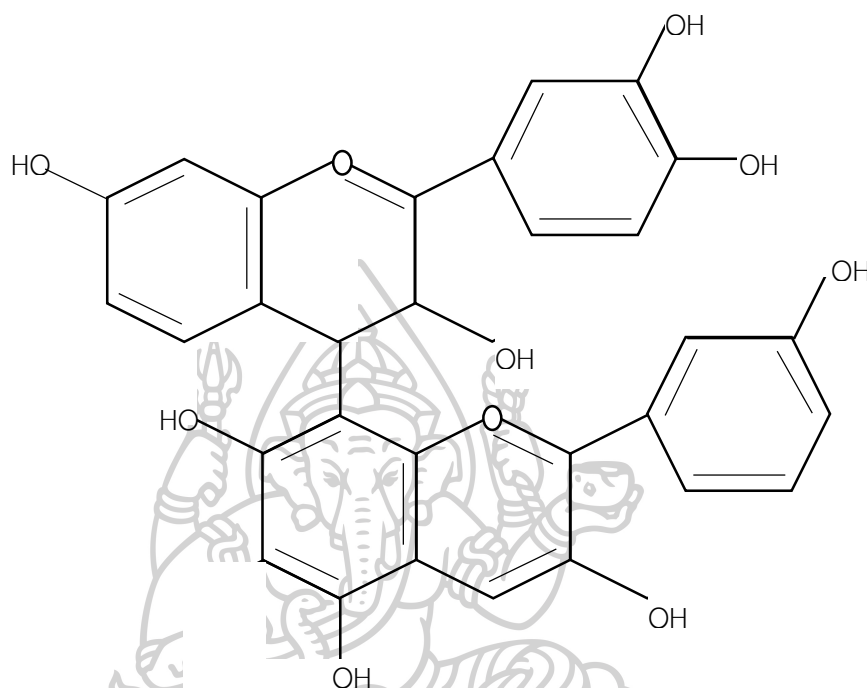


ภาพที่ 7 ลักษณะเครื่องยาสีเสียดเทศ

ที่มา: ศิริมา สุวรรณภู (2556)

## 2.7 แทนนิน (Tannin)

ในสมัยโบราณมีการใช้แทนนินในการฟอกหนังสัตว์ แทนนินสามารถรวมตัวได้กับโปรตีนของหนังสัตว์ ป้องกันไม่ให้เกิดการเน่าเปื่อย ตลอดจนการเปลี่ยนสภาพของหนังดิบสด ๆ ให้กลายเป็นหนังฟอก แทนนินเป็นสารประกอบจำพวกฟีนอลที่ละลายน้ำ มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงตามภาพที่ 8 ซึ่งตกตะกอนกับพวกแอลคาลอยด์ เจลาติน (Alkaloid gelatin) และโปรตีนต่าง ๆ (ปราโมทย์ แพงคำ, 2552)



ภาพที่ 8 โครงสร้างของแทนนิน

ที่มา: ปราโมทย์ แพงคำ (2552)

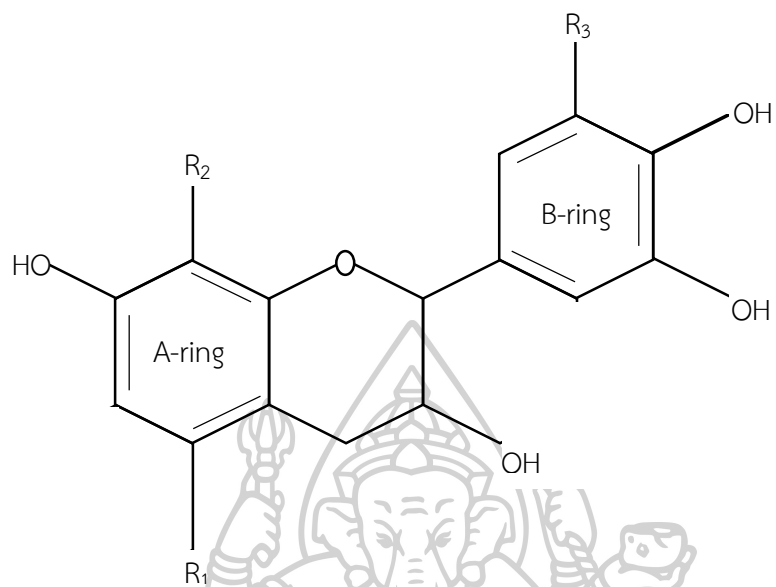
แทนนินพบได้ในพืชหลายชนิด มีโมเลกุลใหญ่ มีโครงสร้างที่ซับซ้อน น้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500-3,000 ดาลตัน มีสถานะเป็นกรดอ่อน รสฝาด เป็นสารให้ความฝาดในพืช พบได้ในพืชหลายชนิดจากราก เปลือก ก้าน ใบ ผล รวมถึงเมล็ด เช่น เปลือกทับทิม เปลือกอบเชย ใบขนุน ใบฝรั่ง เปลือกมังคุด ใบชา ใบพลู ใบชุมเห็ดเทศ เปลือกเมล็ดมะขาม กล้วยดิบ ใบหรือเปลือกสีเสียด ฯลฯ ปริมาณและชนิดของแทนนินขึ้นอยู่กับชนิดของพืช แหล่งปลูก สภาพภูมิอากาศ เกือบแรงแจกธาตุอาหาร อายุของพืช ตัวอย่างพืชชั้นสูงที่มีองค์ประกอบของแทนนินอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูงจะเป็นพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น วงศ์ *Fagaceae*, *Hamamelidaceae*, *mimosaceae*, *Myrtaceae*, *papilionacea*, *Polygonaceae*, *Rosaceae*, *Rubiaceae* และ *Salicaceae* แต่อาจพบในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวได้บ้าง โดยเฉพาะพืชตระกูลปาล์ม (วิภา พลันสังเกตุ, วรากร วิศพันธ์, & สัมพันธ์ พลันสังเกตุ, 2553) สารแทนนินสามารถสกัดออกมาใช้ประโยชน์ได้ง่ายโดยสามารถละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิดทั้งน้ำกลั่น เอทานอล และอะซิโตน สารแทน



นินสามารถช่วยลดอาการท้องเสีย ออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรค ยับยั้งการเจริญของแบคทีเรีย โรคบิด ห้ามเลือด ระวังกลิ่นปาก บรรเทาอาการ พุพองของแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ต้านอนุมูลอิสระ และจากการวิจัยจาก สถาบันวิจัยแห่งชาติญี่ปุ่น แสดงให้เห็นว่า สารเคทีชิน (Catechin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในสารแทนนิน ของชาเขียวสามารถลดอุบัติการณ์ของโรคมะเร็งได้ (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2553)

แทนนินมี 2 ชนิด คือ ไฮโดรไลซ์แทนนิน (Hydrolysable tannins) และคอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannins) ในภาคอุตสาหกรรมได้มีการนำแทนนินไปใช้ประโยชน์ในเครื่องดื่ม เช่น การทำให้ เบียร์ใสและทำให้เกิดรสขม ผาต การแต่งกลิ่นในเครื่องดื่มเบียร์ ไวน์ ชา กาแฟ หรือในด้านการประมงใช้ในการย้อมแห อวนเชือก และเรือใบ ทำให้ทนทานต่อการใช้งานที่สัมผัสกับน้ำเค็ม โดยอาศัยคุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาที่เฉพาะเจาะจงของพินอลกับมาโครโมเลกุล (Macromolecules) ตัวอย่างสารชนิดนี้ เช่น โปรแอนโทไซยานินแทนนิน (Proanthocyanidin tannins) สามารถนำมาใช้ผลิตแผ่นไม้อัดแทนการใช้พินอลสังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี หรือนำมาใช้รับประทานเป็นยาแก้ท้องเสียหรือท้องเดิน (Antidiarrheals) โดยแทนนินมีกลไกไปจับกับฟังก์เจล โปรตีน (Fungal protein) แบคทีเรียโปรตีน (Bacteria protein) หรือไวรัสโปรตีน (Viral protein) หรือมาโครโมเลกุลอื่น ๆ ของเชื้อที่รุกรานทำให้เชื้อไม่สามารถทำอันตรายกับร่างกายได้ นำมาใช้เป็นยาภายนอกในการรักษาแผล โดยแทนนินจะไปจับกับผิวหนังชั้นนอก และเนื้อเยื่อที่ผลิตเมือก (Mucosa) คลุมผิวให้สามารถป้องกันน้ำได้และมีฤทธิ์ทำให้เส้นเลือดหดตัว (Vasoconstrictor) ต่อเส้นเลือดบริเวณผิวหนัง (Superficial vessels) ได้ ทำให้ลดการสูญเสียน้ำจากบาดแผลซึ่งเป็นผลให้เนื้อเยื่อที่เป็นแผลหรือเนื้อเยื่อที่โดนแผลไฟไหม้ หรือน้ำร้อนลวกนั้นซ่อมแซมตัวเองได้ดีขึ้น แผลจึงหายเร็วขึ้น ลดการเกิดอนุมูลอิสระในร่างกาย โดยแทนนินบางชนิดมีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นและยับยั้งการเกิดซูเปอร์ออกไซด์ ไอออน (Superoxide ion) ขึ้นมาใหม่อีกด้วย อาจจะช่วยลดการเกิดมะเร็งต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้แทนนินยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ อีกมากมาย เช่น ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เช่น ลิพอกซีจีเนส (Lipoxygenase), แองจิโอเทนซิน คอนเวอร์ติง เอนไซม์ (Angiotensin converting enzyme)

โครงสร้างสารประกอบโพลีพินอลของคอนเดนส์แทนนิน เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ ดังแสดงตามภาพที่ 9 โดยเฉพาะ Leucoanthocyanidin และ Catechins เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Proanthocyanidins มีคุณสมบัติทั่วไปเหมือนแทนนินชนิดสลายตัวได้ แต่ค่อนข้างจะทำให้แตกตัวหรือสลายตัวได้ยากกว่า ละลายน้ำได้ไม่ดีเท่ากลุ่มไฮโดรไลซ์แทนนิน เมื่อนำมาต้มกับกรดเจือจางหรือนำมาทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ สารประกอบพอลิเมอร์สีน้ำตาลแดง ไม่ละลายน้ำ ชื่อ Phlobaphenes หรือ Tannin-reds หรือ Phoba tannins หรือ Sinv flavan-3-ol (Catechin) หรือ Flavan-3,4-diol (Leucoantho-cyanidin) คอนเดนส์แทนนินสามารถละลายได้ในสภาพที่เป็นกรดและอุณหภูมิสูง และเมื่อนำสารประกอบนี้มาทำการกลั่นแบบแห้งหรือผ่านความร้อนจะได้ Catechols จึงอาจเรียกชื่อแทนนินประเภทนี้ว่า Catechol tannins



ภาพที่ 9 โครงสร้างของคอนเด็นซ์แทนนิน A-ring : R<sub>1</sub>=OH, R<sub>2</sub>=H, Phloroglucinolic ; R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>=H, Resorcinolic ; R<sub>1</sub>=H, R<sub>2</sub>=OH, Pyrogallolic. B-ring : R<sub>3</sub>=H, Catecholic ; R<sub>3</sub>= OH, Pyrogallolic.

ที่มา: ประกร รามกุล (2553)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ahmad et al. (2015) ได้ทดสอบใช้แทนนินจากต้นพลับหรือ Persimmon สำหรับการเตรียมเจลแทนนินโดยใช้สารฟอร์มัลดีไฮด์และสารประกอบเอมีน โดยเจลที่ใช้ฟอร์มัลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent นั้น ผู้ทดลองได้ทดสอบปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์เป็นค่าต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองที่เป็นกรด สำหรับการเตรียมเจลจากเอมีน ใช้สารผสมระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์และแอมโมเนียมคลอไรด์เป็น Cross-linking agent เมื่อนำเจลทั้งสองชนิดไปทดสอบด้วย Fourier transform infrared (FT-IR) ก็พบว่าเจลที่เตรียมด้วยฟอร์มัลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent จะเกิดการเชื่อมโยงในระหว่างโมเลกุลของแทนนินที่บริเวณวงแหวนเบนซีน ในขณะที่เจลซึ่งมีส่วนผสมของเอมีนนั้น พบฟังก์ชันนอลกรุป (Functional group) ในกลุ่มของ N-H และ C-N ซึ่งเป็นกลุ่มอะมิโนเมทิล (Aminomethyl) ปรากฏขึ้น เมื่อนำเจลทั้งสองชนิดนี้ไปใช้ในการดูดซับสีเมทิลีนบลู (Methylene blue) และ Remazol brilliant orange 3R (RBO) ปรากฏว่าเจลที่เตรียมจากฟอร์มัลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent อย่างเดียว มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมพวกที่มีคุณสมบัติมีประจุบวกหรือกลุ่มสีเบสิกได้ดี ส่วนเจลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารแอมโมเนียมคลอไรด์จะดูดซับสีย้อมในกลุ่มที่เป็นกรดหรือพวกประจุบวกได้ดี

Akter et al. (2016) ได้ทำการทดสอบกำจัดสีย้อมบิลเลียดกรีน ซึ่งเป็นสีในกลุ่มเบสิกโดยใช้เจลแทนนินปกติ และเจลที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารกลุ่มเอมีน ผลการทดลองพบว่าเจลทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีบิลเลียดกรีนได้ดีที่พีเอช 7.0 โดยเจลปกติสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 88.38 ในขณะที่เจลซึ่งผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารกลุ่มเอมีนสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94.05 จลนศาสตร์ของการกำจัดสีของเจลปกติจะเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) ร่วมกับการแทรกผ่านโมเลกุลของแทนนิน (Intraparticle diffusion) ส่วนเจลที่ผ่านการดัดแปลงโดยใช้เอมีนนั้น จลนศาสตร์ของการดูดซับจะเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibb's free energy ( $\Delta G^0$ )) เป็นลบ และการดูดซับเป็นแบบ Spontaneous ทั้งคู่ โดยค่าเอนทัลปี (Enthalpy ( $\Delta H^0$ )) ที่ได้มีค่าเป็นบวก ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Endothermic หรือแบบคายความร้อน และมีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy ( $\Delta S^0$ )) เป็นบวก

Sánchez, González, Beltrán, Gragera, & Salguero (2010) ได้ทำการทดลองต่อไปโดยใช้เจลแทนนินในการกำจัดสีย้อมกลุ่มสีเบสิก คือเมทิลีนบลู โดยในครั้งนี้ได้ศึกษาจลนศาสตร์และสมมูลของการดูดซับ โดยเจลแทนนินที่ใช้มาจากเปลือกของต้น Quebracho ผลปรากฏว่าระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมมูลของการทดลองการดูดซับกินเวลานานถึง 15 วัน และเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและพีเอช เจลแทนนินที่ทดสอบก็สามารถกำจัดสีได้ดีขึ้น สมการการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์

Sánchez, Beltrán, & Gragera (2011) ได้นำแทนนินจากต้น *Caesalpinia spinosa* หรือ ต้น Tara และแทนนินจากต้น *Castanea sativa* หรือ Chestnut มาใช้สำหรับทำเจล โดยคอนเด็นซ์แทนนินจากสองแหล่งนี้ถูกทำให้เป็นเจลโดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent เมื่อนำเจลที่ได้มาทดลองดูดซับสีย้อมกลุ่มสีเบสิก ซึ่งได้แก่สีวิคตอเรียบลู อาร์ (Victoria blue R) สีเมทิลีนบลู และสีฟuchsine) ผลปรากฏว่า เจลที่ได้สามารถดูดซับสีในกลุ่มนี้ได้ดี แต่เมื่อนำมาทดสอบดูดซับสีย้อมพวกออรามิน โอ (Auramine O) และโรดามีน บี (Rhodamine B) ปรากฏว่าไม่สามารถที่จะกำจัดสีสองตัวนี้ได้ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็จะสอดคล้องกับของ Ahmad et al. (2015) โดยสมการการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้โดยสมการของแลงเมียร์

Rahman et al. (2014) ได้ทดสอบนำแทนนินจากต้นพลับหรือ Persimmon มาผลิตเป็นเจล โดยใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็น Cross-linking agent และนำไปดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์เรด (Brilliant red) ซึ่งเป็นสีในกลุ่มเบสิก ผู้ทดลองได้ทดสอบการดูดซับสีที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และมีการปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส ปริมาณของตัวดูดซับ ค่าพีเอชและความเข้มข้นของสารบวกรวมอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ ไอออนของคลอไรด์ ไอออนของไนเตรต และไอออนของซัลเฟต รวมถึงไอออนของคาร์บอนेटด้วย ผลการทดลองพบว่า ในสารละลายที่พีเอช 2.0 กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 เมื่อใช้แทนนินปริมาตร 1.2 กรัมต่อลิตร การดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยมีค่าการดูดซับสูงสุดคือ 45.07 มิลลิกรัมต่อกรัม กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ (Spontaneous) โดยมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) เท่ากับ -4.18 กิโลจูลต่อโมล ที่ 28 องศาเซลเซียส และมีค่าเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) เป็นบวก การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบ Endothermic

Nandi, Goswami, & Purkait (2009) ทำการศึกษาทดลองการดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์กรีน โดยใช้ดินขาวเป็นตัวดูดซับ การกระจายขนาดของอนุภาคดินขาวถูกตรวจสอบโดย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวของอนุภาคดินขาวตรวจวัดวิธี BET และวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ X-Ray Diffractometer (XRD) สำหรับการศึกษาทดลองการดูดซับได้ศึกษาผลของปัจจัย เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณของดินขาว ความเร็วในการกวน ค่าพีเอช และอุณหภูมิในการทดลองดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์กรีน ผลการทดลองการดูดซับชี้ว่า ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย โดยค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) ที่ 299 เคลวิน (องศาเซลเซียส) และ 323 เคลวิน เป็นลบ แสดงว่ากระบวนการดูดซับนั้นเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ และจากค่าเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) และค่าเอนโทรปี ( $\Delta S^0$ ) ที่เป็นลบ ทั้งคู่ บ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับนั้นเป็นคายความร้อน และการจัดระเบียบโมเลกุลของสีย้อมบนพื้นผิวดินขาวเป็นแบบสุ่ม อัตราการดูดซับสีย้อมเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ทุกช่วงความเข้มข้นของสีย้อมที่ทำการศึกษา และแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์สอดคล้องกับการดูดซับนี้

Ghaedi et al. (2011) ได้ทำการทดลองกำจัดสีย้อมบิลเลียนด์กรีนด้วยเทคนิคการดูดซับ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ไผ่ มีการศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่เตรียมได้โดยใช้ FTIR วัดและตรวจสอบพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET และ SEM และศึกษาพารามิเตอร์ เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับ พีเอชของสารละลายสีย้อม และอุณหภูมิของการทดลอง เพื่อสังเกตผลที่มีต่อกระบวนการดูดซับสีย้อม พบว่าค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่กล่าวถึงข้างต้น ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อปริมาตรสารละลายสีย้อม ซึ่งมีความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 มิลลิลิตร ส่วนการกำจัดสีย้อมในสารละลายที่มีพีเอชระหว่าง 6.0 – 10.0 นั้น ค่อนข้างคงที่ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมมากกว่าร้อยละ 90 ภายในเวลาแค่ 30 นาที จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมเป็นไปตามสมการอัตราปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ สอดคล้องกับการดูดซับนี้ โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 2.11 มิลลิกรัมต่อกรัม

Morisada et al. (2011) ได้ศึกษาแทนนินเจล (TG) สังเคราะห์จากโมเลกุลคอนเด็นซ์แทนนินที่มีความสามารถโดดเด่นในการดูดซับไอออนของโลหะต่าง ๆ ออกจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย ในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบดูดซับโบรอนในสารละลายที่พีเอช และอุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้ TG และ Amine - modified tannin gel (ATG) ที่เตรียมจากการนำ TG ไปแช่ในแอมโมเนีย การดูดซับโบรอนด้วย TG และ ATG เกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและค่อนข้างคงที่เมื่อพีเอชของสารละลายต่ำกว่า 7.0 แต่ปริมาณโบรอนที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีพีเอชเพิ่มขึ้นสูงกว่า 7.0 สาเหตุเนื่องจาก ในสารละลายที่มีพีเอชสูงกว่า 7.0 นั้น สัดส่วนโมลของกรดบอริกมีค่าลดลง ในขณะที่ไอออนของเตตระไฮดรอกซีบอเรตไอออน (Tetrahydroxyborate ion) มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น การดูดซับโบรอนบนเจลทั้งสองประเภท สันนิษฐานว่าเกิดขึ้นผ่านการสร้างคีเลตระหว่างเตตระไฮดรอกซีบอเรตไอออนกับกลุ่มไฮดรอกซีของ TG และกลุ่มอะมิโนในเจลบน ATG ความสามารถในการดูดซับโบรอนของ ATG นั้นสูงกว่าของ TG เนื่องจากแรงดึงดูดที่เสถียรกว่าระหว่างโบรอนและไนโตรเจนของกลุ่มอะมิโนใน ATG จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในขณะที่ไอโซเทอมการดูดซับโบรอน ของ TG และ ATG นั้นเป็นไปตามสมการแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ตามลำดับ ทีมศึกษายังพบว่าความสามารถในการดูดซับโบรอนที่มีความเข้มข้นต่ำ ๆ ของทั้ง TG และ ATG นั้นค่อนข้างดีเมื่อเทียบกับตัวดูดซับอื่น ๆ

Rehman et al. (2013) ศึกษาการดูดซับสีย้อมบิลเลียนด์กรีน ด้วยดินแดง (Red clay; RC) ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ โดยทดลองการดูดซับแบบเท (แบทช์) ผลการศึกษาลักษณะของ RC แสดงว่า RC มีพื้นที่ผิว 100.28 ตารางเมตรต่อกรัม ความจุของรูพรุน 0.88 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุน 148.2 Å ในการศึกษาการดูดซับได้ทดสอบผลของปัจจัยการทดลอง เช่น ค่าพีเอช (2.0 – 10.0) ขนาดอนุภาค (58 – 150 ไมครอน (µm)) ปริมาณ RC (0.3 - 1.5 กรัมต่อลิตร) ระยะเวลาสัมผัส (5 – 1500 นาที) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (20 – 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ

อุณหภูมิตั้งที่ 25 – 65 องศาเซลเซียส) การหาไอโซเทอมของกระบวนการดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีน โดย RC บ่งชี้ว่า แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์สามารถอธิบายการดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีน ด้วย RC ได้ดีที่สุด แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ RC เท่ากับ 125 มิลลิกรัมต่อกรัม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม การศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ พบว่าการดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีนด้วย RC เกิดขึ้นแบบอัตโนมัติ

Rao, Giri, Goud & Golder (2016) ทำการทดลองกำจัดสีย้อมบิลิเลียดกรีน โดยใช้ปฏิกิริยาเพนตันในสภาพแวดล้อมที่มีด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสีย้อมขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยสีย้อมจะมีความเข้มข้นของสีมากที่สุด เมื่อสารละลายมีพีเอช 6.0 ขณะที่พีเอชอื่น ๆ ปฏิกิริยา N-de-alkylation จะทำให้เกิดการสลายตัวของสีย้อม การกำจัดสีย้อมบิลิเลียดกรีน โดยใช้ ปฏิกิริยาเพนตันจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของ  $H_2O_2$  และ  $Fe^{2+}$  เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TOC ของสารละลายมีค่าร้อยละ 9 และดัชนีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.9 เท่า หลังจากทำปฏิกิริยา 30 นาที กลไกการสลายตัวของสีย้อมเริ่มต้นด้วย ปฏิกิริยา N-de-ethylation เกิดเป็นไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) จากปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (Hydroxylation) ของ N, N-diethyl aniline และมีสมดุลระหว่าง quinone, hydroquinone และ Fe (III) -hydroquinone ผ่านการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างกัน

Calvete et al. (2010) ทดสอบดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีน จากน้ำทิ้ง โดยใช้ถ่านกัมมันต์สองชนิดที่เตรียมจากเปลือกลูกสนบราซิล (*Araucaria angustifolia*) เหมือนกัน แต่ชนิดแรกถูกกระตุ้นโดยวิธีทางเคมี (CAC) และชนิดที่สองกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับทางกายภาพ (CPAC) พบว่ากระบวนการกระตุ้นแบบผสมนั้นจะเพิ่มพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนโดยเฉลี่ยของตัวดูดซับได้ดีกว่า ในการศึกษาได้ทดสอบผลของเวลาในการเขย่า ปริมาณของตัวดูดซับ และพีเอชของสารละลาย ต่อความสามารถในการดูดซับ การดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีนโดย CAC และ CPAC เกิดขึ้นอย่างดีที่สุดที่พีเอชตั้งแต่ 2.0 ถึง 10.0 โดยมีเวลาสัมผัสที่ต้องใช้เพื่อเข้าสู่สมดุลการดูดซับ 4 ชั่วโมง ที่ 298 องศาเคลวิน เท่ากัน แบบจำลองจลนศาสตร์ Fractionary-order อธิบายข้อมูลการทดลองได้ดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ และข้อมูลที่ได้สภาวะสมดุลสอดคล้องกับไอโซเทอมของ ซิปส์ และเรดลิช-ปีเตอร์สัน (Sips and Redlich – Peterson) เอนทัลปีและเอนโทรปีของการดูดซับของสีย้อมบิลิเลียดกรีนที่ได้จากการทดลองดูดซับระหว่าง 298 องศาเคลวิน ถึง 323 องศาเคลวิน

Rehman, Mahmud & Irum (2015) ทดสอบใช้ใบฝรั่ง (*Psidium guajava*) และเปลือกมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum*) เป็นตัวดูดซับชีวภาพในการกำจัดสีย้อมบิลิเลียดกรีนโดยวิธีแช่ก่อนทำการทดลองดูดซับ ได้วิเคราะห์พื้นผิวของสารดูดซับชีวภาพทั้งสองชนิดโดยใช้ FT-IR และ

Boehm titration และใช้ ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-VIS spectroscopy) ในการวัดปริมาณสี ย้อม และใช้ไอโซเทอมหลายแบบ คือ ฟรูดิช แลงเมียร์ และ เทมคิน (Temkin) ในการประเมิน ข้อมูลที่ได้จากภาวะสมดุลของการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมบิลิเลียด์กรีนสูงสุดของ ไบฝรั่ง และ เปลือกมันฝรั่งเท่ากับ 1.075 และ 1.173 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) เท่ากับ -3.397 และ -2.397 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอช ความชื้น และปริมาณโลหะต่าง ๆ ในวัสดุทั้งสองไม่ต่างกันมาก สรุปได้ว่าไบฝรั่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี ย้อมบิลิเลียด์กรีนได้ดีกว่า

Dahri et al. (2017) ทดสอบนำเปลือก Tarap (TP; *Artocarpus odoratissimus*) ซึ่งเป็น ผลไม้พื้นเมืองบนเกาะบอร์เนียว ที่มีเปลือกคล้ายเปลือกขนุน นำมาใช้กำจัดสีย้อมบิลิเลียด์กรีน ออกจากสารละลาย โดยทดสอบใช้ทั้งเปลือก Tarap ที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปลง และเปลือก Tarap ที่ ตัดแปลงด้วยกรดออกซาลิก (TP - OX) ผลการทดสอบสภาพของพื้นผิว พบว่า การตัดแปลงพื้นผิว ด้วยกรดออกซาลิก TP ทำให้กลุ่ม Carboxyl hydroxyl และ Amino บนพื้นผิวของ Tarap มี บทบาทมากขึ้นในการดูดซับสีย้อมบิลิเลียด์กรีน พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ผลของพีเอช ระยะเวลา สัมผัส ความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย (Ionic strength) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และ อุณหภูมิ ถูกทดสอบ กับ TP และ TP - OX ผลการศึกษาพบว่า เวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดคือ 2 ชั่วโมง โดยไม่ต้องปรับค่าพีเอช ไอโซเทอมการดูดซับการดูดซับสีย้อมบิลิเลียด์กรีนโดย TP อธิบายได้ดีที่สุดโดยโมเดลของ ฟรูดิช ในขณะที่ข้อมูลการทดลองของ TP - OX อธิบายได้ดีที่สุด โดยไอโซเทอมของเทมคิน ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของ TP และ TP - OX มีค่าเท่ากับ 174 และ 275 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การศึกษาทางอุณหพลศาสตร์แสดงว่าการดูดซับโดยตัวดูดซับ ทั้งสองชนิด เป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ผลการศึกษาทางจลนศาสตร์เสนอแนะว่าการดูดซับสี ย้อมโดยตัวดูดซับทั้งสองเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และการแพร่อาจมีบทบาทสำคัญใน กระบวนการดูดซับ

Laskar & Kuma (2019) กำจัดสีย้อมบิลิเลียด์กรีน จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ Bambusa Tulda ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนต เป็นสารดูดซับทางชีวภาพ เพื่อทดแทน ถ่านกัมมันต์ที่มีราคาแพง การทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการกำจัดสีย้อมบิลิเลียด์กรีน โดยใช้ Bambusa Tulda ที่ได้รับการกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนต ดีกว่าการกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก และ Bambusa Tulda ที่ล้างด้วยน้ำกลั่น ลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของ Bambusa Tulda ที่ ผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมคาร์บอเนตถูกตรวจสอบด้วย FTIR SEM EDX และ XRD สภาวะการ กำจัดสีย้อมบิลิเลียด์กรีนที่เหมาะสมที่สุด (กำจัดได้ร้อยละ 98) เกิดขึ้นที่ระยะเวลาการแช่ขนาน 60 นาที ในสารละลายสีย้อมพีเอช 7.0 โดยใช้ปริมาณสารดูดซับ 10 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบในการ เขย่า 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 298 องศาเซลวิน ข้อมูลการทดลองที่สมดุลการดูดซับ สอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด 41.67 มิลลิกรัมต่อกรัม

และจลศาสตร์การดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 16.802 กิโลจูลต่อโมล และการดูดซับถูกควบคุมโดยกระบวนการแพร่ ค่าซีโอดีหลังการดูดซับ ลดลงจาก 136 เป็น 72 มิลลิกรัมต่อลิตร ผู้วิจัยเสนอว่า *Bambusa Tulda* ที่ได้รับการบำบัดด้วยโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและเป็นทางเลือกสำหรับทดแทนถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีย้อมบิลเลียนต์กรีน จากน้ำเสียสังเคราะห์

Ganguly & Ariya (2019) สังเคราะห์ตัวดูดซับที่มีแกนกลางเป็นแม่เหล็ก และมีเปลือกนอกเป็นเหล็กออกไซด์ (Fecore-maghemiteshell (Fe - MM)) เพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมบิลเลียนต์กรีนอย่างง่าย รวดเร็ว ประหยัดต้นทุน และยั่งยืน การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็น homogenous แบบชั้นเดียว (monolayer) และมีประสิทธิภาพสูงมาก โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม ภายในเวลาในไม่กี่วินาที ซึ่งจัดเป็นสถิติที่ยังไม่เคยมีผู้ใดรายงานไว้ สำหรับการดูดซับสีย้อมบิลเลียนต์กรีน ตัวดูดซับนี้สามารถรีไซเคิลได้ (ประมาณร้อยละ 91) เนื่องจาก Fe - MM มีพฤติกรรมเป็นแม่เหล็ก ดังนั้น Fe - MM ที่เคลือบด้วยสีย้อมบิลเลียนต์กรีน จึงสามารถแยกออกจากสารละลายได้ง่าย ๆ ด้วยแม่เหล็ก การเคลือบ Fe - MM ด้วยแรดดินเหนียวเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมบิลเลียนต์กรีนให้สูงขึ้น เนื่องจากการป้องกันการรวมตัวกันของสารแม่เหล็ก ส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่การเคลือบด้วยพลาสติกที่ไม่ชอบน้ำ (โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ) ส่งผลตรงกันข้ามอย่างสิ้นเชิงกับผลการเคลือบด้วยแรดดินเหนียว นอกจากนี้ยังพบว่าตัวดูดซับที่เคลือบแรดดินเหนียว มีความเฉพาะเจาะจงในการกำจัดสีย้อมบิลเลียนต์กรีน โดยดูดซับได้ดีกว่าสีย้อมอื่น ๆ อีก 4 ชนิดที่ทดสอบ สารดูดซับนี้ได้ถูกทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลของปัจจัยทางเคมี ฟิสิกส์ ต่าง ๆ (อุณหภูมิ พีเอช แสง  $O_3$  และ  $NO_2$ ) เพื่อวิเคราะห์ความทนทาน พร้อมกับทดสอบในตัวอย่างน้ำสี่ประเภท (น้ำจากหิมะที่ละลาย น้ำฝน น้ำจากแม่น้ำ และน้ำประปา) เพื่อการประเมินข้อจำกัดในการใช้งาน นอกจากนี้ได้ทดสอบในสภาวะที่มีการแย่งจับโดยสิ่งเจือปน เช่น ไอออนโลหะในน้ำ เพิ่มเติมด้วย โดยทดสอบกับไอออนโลหะ 13 ชนิด จากการหากลไกการดูดซับโดยทดสอบผลิต Fe - MM ด้วย Reducing agent 4 ชนิด คือ  $NaBH_4$  Hydrazine  $LiAlH_4$  และโพลีพีนอลในซาเชียว เฉพาะ  $NaBH_4$  เท่านั้นที่ผลิตตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยอากาศ กลไกการดูดซับเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจาก Fecore ไปยัง MM shell ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุของ  $N^+$  ในโมเลกุลสีย้อมบิลเลียนต์กรีน กับ Fe - MM

Rehman et al. (2019) ใช้ตัวดูดซับชีวภาพที่มีราคาถูกและหาง่ายเพื่อกำจัดสีย้อมบิลเลียนต์กรีน และสีย้อมแอซิด ออเรนจ์ 74 (Acid Orange 74) จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ โดยใช้ใบสน *Pinus roxburghii* ซึ่งได้ถูกนำไปตรวจสอบโดย FTIR TGA DTA และ SEM ผลการศึกษาการดูดซับระบุว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสีย้อมบิลเลียนต์กรีน และสีย้อมแอซิด ออเรนจ์ 74 คือใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1.2 และ 1.8 กรัม เวลาสัมผัส 30 และ 45 นาที พีเอชของสารละลาย



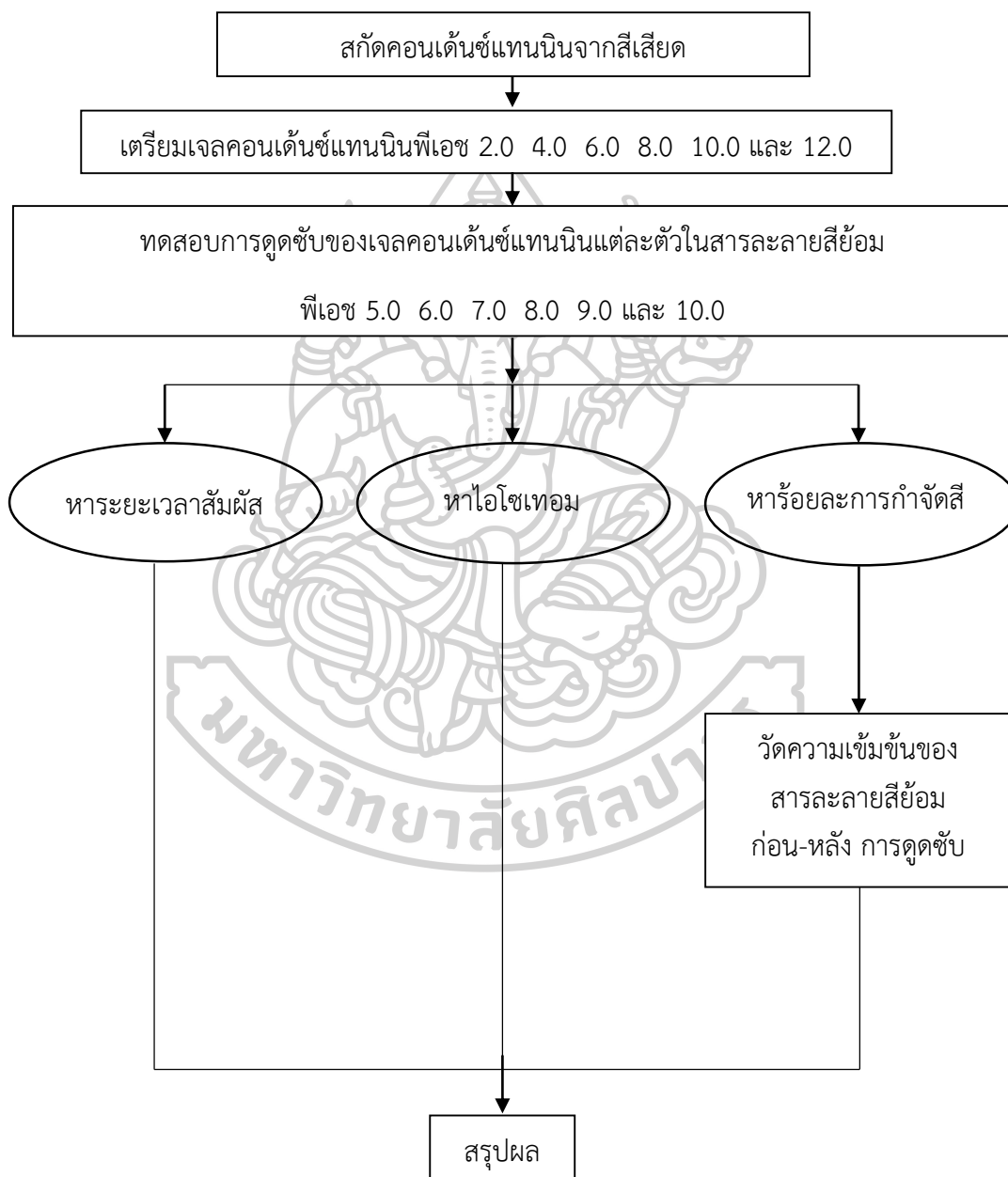
2.0 และ 1.0 และอุณหภูมิของสารละลาย 50 องศาเซลเซียส และ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการกวน 125 รอบต่อนาทีและ 50 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการดูดซับที่สมดุลอธิบายได้โดยแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ กระบวนการดูดซับสี่ย้อมทั้งสองชนิดของไบสน เป็นแบบอัตโนมิติ โดยมีค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) เป็นลบทั้งคู่ การศึกษาการจลนศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนและสี่ย้อมแอสิด ออเรนจ์ 74 ของไบสนเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

Mane, Mall & Srivastava (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับของสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยซีเถ้ากลบ (RHA) ซึ่งได้จากอุปกรณ์เก็บฝุ่นที่ติดอยู่กับท่อก๊าซไอเสียของหม้อไอน้ำที่ใช้กลบเป็นเชื้อเพลิง การศึกษาเป็นแบบแบทช์เพื่อประเมินอิทธิพลของพารามิเตอร์การทดลองต่าง ๆ เช่น ค่าพีเอชเริ่มต้น ( $pH_0$ ) ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) ต่อการกำจัดสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีน สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีน ในการศึกษาครั้งนี้คือสารละลายสี่ย้อมพีเอช 0 - 3.0 ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาสมดุล 5 ชั่วโมง สำหรับช่วง  $C_0$  ตั้งแต่ 50 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม การแพร่กระจายของอนุภาคเข้าสู่ภายในรูพรุนไม่เป็นตัวแปรควบคุมกระบวนการกำจัดสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีน จากการวิเคราะห์ไอโซเทอมสำหรับการดูดซับสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วย RHA ใช้แบบจำลองไอโซเทอมของ ฟรุนดิช แลงเมียร์ เรดลิชและปีเตอร์สัน ดูบินิน-ราดาร์โชวิช (Dubnin-Radushkevich (D-R)) และเทมคิน โดยใช้เทคนิคการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น พบว่าแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ และเรดลิชและปีเตอร์สัน แสดงข้อมูลที่ดีที่สุด การดูดซับสี่ย้อมอุณหภูมิ ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี ( $\Delta S^0$ ) และเอนทัลปี ( $\Delta H^0$ ) เป็นค่าบวก ค่าลบที่สูงของการเปลี่ยนแปลงในพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) บ่งชี้ถึงการดูดซับที่เป็นแบบอัตโนมิติ

Mane & Babu (2011) ได้ทำการศึกษาลักษณะการดูดซับของสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยซีเถ้าของไม้ยูคาลิปตัสอินเดียที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งมีพื้นที่ผิว 0.3742 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.00836 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูขุมขนเฉลี่ย 893.6 Å<sup>0</sup> ดังนั้นการศึกษาแบบแบทช์และประเมินอิทธิพลของพารามิเตอร์การทดลองต่าง ๆ เช่น ค่าพีเอชเริ่มต้น ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิต่อการกำจัดสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีน สภาวะพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมพบว่าอยู่ที่ 2.9 ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง และปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัมต่อลิตร จลนพลศาสตร์การดูดซับของสี่ย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยซีเถ้าของไม้ยูคาลิปตัสอินเดียที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยสารละลาย NaOH เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ใช้การวิเคราะห์ไอโซเทอมแบบ ฟรุนดิช แลงเมียร์ เรดลิชและปีเตอร์สัน และเทมคิน โดยเทคนิคการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการศึกษา



ภาพที่ 10 แผนผังการทดลอง

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่

- 1) เครื่องเขย่าสาร ยี่ห้อ BIBBY Stuart Scientific รุ่น Orbital shaker so1
- 2) เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary Evaporator) ยี่ห้อ BUCHI รุ่น RE111 พร้อม  
อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ รุ่น BUCHI 461
- 3) ตู้อบสาร ยี่ห้อ BINDER และ Linking รุ่น LT900
- 4) เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ SC รุ่น AD1040
- 5) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ชนิดยูวี - วิสิเบิล JES 60 รุ่น V-530
- 6) เครื่องชั่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO ชนิด 4 ตำแหน่ง รุ่น AB204
- 7) ตะแกรงร่อนขนาด 500 ไมโครเมตร และ 212 ไมโครเมตร ยี่ห้อ Retsch
- 8) เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ

### 3.3 การสกัดแทนนินจากสีเสียดเทศ

- 1) นำสีเสียดเทศมาบดให้เป็นผงแล้วร่อนด้วยตะแกรง ขนาด 500 ไมโครเมตร
- 2) ชั่งผงสีเสียดเทศ 10 กรัม ละลายด้วยอะซิโตนร้อยละ 50 ปริมาตร 400 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ ปิดขวดด้วยพาราฟิล์ม นำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 3) นำสารละลายที่ได้มากรองแล้วนำไปแยกอะซิโตนออกจากสารละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน จะได้สารละลายคอนเด็นซ์แทนนิน
- 4) นำสารละลายคอนเด็นซ์แทนนินที่ได้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 500 ไมโครเมตร

### 3.4 การเตรียมเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

- 1) ชั่งผงคอนเด็นซ์แทนนิน 2.5 กรัม ใส่ขวด Vial จำนวน 6 ขวด ละลายด้วยเมทานอลร้อยละ 20 ปรับพีเอชด้วยซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อให้ได้พีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0
- 2) เติมฟอร์มมาลดีไฮด์ จำนวน 5 กรัม ลงในทุกขวด ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่ได้แต่ละขวดบดด้วยตะแกรงขนาด 212 ไมโครเมตร แล้วล้างเจลที่บดแล้วด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างมีพีเอชเป็นกลาง (Nakajima & Baba, 2004)

### 3.5 สีย้อม

#### 3.5.1 การเตรียมสารละลายสีย้อม

ชั่งสีย้อมบิลเลียนต์กรีน จำนวน 1.000 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีน ความเข้มข้น 1.000 กรัมต่อลิตร

#### 3.5.2 การสร้างกราฟมาตรฐานสีย้อม

เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลเลียนต์กรีน ที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 2 4 6 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Akter et al., 2016) โดยปิเปตสารละลายสีย้อมจากข้อ 3.5.1 มา 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี - วิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร (จิราวรรณ สังดวงยาง et al., 2555) นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับค่าความเข้มข้น เพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการทดลองต่อไป

### 3.6 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม

#### 3.6.1 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัส

1) เตรียมน้ำกลั่นที่พีเอชต่าง ๆ ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยไฮโดรคลอริก (HCl) 0.1 โมล หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมล ให้ได้พีเอช 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 และ 10.0 ชั่งสีย้อมบิลเลียนต์กรีน จำนวน 1.000 กรัม ลงไปในแต่ละพีเอช จะได้สีย้อมบิลเลียนต์กรีน ความเข้มข้น 1.000 กรัมต่อลิตร

2) ปิเปตสารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีนที่ปรับพีเอชมา 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ จำนวน 6 ขวด

3) ชั่งเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 จำนวน 0.025 กรัม ลงในสารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีนที่ปรับพีเอช

4) นำไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 2 3 4 5 7 และ 9 ชั่วโมง หรือจนกว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุล

5) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อม ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี - วิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

7) พล็อตกราฟระหว่างเวลา และความเข้มข้นสารละลายสีย้อม เพื่อหาระยะเวลาสมดุลของการดูดซับ

8) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.6.2 การศึกษาอิทธิพลของพีเอชของเจลคอนเด็นซ์แทนนินต่อการดูดซับสารละลายสี

#### ย้อม

1) ปิเตรียมสารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีพีเอช 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 และ 10.0 ปิเปตมา 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่

2) ใส่เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 จำนวน 0.025 กรัม ลงในสารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 และ 10.0 จะได้สารละลายทั้งหมด 36 ขวด

3) นำตัวอย่างไปเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จนกว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุล ตามข้อที่ 3.6.1

4) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี - วิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

5) คำนวณร้อยละของการกำจัดสีย้อม (% Dye Removal) โดยใช้สูตร

$$\text{ร้อยละการกำจัดสีย้อม} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดยที่  $C_0$  (มิลลิกรัมต่อลิตร) คือ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมในเวลาเริ่มต้น

$C_t$  (มิลลิกรัมต่อลิตร) คือ ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมที่เวลา t

6) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

### 3.6.3 การหาค่าไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

1) ชั่งเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 จำนวน 0.025 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

2) เติมสารละลายสีย้อมบิลเลียนต์กรีนในสภาวะพีเอช ตามการทดลองที่ได้จากข้อ 3.6.2 ที่ความเข้มข้น 5 10 15 20 25 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

3) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับจากข้อ 3.6.1 เก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อม ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดยูวี-วิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร

4) คำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล  $q_e$  (มิลลิกรัมต่อกรัม) โดยใช้สูตร

$$q_e = \frac{C_0 - C}{W} \times V$$

สมการที่ 6

โดยที่  $C_0$  คือ ความเข้มข้นสารละลายที่ย้อมในเวลาเริ่มต้น  
 $C$  คือ ความเข้มข้นสารละลายที่ย้อมที่สมดุล  
 $V$  (ลิตร) คือ ปริมาตรสารละลายที่ย้อม  
 $W$  (กรัม) คือ ปริมาณของตัวดูดซับสีที่ใช้

5) พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นสารละลายที่ย้อมและความเข้มข้นของสีที่ถูกดูดซับโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน และคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้ไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich) เปรียบเทียบกัน



## บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### 4.1 อิทธิพลของพีเอช ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม

ในระหว่างการศึกษาพบว่า สีของสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีน พีเอช 9.0 และ 10.0 จางหายไปโดยอัตโนมัติ เมื่อตั้งทิ้งไว้ Rao, Giri, Goud & Golder (2016) ได้อธิบายว่า ความเข้มข้นของสีย้อมบรินเลียนต์กรีนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยวัดค่าความเข้มข้นจากค่าการดูดกลืนแสงได้สูงสุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 6.0 หากพีเอชสูงขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงจะลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมบรินเลียนต์กรีน เกิดจากระบบคอนจูเกตของพันธะคู่และเดี่ยว ในโมเลกุลของสีย้อมบรินเลียนต์กรีน เมื่อสารละลายมีพีเอชสูงขึ้น ระบบคอนจูเกตของพันธะคู่และเดี่ยวในโมเลกุลสีจะเปลี่ยนไป เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนแกนกลางโมเลกุลสี มีสมบัติเป็นตัวดึงดูดอิเล็กตรอน (Electrophile) จึงสามารถถูกแทนที่ (Nucleophilic substitution) โดยสารที่มีประจุลบ เช่น ไฮดรอกซิลไอออน (OH<sup>-</sup>) ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการที่ปริมาณไฮดรอกซิลไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อสารละลายมีพีเอชสูงขึ้น จึงทำให้สีจางลง ด้วยเหตุนี้การศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 จึงทดสอบกับ สารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีน พีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 เท่านั้น และพบว่าเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่เตรียมในแต่ละสภาวะพีเอชต่าง ๆ ดูดซับสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีนได้ต่างกันดังนี้ (ภาพที่ 11)

เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 7.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 91.72 (ภาพที่ 11 ( a )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 6.0 5.0 และ 8.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 91.41 91.38 และ 87.33 ตามลำดับ

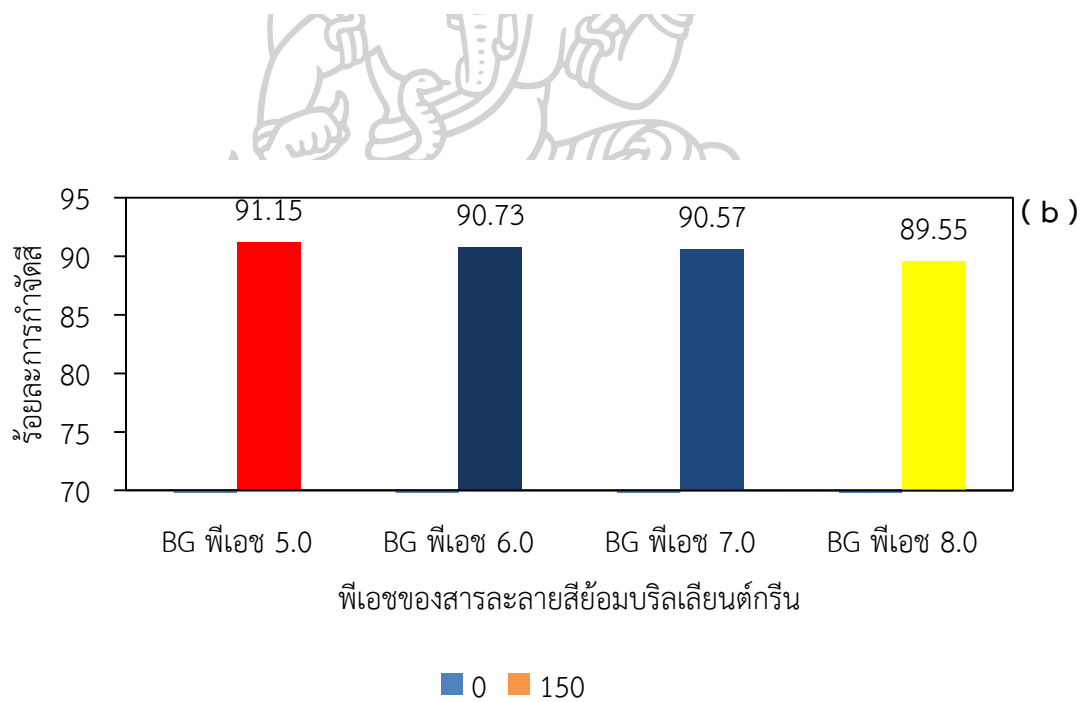
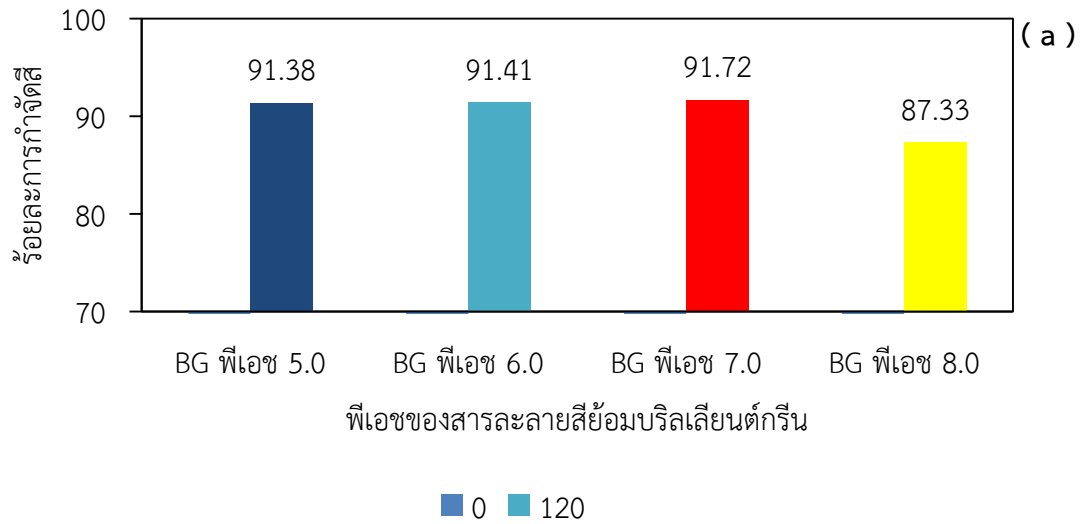
เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 4.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 5.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 91.15 (ภาพที่ 11 ( b )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 6.0 7.0 และ 8.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 90.73 90.57 และ 89.55 ตามลำดับ

เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 6.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 6.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 90.66 (ภาพที่ 11 ( c )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 7.0 5.0 และ 8.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 90.60 90.26 และ 90.00 ตามลำดับ

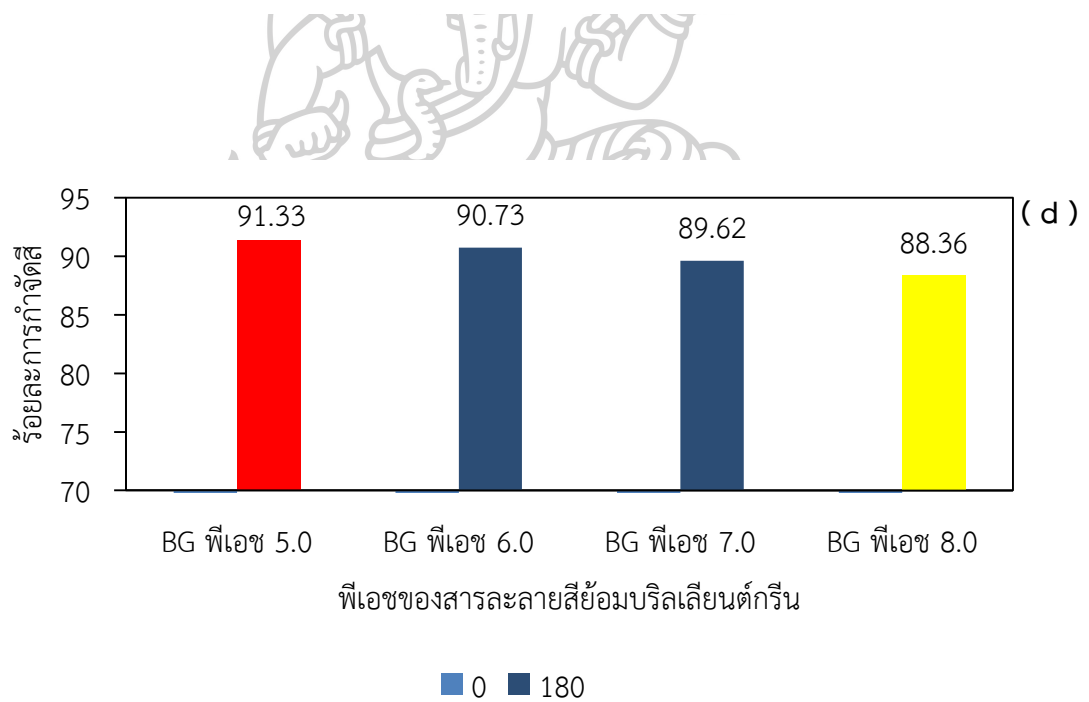
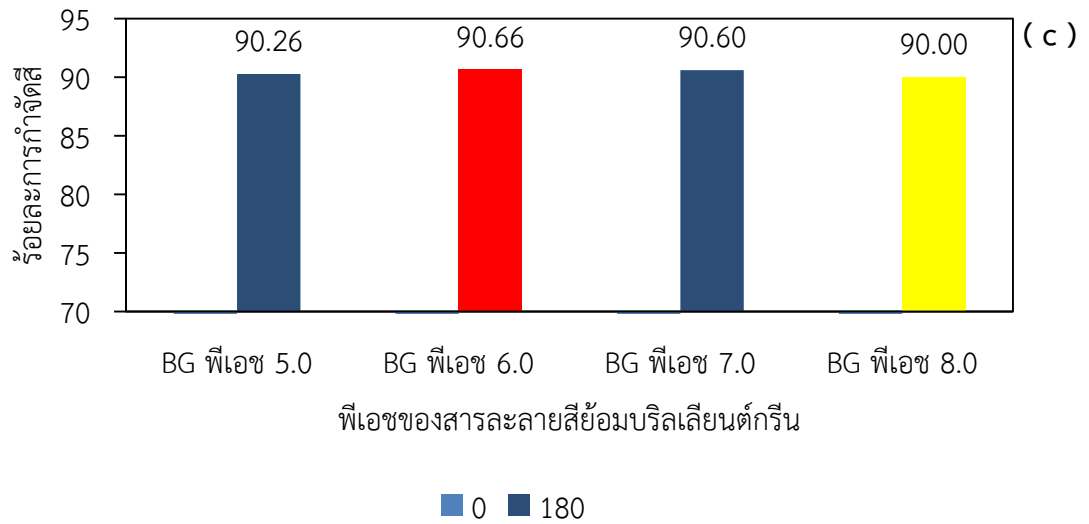
เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 8.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 5.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 91.14 (ภาพที่ 11 ( d )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 6.0 8.0 และ 7.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 90.50 89.90 และ 84.05 ตามลำดับ

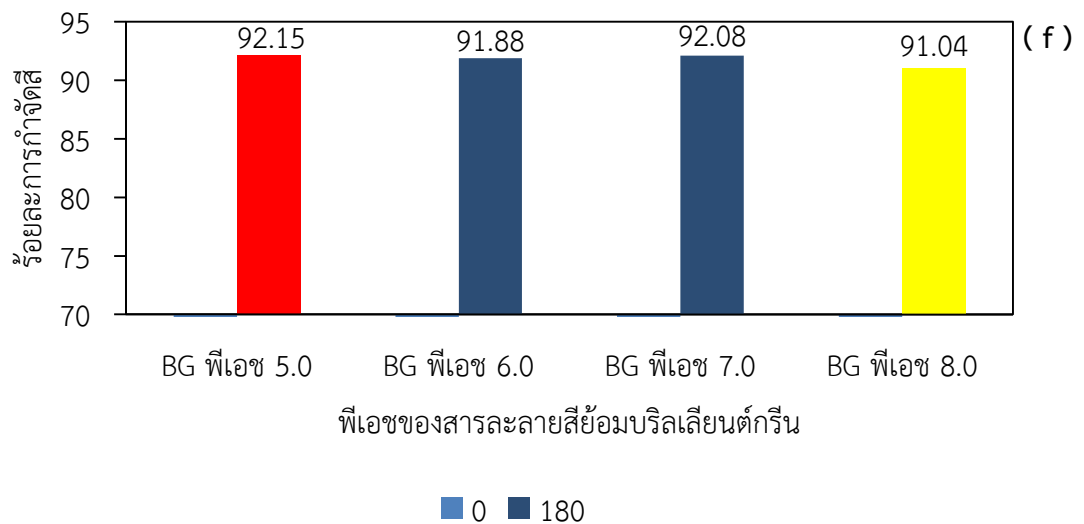
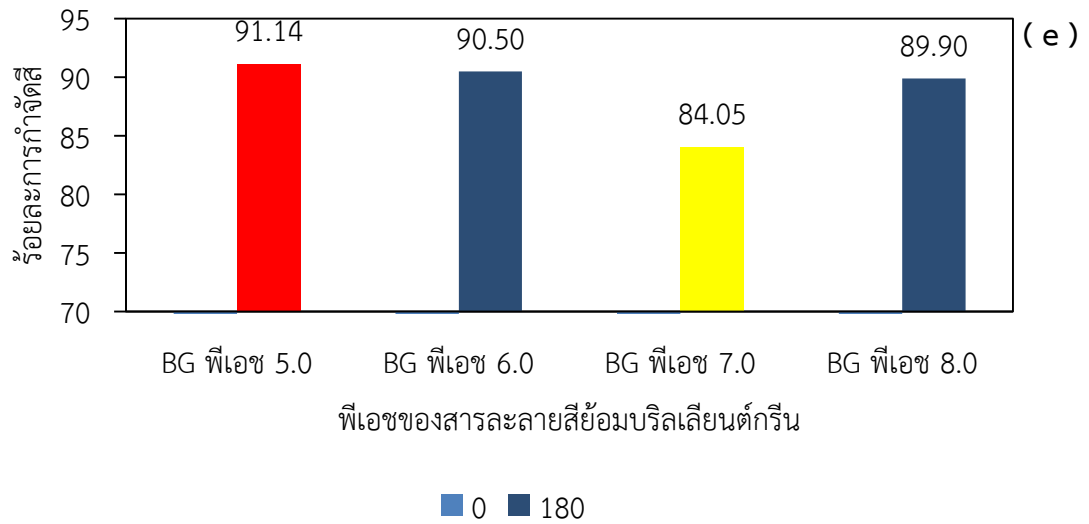
เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 10.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 5.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 91.33 (ภาพที่ 11 ( e )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 6.0 7.0 และ 8.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 90.73 89.62 และ 88.36 ตามลำดับ

เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 สามารถกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดเมื่อสารละลายสีมีพีเอช 5.0 โดยกำจัดได้สูงสุดถึงร้อยละ 92.15 (ภาพที่ 11 ( f )) รองลงมาเป็นสารละลายที่มีพีเอช 7.0 6.0 และ 8.0 ตามลำดับ โดยกำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 92.08 91.88 และ 91.04 ตามลำดับ









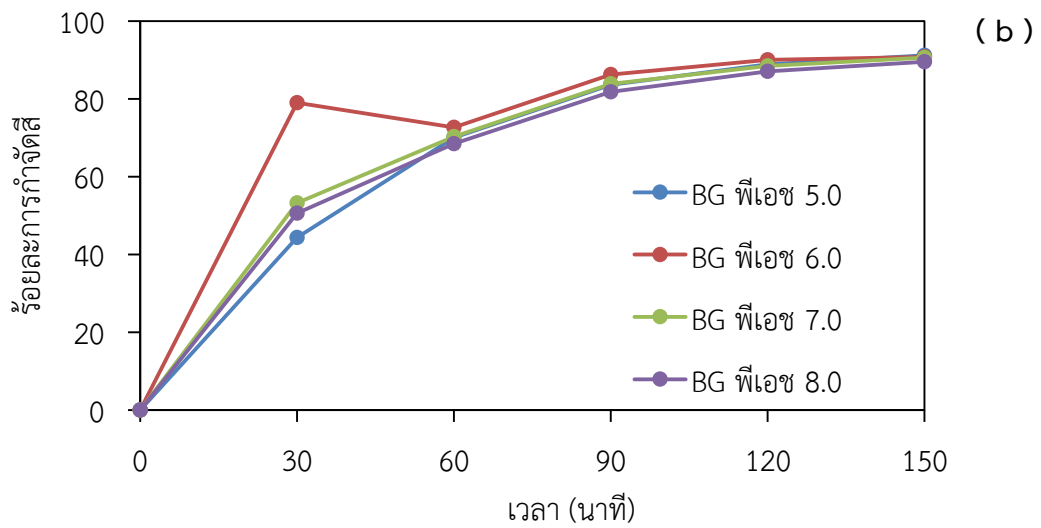
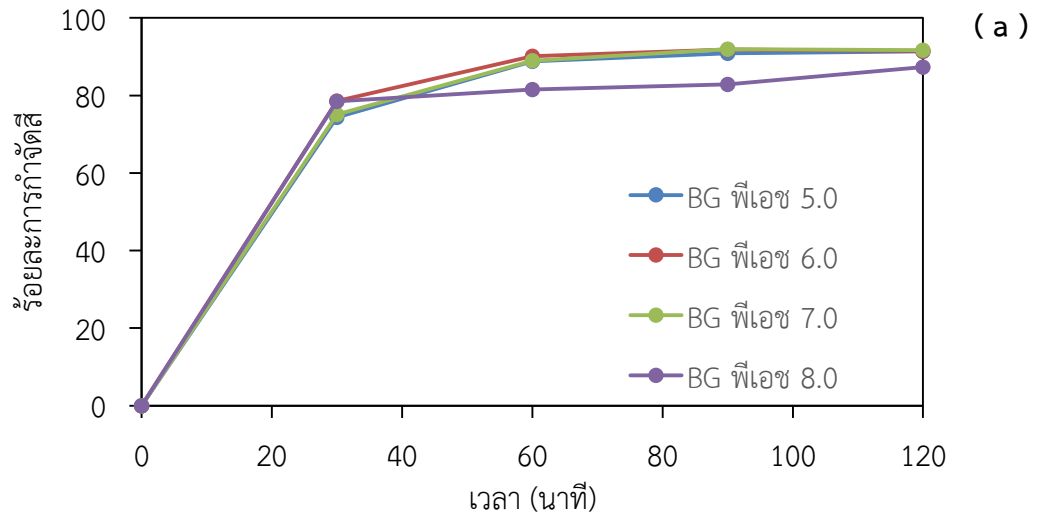
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 และ  
 เจลคอนเด็นซ์แทนนิน (TG) พีเอช (a) 2.0 (b) 4.0 (c) 6.0 (d) 8.0 (e) 10.0 และ  
 (f) 12.0 ในการดูดซับสีย้อมบรินเลียนต์กรีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ  
 1 กรัมต่อลิตร

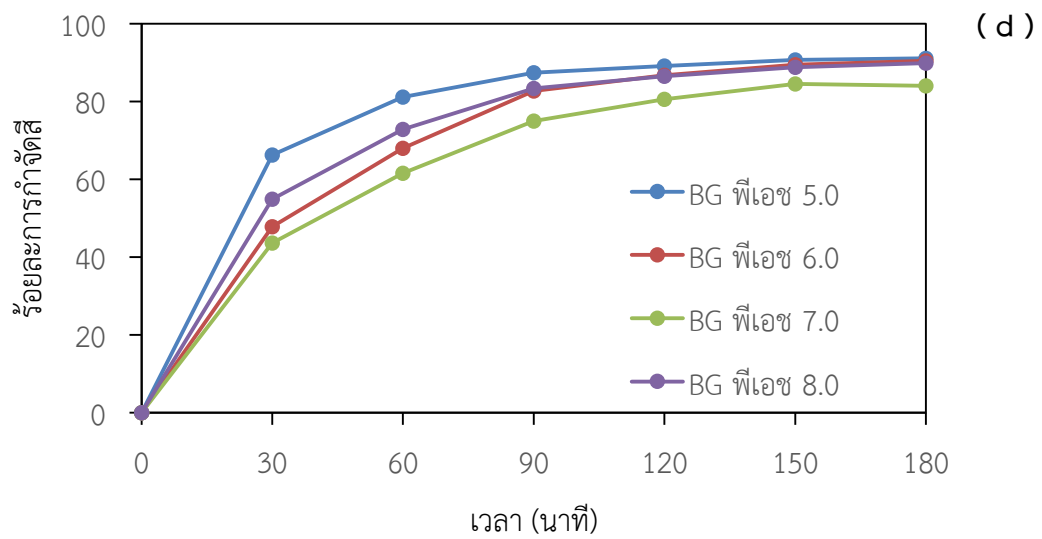
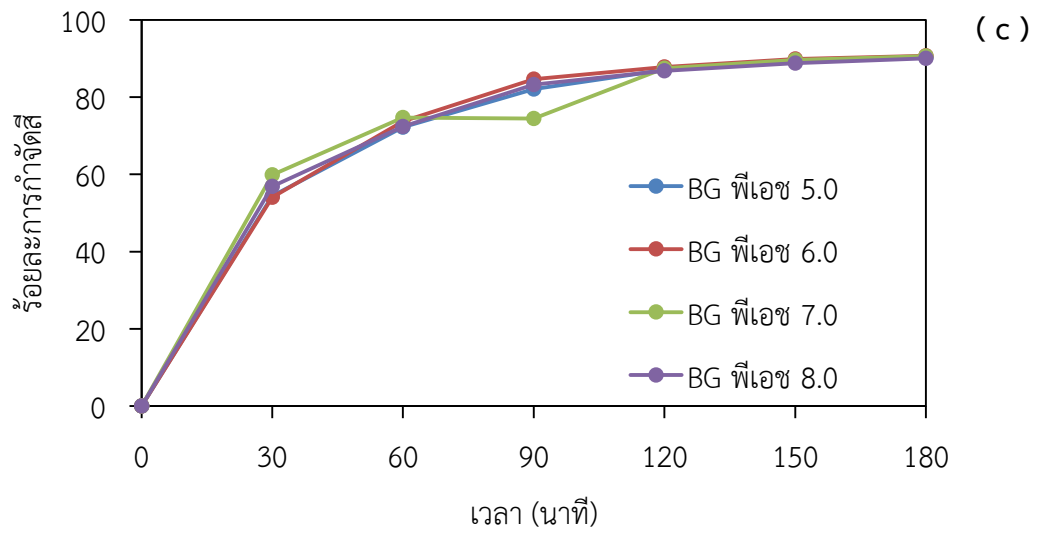
จากผลการทดลองจะเห็นว่า เจลที่เตรียมในทุกสภาวะ พีเอชมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี สารละลายย้อมที่มีพีเอชต่าง ๆ ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกัน คือ มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 84.05 - 92.25 เจลส่วนใหญ่ (เจลพีเอช 4.0 8.0 10.0 และ 12.0) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมได้สูงสุด เมื่อสารละลายย้อมมีพีเอช 5.0 โดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 กำจัดได้ดีที่สุด ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของเจลทุกสภาวะพีเอชมีค่าต่ำสุดเมื่อพีเอชของสีย้อมเท่ากับ 8.0 ยกเว้น เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 8.0 ซึ่งกำจัดสารละลายสีย้อมพีเอช 7.0 ได้น้อยที่สุด

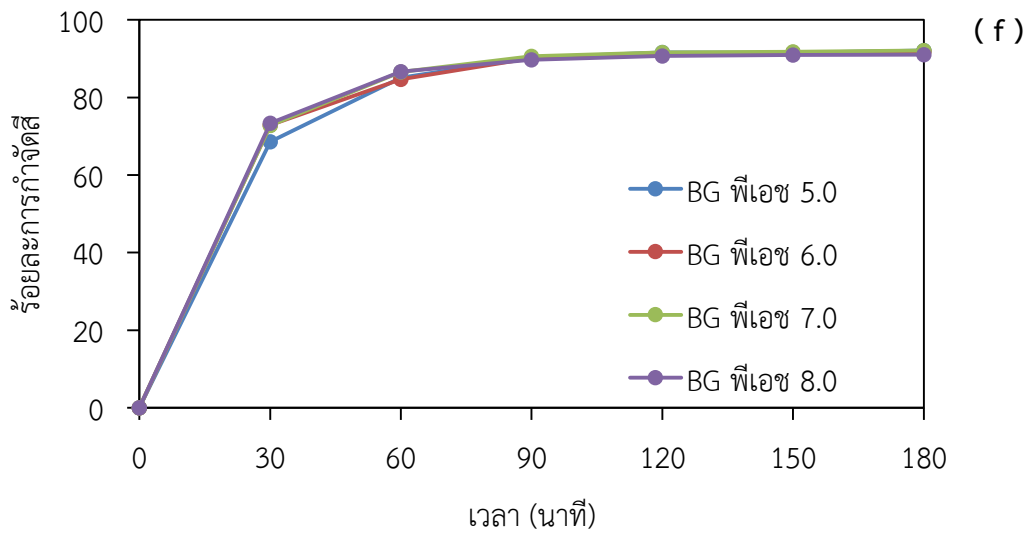
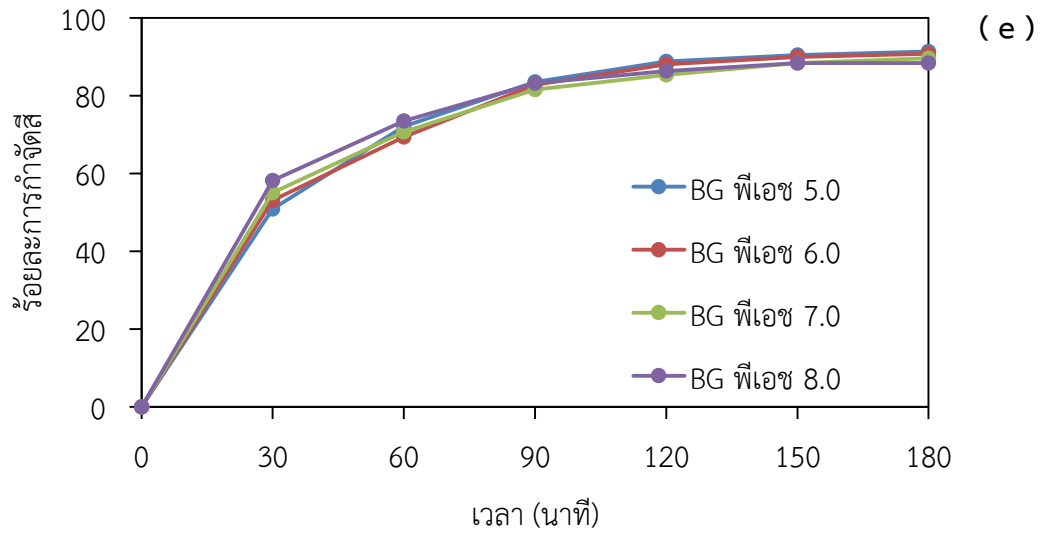
จากข้อมูลของ Rao, Giri, Goud & Golder (2016) ที่กล่าวมาข้างต้น ในสารละลายที่มีพีเอชเป็นเบส โมเลกุลจะมีความเป็นประจุบวกลดลง จนเหลือสภาพเป็นประจุบวกเล็กน้อย (partial positive charge) ดังนั้นการดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนินแต่ละตัวจึงมีค่าลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายย้อมมีค่าสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะ electrostatic attraction ระหว่างสีย้อมและเจลคอนเด็นซ์แทนนินลดลง สาเหตุอีกประการที่ทำให้เจลดูดซับสีย้อมที่เป็นเบสได้ลดลงเนื่องจากเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่า 7.0 กลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl group หรือ OH) อิสระที่มีอยู่ในสารละลายและมีประจุลบ จะดึงดูดกับขั้วบวกในโมเลกุลของสีย้อมได้มากขึ้น กลุ่มไฮดรอกซิลอิสระเหล่านี้จะมีจำนวนมากขึ้น เมื่อพีเอชของสารละลายสีย้อมสูงขึ้น นอกจากนี้โอกาสที่สีย้อมจะสัมผัสกับกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระที่อยู่ในรูปไอออนในสารละลายนี้ก็สูงกว่าประจุบนพื้นผิวของเจลที่อยู่ในสภาพเป็นของแข็ง (Akter et al., 2016) ดังนั้นเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่ามากกว่า 7.0 กลุ่มไฮดรอกซิลอิสระเหล่านี้จึงแย่งจับโมเลกุลของสีย้อมได้ดีกว่าเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

แม้ว่าประสิทธิภาพของเจลคอนเด็นซ์แทนนินแต่ละชนิด ในการกำจัดสารละลายสีย้อม ที่มีพีเอชใด ๆ จะไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่ก็สังเกตเห็นได้ว่า เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมดีกว่าเจลชนิดอื่น ๆ จากรายงานของ Morisada, S.; Rin, T.; Ogata, T.; Kim, Y.-H.; Nakano, Y. Water Res 2011, 45, 4028 เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 3.3 มีค่า Zeta potential เป็น -7.1 และเพิ่มขึ้นเป็น -38.7 เมื่อพีเอชของเจลสูงขึ้นเป็น 11.0 ข้อมูลนี้แสดงว่า ประจุส่วนใหญ่ที่ผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 - 12.0 ที่ใช้ทดสอบทั้งหมดเป็นประจุลบ และค่าประจุลบจะมากขึ้นเมื่อตัวเจลมีพีเอชสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 จึงดูดซับสีย้อมบรินเลียนต์กรีนได้ดีที่สุด เพราะแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินและประจุบวกของสีย้อมบรินเลียนต์กรีน (electrostatic attraction) จะมีค่าสูงสุด

ผลการทดลองยังพบว่า เจลคอนเด็นซ์แทนนินแต่ละพีเอช มีระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล การดูดซับสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีนแต่ละพีเอชต่างกัน (ภาพที่ 12 (a) - (f)) โดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 มีระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเร็วที่สุดคือ 60 นาที เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 4.0 6.0 8.0 และ 10.0 มีระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 150 นาที เท่ากัน และเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 มีระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากจำนวนประจุลบบนผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 มีน้อยที่สุด ในขณะที่เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 มี Electrostatic attraction กับโมเลกุลสีย้อมบรินเลียนต์กรีนมากที่สุด



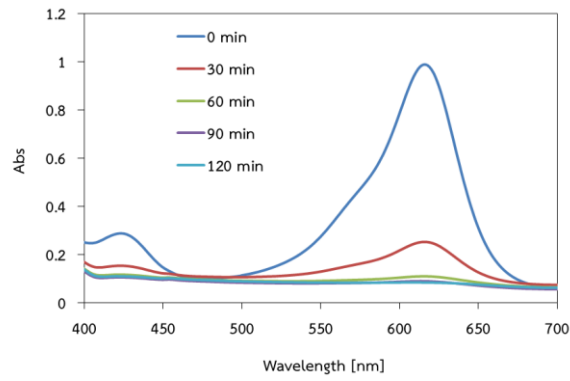




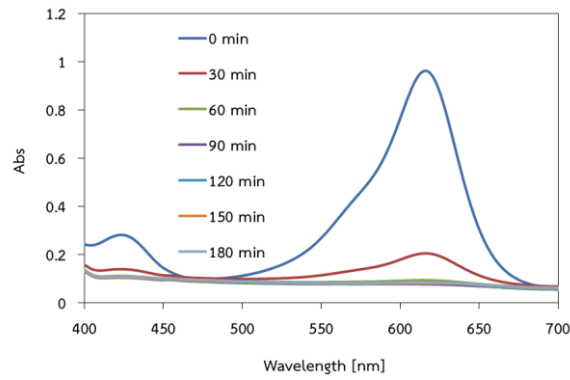
ภาพที่ 12 ประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช ( a ) 2.0 ( b ) 4.0 ( c ) 6.0 ( d ) 8.0 ( e ) 10.0 และ ( f ) 12.0 ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 – 9 ชั่วโมง ในการดูดซับสีย้อมบรินเลียนต์กรีนความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร

การติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นที่ระยะเวลาต่าง ๆ โดยสังเกตการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร บ่งชี้ว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมบรินเลียนต์กรีนที่พีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับจะเริ่มช้าลงและเข้าสู่ภาวะสมดุล การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณการดูดซับในช่วงแรก เนื่องมาจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังมีปริมาณมาก (วรวิทย์ จันทรสุวรรณ, 2558) ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นและคงที่ในที่สุด (ภาพที่ 13 - ภาพที่ 18) นอกจากนี้ กระบวนการดูดซับสีย้อมบรินเลียนต์กรีน ของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน เกิดขึ้นผ่านกระบวนการอย่างน้อยสองขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมอย่างรวดเร็วกับพื้นที่ผิวภายนอกของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาานกว่าขั้นตอนอื่น ๆ ตามมาด้วยกระบวนการแพร่ของโมเลกุลสีย้อมเข้าสู่ช่องว่างภายในของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน และสุดท้ายคือการเข้าสู่สมดุลของการแพร่ที่เกิดภายในช่องว่างนั้น ๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดอย่างช้า ๆ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนน้อยลงของแข็ง (Akter et al. 2016)

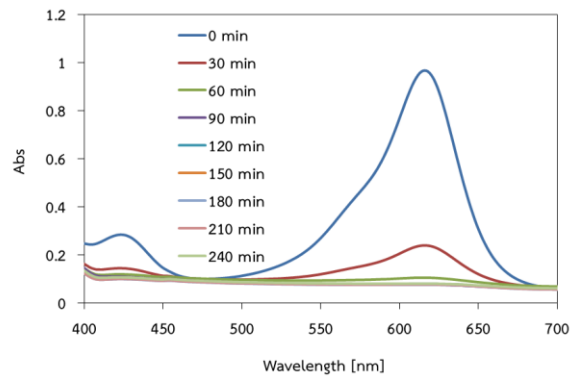




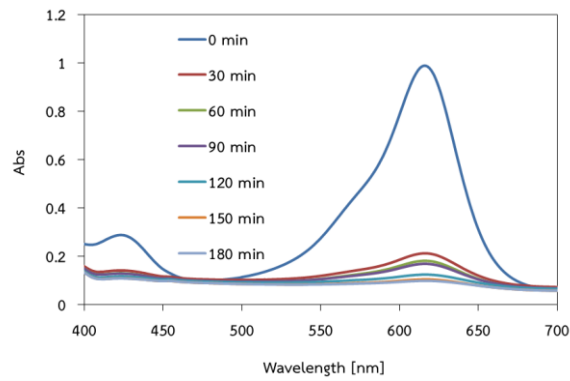
พีเอช 5.0



พีเอช 6.0



พีเอช 7.0

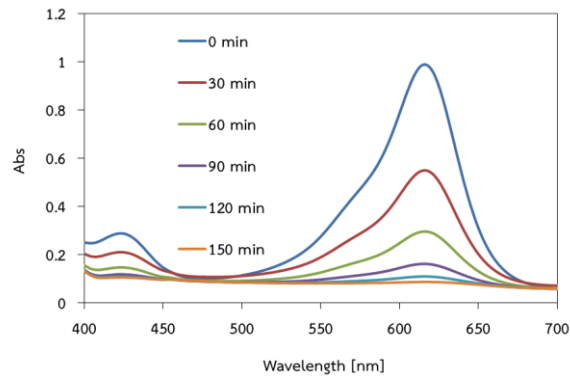


พีเอช 8.0

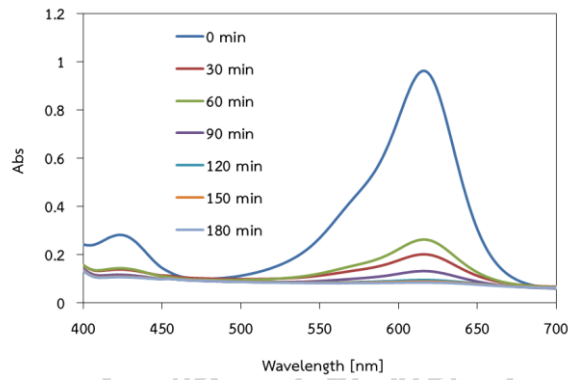
ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีเขียวอมฟ้าด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

พีเอช 2.0

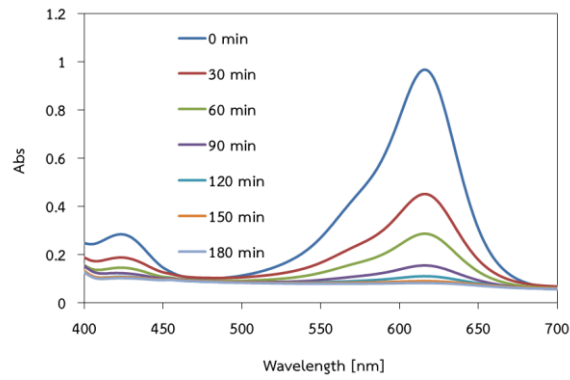




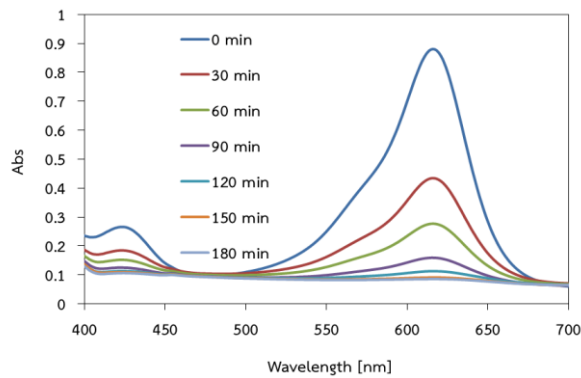
พีเอช 5.0



พีเอช 6.0



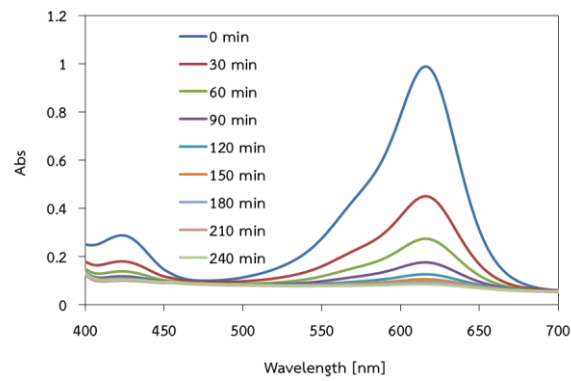
พีเอช 7.0



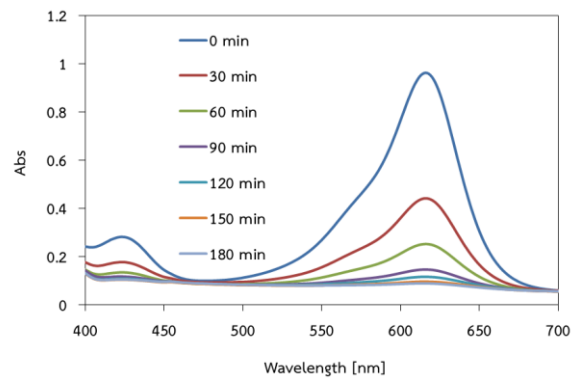
พีเอช 8.0

ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบิลิเลียด์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

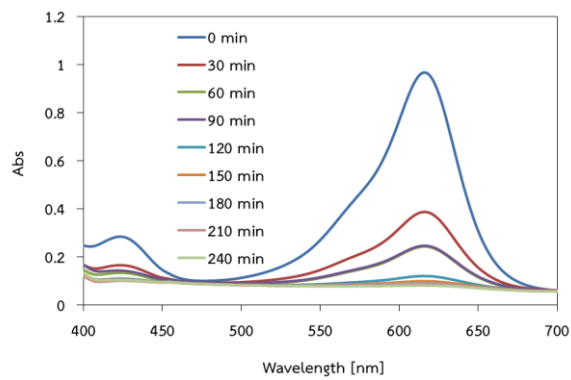
พีเอช 4.0



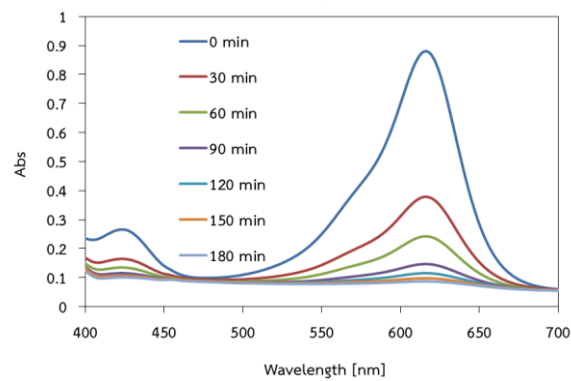
พีเอช 5.0



พีเอช 6.0



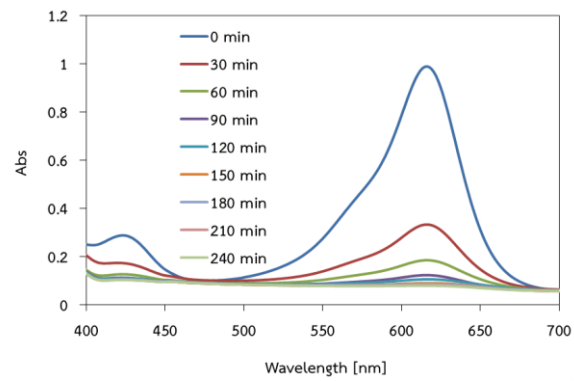
พีเอช 7.0



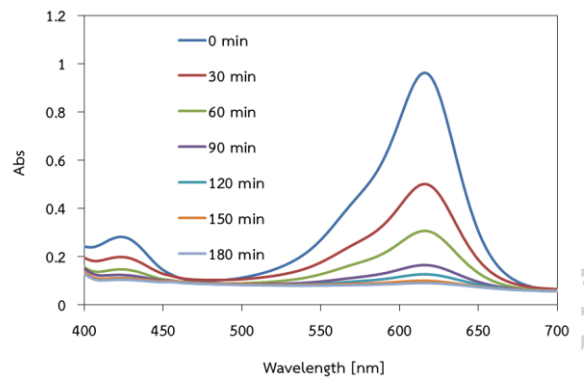
พีเอช 8.0

ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมพริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

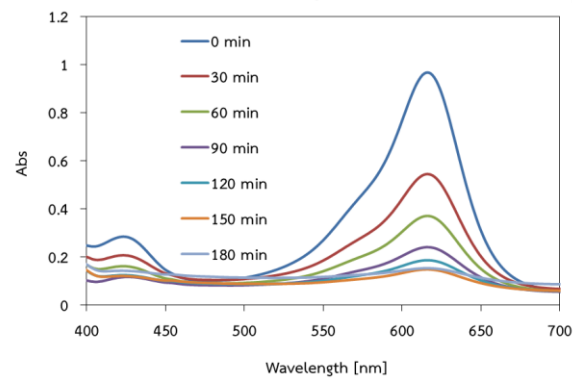
พีเอช 6.0



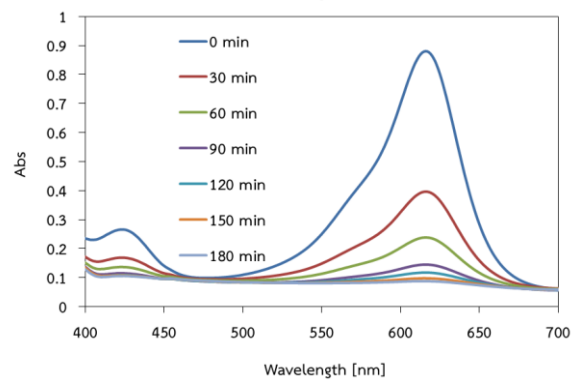
พีเอช 5.0



พีเอช 6.0



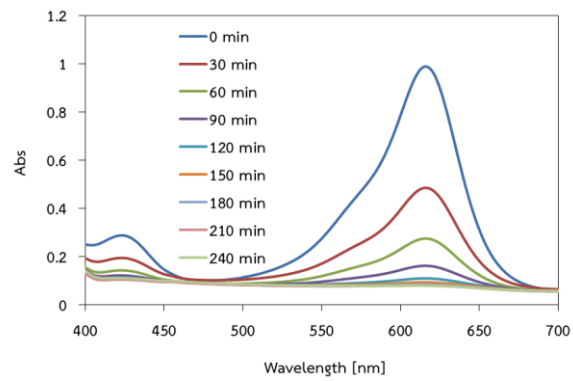
พีเอช 7.0



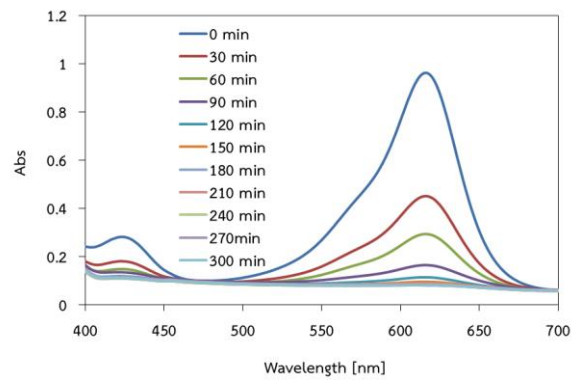
พีเอช 8.0

ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

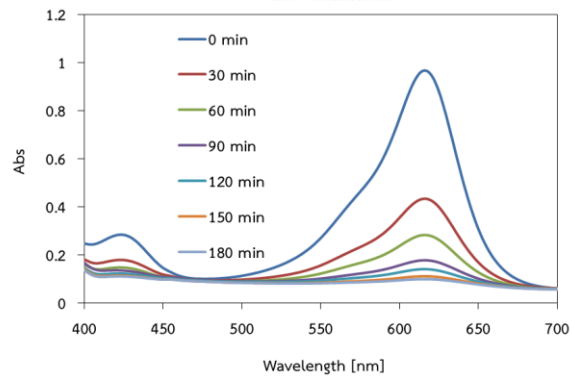
พีเอช 8.0



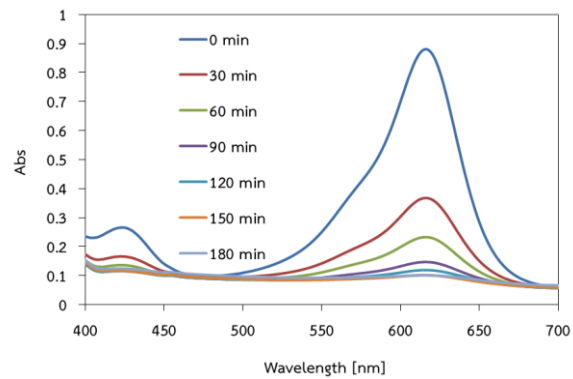
ฟิเอช 5.0



ฟิเอช 6.0



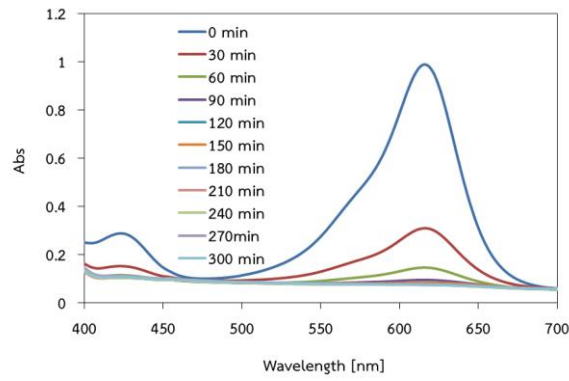
ฟิเอช 7.0



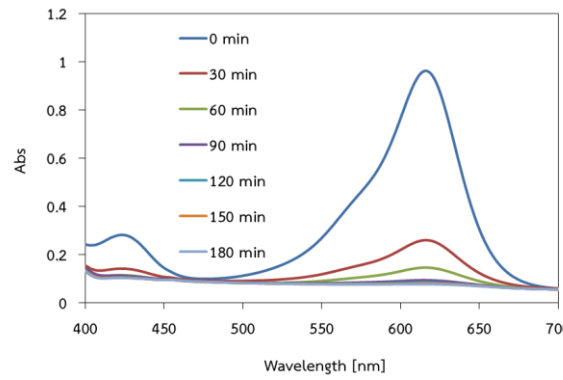
ฟิเอช 8.0

ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

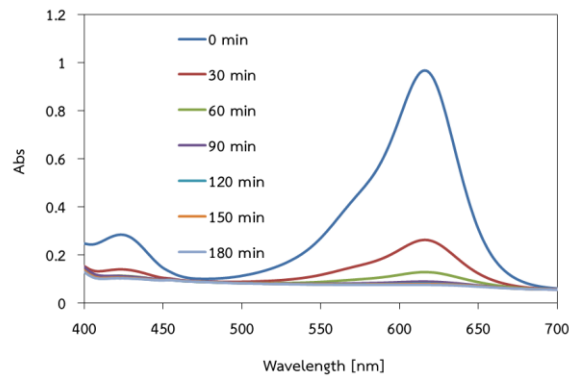
ฟิเอช 10.0



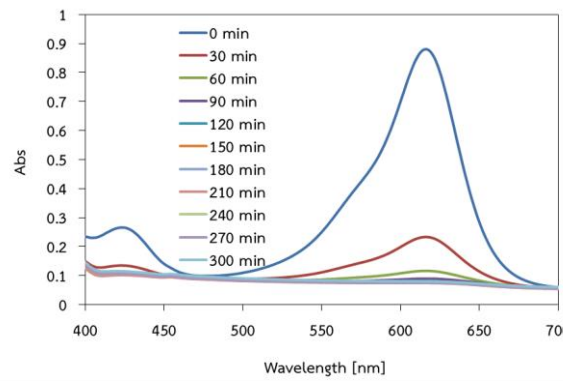
ฟิเอช 5.0



ฟิเอช 6.0



ฟิเอช 7.0



ฟิเอช 8.0

ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมปริลเลียนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน

ฟิเอช 12.0

#### 4.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมบรินเลียนต์กรีนพีเอช 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 โดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 ทั้งแบบแลงเมียร์ และฟรุนดิช แสดงไว้ดังตารางที่ 3

ไอโซเทอมการดูดซับที่ทดสอบได้แก่ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดิช โดยสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์คือ

$$x/m = \frac{abC}{1 + bC}$$

โดย

$x/m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า ค่าการดูดซับที่สมดุล

$a$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

$b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$C$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงโดยใช้สมการ

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{a}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C/x/m$  กับ  $C$  ค่า  $a$  และ  $b$  หาได้จากความชัน และจุดตัดแกนสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล ( $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0}$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (Unfavorable),

$R_L=1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (Favorable) และ  $R_L=0$  การดูดซับเกิดผันทกลับได้ (Irreversible)

สำหรับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชเป็นไอโซเทอมที่อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) มีสมการดังนี้

$$x/m = K_f C^{\frac{1}{n}}$$

เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$x/m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล

$K_f$  คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$n$  คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log x/m$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_f$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log C$  กับ  $\log x/m$  โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ, 2558; สร้อยดาว วินิจนทร์ตัน & เฉลิมขวัญ ช่างปิง, 2548)

ตารางที่ 3 Adsorption isotherm parameters ของการดูดซับ

ชนิดของเจล	Isotherm Models	Isotherm Parameter	หน่วย	สี่ข้อมบริลเลียนกรีนต์			
				พีเอช 5.0	พีเอช 6.0	พีเอช 7.0	พีเอช 8.0
พีเอช 2.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัมต่อกรัม	10.54	14.97	1.11	0.26
		b	ลิตรต่อมิลลิกรัม	4.63	3.75	-11.91	-11.89
		R <sup>2</sup>	-	0.9924	0.9500	0.9762	0.9707
	ฟรุนดิช	1/n	-	0.62	0.63	1.63	1.82
		n	-	1.60	1.59	0.61	0.55
		K <sub>f</sub>	-	8.71	15.73	39.26	56.35
		R <sup>2</sup>	-	0.5952	0.6176	0.4482	0.6334
พีเอช 4.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัมต่อกรัม	10.96	10.43	4.65	12.56
		b	ลิตรต่อมิลลิกรัม	0.52	1.99	2.18	0.40
		R <sup>2</sup>	-	0.9975	0.9949	0.9962	0.9443
	ฟรุนดิช	1/n	-	0.80	1.22	0.74	1.29
		n	-	1.26	0.82	1.34	0.78
		K <sub>f</sub>	-	3.23	8.90	3.44	4.31
		R <sup>2</sup>	-	0.8264	0.7115	0.7014	0.6877
พีเอช 6.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัมต่อกรัม	7.19	13.23	6.03	11.66
		b	ลิตรต่อมิลลิกรัม	11.30	0.80	16.26	0.82
		R <sup>2</sup>	-	0.9937	0.9536	0.9835	0.9937
	ฟรุนดิช	1/n	-	0.77	1.55	0.63	1.92
		n	-	1.30	0.65	1.60	0.52
		K <sub>f</sub>	-	11.26	11.35	1.67	11.47
		R <sup>2</sup>	-	0.1054	0.5324	0.1686	0.8797
พีเอช 8.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัมต่อกรัม	55.87	50.00	28.99	17.09
		b	ลิตรต่อมิลลิกรัม	0.19	0.17	0.19	0.36



		$R^2$	-	0.9938	0.9962	0.9914	0.9909
	ฟรุนดิช	$1/n$	-	0.34	0.36	0.45	0.32
		$n$	-	2.92	2.78	2.23	3.16
		$K_f$	-	14.86	12.50	6.40	6.25
		$R^2$	-	0.9790	0.9778	0.9368	0.8839
พีเอช 10.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัม ต่อกรัม	103.09	92.59	34.72	17.54
		b	ลิตรต่อ มิลลิกรัม	0.26	0.22	0.31	0.62
		$R^2$	-	0.9929	0.9918	0.9967	0.9934
	ฟรุนดิช	$1/n$	-	0.54	0.55	0.40	0.24
		$n$	-	1.86	1.83	2.52	4.18
		$K_f$	-	22.63	18.50	10.37	8.53
		$R^2$	-	0.9477	0.9406	0.9631	0.9456
	พีเอช 12.0	แลงเมียร์	a	มิลลิกรัม ต่อกรัม	105.26	105.26	37.45
b			ลิตรต่อ มิลลิกรัม	0.14	0.10	0.23	0.33
$R^2$			-	0.9906	0.9957	0.9920	0.9950
ฟรุนดิช		$1/n$	-	0.58	0.63	0.47	0.31
		$n$	-	1.73	1.59	2.13	3.18
		$K_f$	-	15.70	12.32	8.76	6.81
		$R^2$	-	0.9600	0.9787	0.9385	0.9855

เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  พบว่า ผลการทดลองทั้งหกชุดทดลองสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) มากกว่าสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) เนื่องจากค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1.0 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับบนพื้นผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินทั้งหกสภาวะพีเอช เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวที่มี active site แบบเดียวกัน และการดูดซับระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับเจลคอนเด็นซ์แทนนินทั้งหกสภาวะพีเอชเป็นการดูดซับทางกายภาพ

มีรายงานว่ากระบวนการดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน เกิดขึ้นผ่านกลไกสามขั้นตอน เริ่มต้นด้วยการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมอย่างรวดเร็วโดยผิวภายนอกของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ตามมาด้วยการแพร่กระจายของอนุภาคสีย้อมเข้าสู่ภายในช่องว่างของเจล และสุดท้ายคือการเข้าสู่สมดุลของการแพร่ของอนุภาคสีย้อมที่เกิดภายในช่องว่างนั้น ๆ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนย้ายลง และปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับมากที่สุด แบบชั้นเดียว บน

พื้นผิวภายนอกของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 3.3 เท่ากับ 8.55 มิลลิกรัมต่อกรัม (Akter et al. 2016)

ในการทดลองนี้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับมากที่สุดมีค่าระหว่าง 0.26 - 105.26 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยปริมาณสูงสุดเกิดขึ้นในการดูดซับสีย้อมพีเอช 5.0 และ 6.0 โดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 ขณะที่ปริมาณต่ำสุดเป็นการดูดซับสีย้อมพีเอช 8.0 ของเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 2.0 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจำนวนประจุลบที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เมื่อเจลถูกเตรียมในสภาวะที่เป็นเบสสูง ๆ ตามที่กล่าวมาแล้ว

ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับสูงสุดโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 จัดได้ว่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับรายงานผลการดูดซับสีย้อมชนิดนี้โดยใช้วัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ เช่น

วัสดุดูดซับ	ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ที่มา
- Saklikent mud	1.18	Kismir et al. 2011
- Modified chitosan	10.91	Karaer et al. 2013
- Hydrogel loaded with kalonite	26.31	Shirsath et al. 2013
- Kaolin	65.42	Nandi et al. 2009
- Red clay	125	Rehman et al. 2013
- Yemen natural clay	476	Nassar et al. 2012
- activated carbon prepared from acorn	2.11	Ghaedi et al, 2011

## บทที่ 5

### สรุป และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

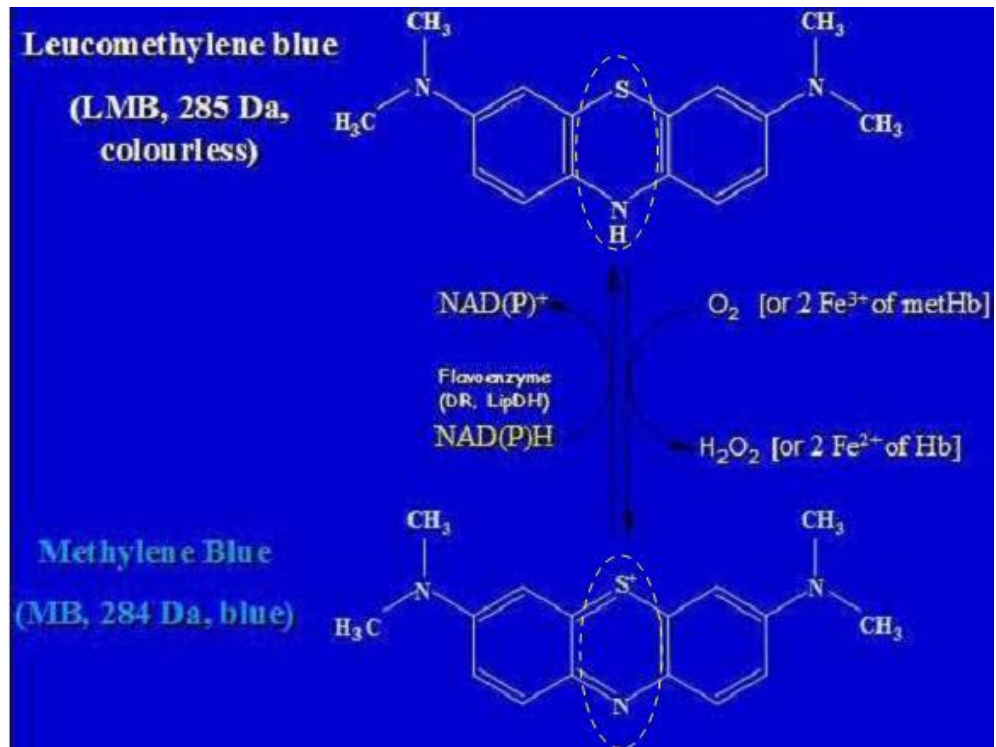
ในการศึกษานี้ ได้ทดสอบดูดซับสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนด้วยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน โดยมีตัวแปรคือ 1) พีเอชของเจลคอนเด็นซ์แทนนินที่มีค่า 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 และ 12.0 2) พีเอชของสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีน ซึ่งมีค่า 5.0 6.0 7.0 และ 8.0 และ 3) ระยะเวลาสัมผัส ทั้งนี้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนิน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เจลที่เตรียมในทุกสภาวะพีเอชมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนแต่ละพีเอชค่อนข้างใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงร้อยละ 84.05 - 92.25 แต่การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสารละลายสีย้อมมีพีเอช 5.0 และเจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 กำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมจะลดลง เมื่อพีเอชของสารละลายสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพบว่า สีย้อมพีเอช 8.0 ถูกดูดซับโดยเจลคอนเด็นซ์แทนนินทุกชนิดได้ต่ำสุด เพราะในสารละลายที่เป็นเบส โมเลกุลของสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนจะมีประจุบวกลดลง การดูดซับสีย้อมของเจลคอนเด็นซ์แทนนินซึ่งแต่ละตัวมีประจุลบอยู่บนพื้นผิว จึงมีค่าลดลงเพราะ electrostatic attraction ระหว่างสีย้อมและเจลคอนเด็นซ์แทนนินลดลง นอกจากนี้ กลุ่มไฮดรอกซิลอิสระที่เพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีพีเอชมากกว่า 7.0 จะแย่งจับกับประจุบวกของโมเลกุลของสีย้อมได้มากขึ้น รวมทั้งโอกาสที่สีย้อมจะสัมผัสกับกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระในสารละลายก็สูงกว่าประจุบนพื้นผิวของเจลที่อยู่ในสภาพเป็นของแข็ง และเนื่องจากประจุบนพื้นผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนิน จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของเจล สูงขึ้น ทำให้เจลคอนเด็นซ์แทนนินพีเอช 12.0 ดูดซับสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนได้ดีที่สุด เพราะแรงดึงดูดระหว่างประจุบนพื้นผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินและประจุบวกของสีย้อมบิลิเลี่ยนต์จะมีค่าสูงที่สุด ทำให้เจลชนิดนี้ดูดซับสีย้อมได้เร็วที่สุด โดยการดูดซับจะเข้าสู่ระยะเวลาสมดุลภายใน 90 นาที การดูดซับบนพื้นผิวของเจลคอนเด็นซ์แทนนินทั้งหกสภาวะพีเอช เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (monolayer) บนพื้นผิวที่มี active site แบบเดียวกัน เป็นการดูดซับทางกายภาพ ที่อธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับมากที่สุดมีค่าระหว่าง 0.26 - 105.26 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งจัดว่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ๆ

ผลที่ได้จากการศึกษานี้จึงสรุปได้ว่า เจลคอนเด็นซ์แทนนินที่เตรียมในสภาวะพีเอชที่เป็นเบส เช่น พีเอช 10.0 และ 12.0 ใช้กำจัดสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนออกจากสารละลาย โดยเฉพาะในสภาวะพีเอชที่สีย้อมมีสีเข้มที่สุดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากแทนนินเป็นวัสดุธรรมชาติ พบได้ใน ใบไม้ ตา เมล็ด ราก และเนื้อเยื่อลำต้น ของพืชหลากหลายชนิด จึงเป็นวัสดุที่หาง่าย ด้วยเหตุนี้ เจลคอนเด็นซ์แทนนินจัดว่าเป็นตัวดูดซับสำหรับกำจัดสีย้อมบิลิเลี่ยนต์กรีนที่มีศักยภาพดีชนิดหนึ่ง



หรือในกรณีของ Methylene blue ในภาพที่ 20 จะเห็นว่า Methylene blue สามารถเปลี่ยนจากโครงสร้างที่มีสีน้ำเงินกลายเป็นโครงสร้างที่ไม่มีสี ด้วยการรับโปรตอนเพียงตัวเดียว ดังนั้นการที่สีของ Methylene blue หายไปจึงไม่ได้หมายความว่าสารเกิดการสลายตัวปริมาณสารยังมีอยู่เท่าเดิม



ภาพที่ 20 การเปลี่ยนแปลงสีของ Methylene blue จากรูปที่มีสีน้ำเงินกลายเป็นไม่มีสี  
ที่มา: MO Memoir (2554)

## รายการอ้างอิง

- Ahmad, L. O., Flores, D. A. M., Okumura, H., Kaneki, Y., Honda, M., Suda, M., & Kunimoto, K.-K. (2015). Application of Modified Persimmon Tannin Gels in the Removal of Dyes from Aqueous Solution. *Recent Advances on Environmental and Life Science*, 149-153.
- Akter, N., Hossain, M. A., Hassan, M. J., Amin, M., Elias, M., Rahman, M. M., . . . Hasnat, M. A. (2016). Amine modified tannin gel for adsorptive removal of Brilliant Green dye. *Journal of environmental chemical engineering*, 4(1), 1231-1241.
- Andersen, W. C., Turnipseed, S. B., Karbiwnyk, C. M., Lee, R. H., Clark, S. B., Rowe, W. D., . . . Miller, K. E. (2007). Quantitative and confirmatory analyses of crystal violet (gentian violet) and brilliant green in fish. *Laboratory Information Bulletin*, 4395, 1.
- Calvete, T., Lima, E. C., Cardoso, N. F., Dias, S. L., & Ribeiro, E. S. (2010). Removal of brilliant green dye from aqueous solutions using home made activated carbons. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 38(5-6), 521-532.
- Dahri, M., Lim, L., Kooh, M., & Chan, C. (2017). Adsorption of brilliant green from aqueous solution by unmodified and chemically modified Tarap (*Artocarpus odoratissimus*) peel. *International journal of environmental science and technology*, 14(12), 2683-2694.
- Ganguly, M., & Ariya, P. A. (2019). Novel Technology for the Removal of Brilliant Green from Water: Influence of Post-Oxidation, Environmental Conditions, and Capping. *ACS omega*, 4(7), 12107-12120.
- Ghaedi, M., Hossainian, H., Montazerzohori, M., Shokrollahi, A., Shojaipour, F., Soylak, M., & Purkait, M. (2011). A novel acorn based adsorbent for the removal of brilliant green. *Desalination*, 281, 226-233.
- Karaer, H., & Uzun, İ. (2013). Adsorption of basic dyestuffs from aqueous solution by modified chitosan. *Desalination and Water Treatment*, 51(10-12), 2294-2305.
- Kismir, Y., & Aroguz, A. Z. (2011). Adsorption characteristics of the hazardous dye Brilliant Green on Saklıkent mud. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 199-206.

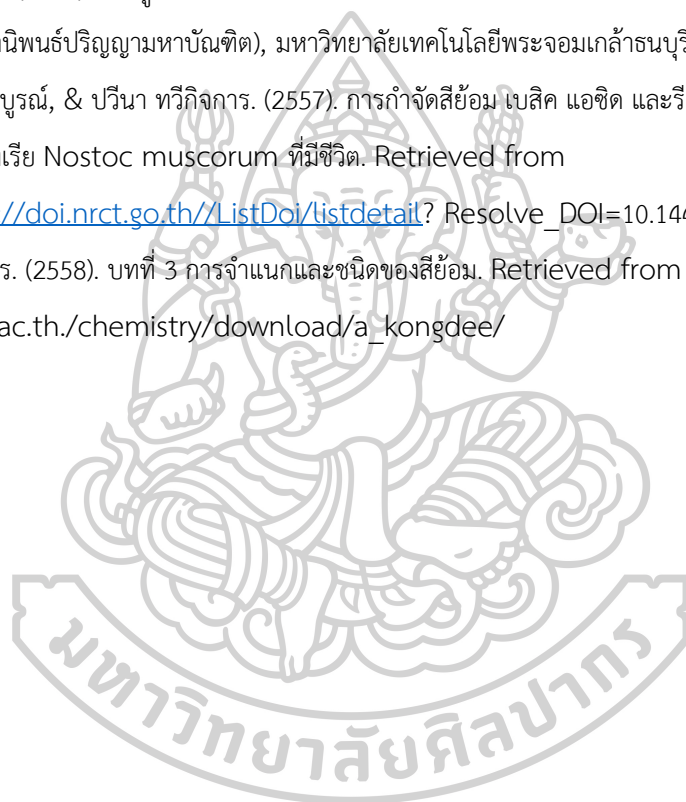
- Laskar, N., & Kumar, U. (2019). Removal of Brilliant Green dye from water by modified Bambusa Tulda: adsorption isotherm, kinetics and thermodynamics study. *International journal of environmental science and technology*, 16(3), 1649-1662.
- Mane, V. S., & Babu, P. V. (2011). Studies on the adsorption of Brilliant Green dye from aqueous solution onto low-cost NaOH treated saw dust. *Desalination*, 273(2-3), 321-329.
- Mane, V. S., Mall, I. D., & Srivastava, V. C. (2007). Kinetic and equilibrium isotherm studies for the adsorptive removal of Brilliant Green dye from aqueous solution by rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 390-400.
- Memoir, M. (2554). สี่หายไม่ได้หมายความว่าสารหาย. Retrieved from [http://tamagozilla.blogspot.com/2011/12/mo-memoir-thursday-8-december-2554\\_08.html](http://tamagozilla.blogspot.com/2011/12/mo-memoir-thursday-8-december-2554_08.html)
- Moawed, E., Wahba, A., & Gabr, R. (2018). Synthesis and application of LGB/St/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> biocomposite for sensitive detection and efficient removal of brilliant green dye from wastewater. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(6), 7225-7232.
- Morisada, S., Rin, T., Ogata, T., Kim, Y. H., & Nakano, Y. (2012). Adsorption recovery of rhodium (III) in acidic chloride solutions by amine-modified tannin gel. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(S2), E34-E38.
- Nakajima, A., & Baba, Y. (2004). Mechanism of hexavalent chromium adsorption by persimmon tannin gel. *Water research*, 38(12), 2859-2864.
- Nandi, B. K., Goswami, A., & Purkait, M. K. (2009). Adsorption characteristics of brilliant green dye on kaolin. *Journal of hazardous materials*, 161(1), 387-395.
- Nassar, M. M., El-Geundi, M. S., & Al-Wahbi, A. A. (2012). Equilibrium modeling and thermodynamic parameters for adsorption of cationic dyes onto Yemen natural clay. *Desalination and Water Treatment*, 44(1-3), 340-349.
- Rahman, M. M., Akter, N., Karim, M. R., Ahmad, N., Rahman, M. M., Siddiquey, I. A., . . . Hasnat, M. A. (2014). Optimization, kinetic and thermodynamic studies for removal of Brilliant Red (X-3B) using Tannin gel. *Journal of environmental chemical engineering*, 2(1), 76-83.
- Rao, C. V., Giri, A. S., Goud, V. V., & Golder, A. K. (2016). Studies on pH-dependent color

- variation and decomposition mechanism of Brilliant Green dye in Fenton reaction. *International Journal of Industrial Chemistry*, 7(1), 71-80.
- Rehman, M. S. U., Munir, M., Ashfaq, M., Rashid, N., Nazar, M. F., Danish, M., & Han, J.-I. (2013). Adsorption of Brilliant Green dye from aqueous solution onto red clay. *Chemical Engineering Journal*, 228, 54-62.
- Rehman, R., Mahmud, T., & Irum, M. (2015). Brilliant green dye elimination from water using Psidium guajava leaves and Solanum tuberosum peels as adsorbents in environmentally benign way. *Journal of Chemistry*, 2015.
- Rehman, R., Muhammad, S. J., & Arshad, M. (2019). Brilliant green and acid orange 74 dyes removal from water by Pinus roxburghii leaves in naturally benign way: an application of green chemistry. *Journal of Chemistry*, 2019.
- Sánchez, M., J, Beltrán, H., J, & Gragera, C., J. (2011). Caesalpinia spinosa and Castanea sativa tannins: A new source of biopolymers with adsorbent capacity. Preliminary assessment on cationic dye removal. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1238-1240.
- Sánchez, M., J, González, V., M, Beltrán, H., J, Gragera, C., J, & Salguero, F., J. (2010). Novel tannin-based adsorbent in removing cationic dye (Methylene Blue) from aqueous solution. Kinetics and equilibrium studies. *Journal of hazardous materials*, 174(1-3), 9-16.
- Sasasia. (2010). Air pollution control and industrial fan design. Retrieved from <http://www.sasasia.net>
- Shirsath, S. R., Patil, A. P., Patil, R., Naik, J. B., Gogate, P. R., & Sonawane, S. H. (2013). Removal of Brilliant Green from wastewater using conventional and ultrasonically prepared poly (acrylic acid) hydrogel loaded with kaolin clay: a comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(3), 914-923.
- Thakur, S. S., & Choubey, S. (2014). Use of Tannin based natural coagulants for water treatment: an alternative to inorganic chemicals. *International Journal of ChemTech Research*, 6(7), 3628-3634.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2556). คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. Retrieved from [http://www.diw.go.th/hawk/job/1\\_8.pdf](http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf)
- จิรวารณ สัจดวงยาง, อ้อมใจ หนูเพ็ง, & มณฑล เลิศคณาวณิชกุล. (2555). การย่อยสลายสีคริสตัลไวโอเล็ตและสี



- มาลาโคร์กรีนทางชีวภาพโดยแบคทีเรียที่แยกได้จากห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยาของอาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 8 มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. Retrieved from <http://www.km.wu.ac.th/file/20120528-tgRGb.pdf>
- ฐิติภรณ์ ปรางเทศ. (2554). การศึกษาการดูดซับสารละลายแคดเมียมของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเศษไม้ไผ่ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,
- ปณิตา สาลี. (2547). การบำบัดสีย้อมประเภทสีไดเร็กซ์จากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมด้วยระบบถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด-เอสปีอาร์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- ประกร รามกุล. (2553). นวัตกรรมตัวดูดซับแทนนินในการแยกโลหะจากสารละลาย. Retrieved from [http://www.eng.ku.ac.th/e-journal\\_th/download.php](http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php)
- ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์. (2546). การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี. Retrieved from <http://www.mahalib.msu.ac.th/arec/dublin.php>
- พงษ์ศักดิ์ ขาวอินทร์. (2555). การกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ปฏิกิริยาชนิดพื้นฟูสภาพได้. Retrieved from <http://www.kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/8926/1/365370.pdf>
- พิพัฒน์ พัทธ์สุธีพงศ์. (2547). การบำบัดสีย้อมจากอุตสาหกรรมผ้าฝ้ายทอมือ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- เพ็ญลักษณ์ เทศสุวรรณ. (2547). ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้เถ้าของโรงงานน้ำยางข้นในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- รัชณี ทรัพย์มากมี. (2548). การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมละลายน้ำได้ด้วยไคโตซานชนิดดัดแปร (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- วนิดา ชูอักษร. (2555). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 17(1), 181-191.
- วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. (2558). ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ. (ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร,
- วิภา พลันสังเกตุ, วรากร วิศพันธ์, & สัมพันธ์ พลันสังเกตุ. (2553). ฤทธิ์ด้านจุลชีพและประสิทธิภาพในการตกตะกอนกับไอออนโลหะของสารสกัดแทนนินจากพืชบางชนิด (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยทักษิณ
- ,
- ศานิต ไชยยะ. (2547). อุณหพลศาสตร์และจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมบนสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
- สกุลรัตน์ รัตนายน. (2551). การปรับปรุงกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำทิ้งจากบ้านเรือนของกรุงเทพมหานครด้วยสารลดแรงตึงผิว เพื่อกำจัดสีย้อมเอซิดออกจากน้ำเสียฟอกย้อมสิ่งทอ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
- สนธิรัตน์ กลั่นกรอง. (2547). การดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ไคโอลินเคลือบด้วยไคโตซาน (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,

- สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์, & เฉลิมขวัญ ช่างปัง. (2548). การปรับปรุงพื้นผิวถ่านกัมมันต์โดยการออกซิเดชันทางเคมี เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมอะนิลีน และโครเมียม. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. (2553). Archive for the category. Retrieved from <http://www.nawaporn.wordpress.com/category/>
- สุกานดา กาสังข์. (2548). การพัฒนาและปรับปรุงวัสดุดูดซับราคาถูกเพื่อใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ และสีย้อมเบสิก (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- สุรชาติ พงษ์ผลไสว. (2557). การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 141 และสีย้อมเบสิก เรด 14 โดยใช้เปลือกสับปะรด (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
- สุนิรัตน์ เรืองสมบุญ, & ปวีณา ทวีกิจการ. (2557). การกำจัดสีย้อม เบสิก แอซิด และรีแอคทีฟโดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc muscorum* ที่มีชีวิต. Retrieved from [http://doi.nrct.go.th/ListDoi/listdetail? Resolve\\_DOI=10.14457/KMITL.res.2014.42](http://doi.nrct.go.th/ListDoi/listdetail?Resolve_DOI=10.14457/KMITL.res.2014.42)
- อรุณี คงดี อัคร. (2558). บทที่ 3 การจำแนกและชนิดของสีย้อม. Retrieved from [http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a\\_kongdee/](http://www.science.mju.ac.th/chemistry/download/a_kongdee/)





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศิริวรรณ สมจิตต์
วัน เดือน ปี เกิด	20 เมษายน 2526
สถานที่เกิด	อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จันทบุรี พ.ศ. 2557 ศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	53/2 หมู่ 8 ต.ตะกาดเจ้า อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี 22120 E-mail address: siriwan_somjit@hotmail.com

