



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง  
ด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

Adsorption of Textile Dyes in Wastewater from The Doi Tung Development Project  
By Water Hyacinth Leaf Powder and Commercial Coconut Shell Carbon

นามผู้วิจัย นางสาวบุษยา มากงลาด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

( รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

( รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม. )

ประธานสาขาวิชา

( ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย  
ด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

Adsorption of Textile Dyes in Wastewater from The Doi Tung Development Project  
By Water Hyacinth Leaf Powder and Commercial Coconut Shell Carbon

โดย

นางสาวบุษยา มากงลาด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิต)

พ.ศ. 2555

บุษยา มากกลาด 2555: การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า  
โครงการพัฒนาอยตุง ด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์  
สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์  
นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 148 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงใบผักตบชวาและถ่าน  
กะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยตุง  
ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผลของพีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า  
ระยะเวลาในการเขย่า ระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐาน  
ผสมและปริมาณตัวดูดซับ ผลการศึกษา พบว่า ผงใบผักตบชวา 1 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ 6  
ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 ที่สภาวะเหมาะสม คือ พีเอช 5 ความเร็วรอบการเขย่า  
100 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่า 30 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุล 150 นาที และความเข้มข้น  
ของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5  
กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ 9 ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 93.04 ที่สภาวะเหมาะสม คือ  
พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาการเขย่า 60 นาที ระยะเวลาเข้าสู่ภาวะ  
สมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัม/ลิตร โดยกลไก  
การดูดซับสีย้อมของผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับไอโซ  
เทอร์มของฟรุนดลิชและแลงเมียร์ ตามลำดับ การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง พบว่า อัตราการ  
ไหลที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เท่ากับ 60 มิลลิลิตร/นาที  
เมื่อใช้ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 373 กรัม เริ่มหมดประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อบำบัดสีย้อม  
ในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมที่ 25.2 ลิตร และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอย  
ตุงที่ 3.6 ลิตร ในการประยุกต์ใช้จริงแบบแบตช์ โดยใช้ผงใบผักตบชวา 200 กรัม สามารถกำจัดสี  
ย้อมในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 10 ลิตร ได้ร้อยละ 44.17 และสามารถกำจัดสีย้อมในน้ำ  
ทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอยตุง ได้ร้อยละ 46.31

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Budsaya Makonglad 2012: Adsorption of Textile Dyes in Wastewater from The Doi Tung Development Project By Water Hyacinth Leaf Powder and Commercial Coconut Shell Carbon. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 148 pages.

The objective of this research was to study the feasibility of using water hyacinth leaf powder and commercial coconut shell carbon to adsorb dyes in textile wastewater from Doi Tung Development Project. Factors influencing dyes adsorption were studied as a function of pH, agitation rate, agitation time, contact time, concentration of mixed standard dyes solution and adsorbent dose. The results showed that only six dyes were adsorbed by the water hyacinth leaf powder at average adsorption of 55.43%. Under the optimal condition 1 g of adsorbent, pH 5, 100 rpm of agitation rate, 30 min of agitation time and 150 min of contact time, and 30 mg/L of mixed standard dyes solution, whereas commercial coconut shell carbon, nine dyes were adsorbed at average adsorption of 93.04% under the optimal conditions 5 g of adsorbent, pH 7, 50 rpm of agitation rate agitation time 60 min and contact time 30 min, and 40 mg/L of mixed standard dyes solution. The adsorption in batch process of water hyacinth leaf powder, and commercial coconut shell carbon was conformed with Freundlich and Langmuir isotherms respectively. Under these condition the average highest dyes removal efficiency in textile wastewater from Doi Tung Development Project by water hyacinth leaf powder and commercial coconut shell carbon were 69.65% and 43.34% respectively. Continuous experiments was conducted and found that 60 mL/min was the suitable flow rate for remove dyes by commercial coconut shell carbon. The break point of 373 g of commercial coconut shell carbon found to be 19.8 and 3.6 L. for mixed standard dyes solution and textile wastewater respectively. In addition field test, the batch experiment by using 200 g of water hyacinth leaf powder can remove dyes from 10 L. of the mixed standard dyes solution at 44.17% and from textile wastewater at 46.31%

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รอง ที่ได้  
สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ  
และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่  
ทำการศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย และขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์ วาระรัมย์  
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในตลอดจนเจ้าหน้าที่วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาออยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้ความ  
อนุเคราะห์ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจาก โรงงานย้อมผ้าออยตุง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่  
ความร่วมมือในการศึกษาวิจัยเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณพระครูวิสุทธาจารย์วิมล (เฉลิม วงศ์ใจเย็น) คุณพ่อและคุณแม่ ที่ได้  
อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง รวมถึงขอบคุณพี่ๆ  
สิ่งแวดล้อมรุ่น 32 เพื่อนๆ สิ่งแวดล้อมรุ่น 33 และตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ความ  
ช่วยเหลือในการศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

บุษยา มากงลาด

ตุลาคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	90
สรุป	90
ข้อเสนอแนะ	93
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	148

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน	12
2	คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยฝักตบชวา	18
3	องค์ประกอบในฝักตบชวาแห้ง	18
4	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	19
5	ความยาวคลื่นที่แต่ละสีย้อมจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง 9 ชนิด ที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด	44
6	ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 9 ชนิดด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	55
7	อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	57
8	อิทธิพลของความเร็วยอบในการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	58
9	อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	60
10	อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	62
11	อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	64
12	อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	66
13	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ผงใบฝักตบชวา ทำการทดลอง 7 ชั่วโมง	74

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ทำการทดลอง 7 ชั่วโมง	75
15	ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่อัตราไหล 60, 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที	76
16	ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์หลังการฟื้นฟูสภาพ ในการดูดซับสี ย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที	79
17	อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง	82
18	คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง	83
19	ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยทำการทดลองแบบแบตช์	84
20	ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยทำการทดลองแบบแบตช์	86
21	ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที	87
22	ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริงที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที	89

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบื้องต้นแต่ละสีด้วยผงใบผักตบชวา	98
2	ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบื้องต้นแต่ละสีด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	98
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับพีเอช 4	99
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับพีเอช 5	99
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับพีเอช 6	100
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับพีเอช 7	100
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับพีเอช 8	101
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 4	101
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 5	102
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 6	102
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 7	103
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 8	104
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วรอบการเขย่า 0 รอบต่อนาที	104

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาด้วยความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที	105
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาด้วยความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที	105
16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาด้วยความเร็วรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที	106
17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาด้วยความเร็วรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที	106
18	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 0 รอบต่อนาที	107
19	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที	107
20	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที	108
21	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที	109
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที	109







## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
57	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	130
59	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	131
60	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	132
61	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	132
62	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	133
63	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยม มาตรฐานผสม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร	133
64	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยม มาตรฐานผสม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	134
65	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสี่เหลี่ยม มาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร	135

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
65	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม มาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร	135
66	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม มาตรฐานผสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	136
67	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม	137
68	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม	137
69	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม	138
70	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม	138
71	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม	139
72	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม	139
73	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม	140
74	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม	140
75	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม	141

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
76	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม	142
77	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม	142
78	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม	143
79	การนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบดซ์มาดูดซับสีย้อมจาก สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักคตบชวาทำการทดลอง 7 ชั่วโมง	144
80	การนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบแบดซ์มาดูดซับสีย้อมจาก สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ทำการ ทดลอง 7 ชั่วโมง	144
81	ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงใบฝักคตบชวา	145
82	ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	146
83	ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยคองด้วยผงใบฝักคตบชวาโดยทำการทดลองแบบแบดซ์	146
84	ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยคองด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบแบดซ์	147
85	ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนา คอยคองด้วยผงใบฝักคตบชวาโดยการนำผงใบฝักคตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที	147

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีไคเร็กซ์	6
2	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ (Reactive Blue 4)	6
3	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก	7
4	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแอซิด (Acid Red 266)	8
5	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์ (Mordant Yellow 30)	8
6	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแฉัด	9
7	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์	10
8	สูตรโครงสร้างโมเลกุลสีดิสเพิร์ส (Disperse Blue 14)	10
9	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิก	11
10	ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฝักตบขาว	17
11	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ	22
12	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	23
13	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	24
14	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	24
15	การดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	26
16	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	26
17	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ	29
18	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	32
19	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	33
20	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	34
21	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	35

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	36
23	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	36
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	38
25	การเตรียมตัวดูดซับผงใบผักตบชวา	45
26	การเขย่าด้วยเครื่องเขย่า	47
27	การศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่อง	50
28	การทดลองในการนำไปประยุกต์ใช้จริง	51
29	ผงใบผักตบชวา	53
30	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	54
31	กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม 9 ชนิดด้วยใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	56
32	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช	57
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า	59
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า	61
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล	63
36	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นสารละลายสีข้อมมาตรฐาน	65

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงซักฟอกขาวและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ	67
38	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน	68
39	ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงซักฟอกขาว	68
40	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	71
41	ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์	71
42	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาตรสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่อัตราไหล 60, 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที	79
43	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ฟื้นฟูสภาพกับปริมาตรสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที	82
44	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงซักฟอกขาวไปประยุกต์ใช้จริงกับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล	83
45	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอद्यตุงที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที	91

## การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

### Adsorption of Textile Dyes in Wastewater from The Doi Tung Development Project By Water Hyacinth Leaf Powder and Commercial Coconut Shell Carbon

#### คำนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมฟอกย้อมในประเทศไทยมีการขยายตัวตามอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ผลิตเครื่องนุ่งห่มที่เป็นปัจจัยหนึ่งในปัจจัยสี่ของการดำรงชีวิต อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมต้องใช้น้ำจำนวนมาก ทำให้น้ำเสียมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ปัญหาน้ำเสีย คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความสกปรกในรูปของ BOD, COD และสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องสีซึ่งเกิดจากสีย้อม (Dye) ถ้าบำบัดได้ไม่หมด น้ำเสียที่ปล่อยออกสู่แหล่งน้ำชุมชนจะมีสีที่ฟุ้งกระจาย ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำอนุภาคของสีอาจไปขัดขวางการกระจายของแสงในน้ำ ทำให้พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์

ออยตุงหรือโครงการพัฒนาออยตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ เป็นพื้นที่ที่มีการประกอบกิจการโรงงานย้อมผ้าที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมและเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สามารถสร้างรายได้จำนวนมากแก่ชุมชนในพื้นที่ กระบวนการผลิตของโรงงานฟอกย้อมนั้น นอกจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้วนั้น ย่อมหลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต โดยเฉพาะน้ำเสียที่มีปนเปื้อนสีย้อมจากกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการบำบัดของเสียก่อนปล่อยออกสู่สาธารณะ อันจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

ดังนั้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้น ไปสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจากกระบวนการผลิตในพื้นที่ออยตุง โดยวิธีการดูดซับด้วยตัวดูดซับชีวมวล (Bioadsorbent) ซึ่งการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมที่มีความสามารถในการละลายน้ำ โดยการใช้อย่างมีประสิทธิภาพคือ ผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ เพราะผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ เป็นตัวดูดซับทางธรรมชาติที่หาง่าย ราคาถูก พร้อมทั้งมีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี ผักตบชวาหาได้ง่ายในท้องถิ่นและเป็นการลด

ปริมาณผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชน้ำอีกทางหนึ่งและยังสามารถช่วยลดต้นทุนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีแบบแบดซ์ การทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ชุดเครื่องกรองประดิษฐ์และการทดลองแบบประยุกต์ใช้จริง แล้วนำมาทดลองกับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในสารละลายสีย้อมมาตรฐาน
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าคอตตง ด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์



## การตรวจเอกสาร

### 1. สีย้อม

#### คำนิยามศัพท์

สีย้อม (Dyestuffs) หมายถึง สารให้สีที่สามารถจับติดวัสดุด้วยตัวเองหรือด้วยการชักนำโดยปฏิกิริยาในกระบวนการย้อมหรือกระบวนการพิมพ์ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก., 2530)

สีไดเรกต์ (Direct dyes) หมายถึง สีย้อมซึ่งเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้อนุโมลสีที่มีประจุลบสามารถจับติดเส้นใยจำพวกเซลลูโลสได้โดยตรง ตามปกติใช้ย้อมในน้ำย้อมที่มีเกลือเป็นอิเล็กโทรไลต์ (มอก., 2530)

#### 1.1 สีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สกัดจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหิน เมื่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว เช่น เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนพทาลิน และพาราฟิน ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้ จะถูกเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ สีย้อมเป็นสารที่ละลายน้ำได้ หรือสามารถทำให้ละลายน้ำได้ ดูดติดเส้นใยได้ สีย้อมที่ผลิตขึ้นมา มีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับเส้นใย และกระบวนการย้อมที่มีลักษณะแตกต่างกันไป การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่นอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีดูดติดเส้นใย คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' force) แรงไอออน (Ionic force) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อม กับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยแรงยึดติด 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดที่ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

## 1.2 การจำแนกสีย้อม

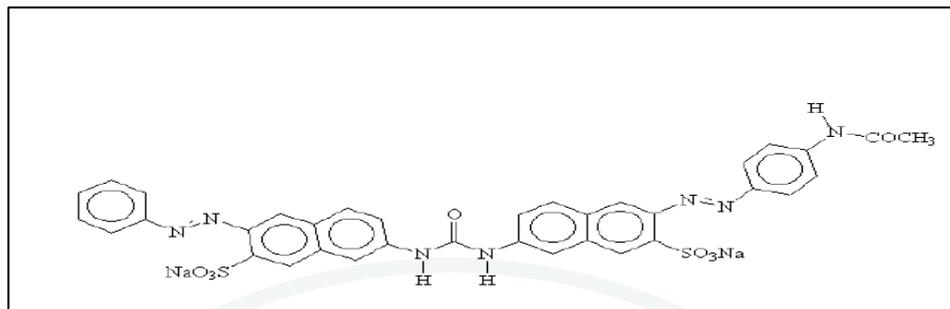
จำแนกสีย้อมสามารถทำได้หลายลักษณะ คือ การจำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้ 2 ชนิด (อัจฉลาพร, 2527) คือ สีย้อมละลายน้ำได้เรียกว่า สีย้อม (Dye) และสีย้อมไม่ละลายน้ำเรียกว่า พิกเมนต์ (Pigment)

สีย้อมจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี การจำแนกแบบนี้มีประโยชน์ในการอธิบายกลไกของการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสียแต่ไม่สะดวกในการจดจำ การจำแนกลักษณะนี้จึงไม่นิยมใช้กันในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม สีย้อมในกลุ่มเคมีเดียวกันมีวิธีย้อมแตกต่างกันเมื่อใช้กับเส้นใยต่างชนิดกัน เช่น สีย้อมในหมู่อะโซบางตัวย้อมติดสิ่งง่าย ๆ เรียกว่าสีย้อมไคเร็กต์ (Direct dye) แต่บางตัวจะติดได้เมื่อน้ำย้อมมีภาวะเป็นกรด เรียกว่า สีย้อมกรด (Acid dye) บางตัวอาจต้องมีสารบางอย่างมาช่วยจึงจะติดเส้นใยได้ เรียกว่า สีย้อมออร์แดนท์ (Mordant dye)

การจำแนกสีย้อมที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานนี้ทำให้มีความสะดวกกับผู้ใช้งานในทางปฏิบัติ ดังแสดงในตารางที่ 1 ทางสมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสีย้อม (The Society of Dyes and Colourists) เห็นด้วยและยอมรับวิธีจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งานมาใช้ในการจำแนกสีย้อมโดยทั่วไป ดังนี้

### 1.2.1 สีย้อมไคเร็กต์ (Direct dye)

ไคเร็กต์เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้ ย้อมจากน้ำที่ละลายสีย้อมโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเส้นใยเซลลูโลส สามารถย้อมผ้าได้ทันทีโดยไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดเหมือนกับสีย้อมอื่น ๆ จึงเรียกว่า สีย้อมไคเร็กต์หรือสีย้อมโดยตรง สีย้อมชนิดนี้บางครั้งเรียกว่า สีย้อมฝ้าย ซึ่งชื่อนี้มาจากการที่สีย้อมชนิดนี้สามารถย้อมติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยย้อมใด ๆ แต่ในปัจจุบันการย้อมสีย้อมไคเร็กต์จะใช้เกลือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมให้ดียิ่งขึ้น สีย้อมชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบพวกอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้สีย้อมละลายน้ำได้ มีประจุลบดังภาพที่ 1 นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเนื่องจากสีย้อมจะติดเส้นใยได้ด้วยโมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีย้อมชนิดนี้มีโทนสีคุณสมบัติในการย้อม ความคงทน ตลอดจนราคาที่แตกต่างกันมาก ซึ่งถ้าเป็นสีย้อมที่มีความคงทนในการย้อมดี โครงสร้างก็จะซับซ้อนมากขึ้น ราคา ก็จะแพงมากขึ้นด้วย

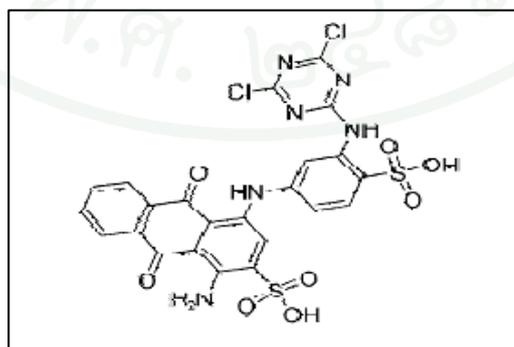


ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีไคเร็กซ์

### 1.2.2 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ เป็นสีข้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ดีที่สุดที่มีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำข้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติในการละลายและการดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีนี้เข้าไปอยู่ภายในเส้นใยเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

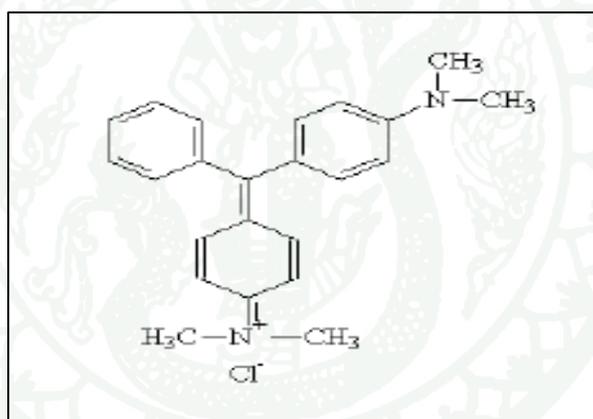
สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ (1) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70 – 75 องศาเซลเซียส และ (2) กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟจะให้สีที่สดใสและสีจะติดทนในทุกสภาวะ เนื่องจากสีรีแอคทีฟ มีขนาดโมเลกุลค่อนข้างเล็กจึงทำให้สีแทรกซึมเข้าสู่เส้นใยได้ดี อีกทั้งยังมีความคงทนต่อแสงและการซักได้ดี



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟ (Reactive blue 4)

### 1.2.3 สีเบสิก (Basic dye)

สีเบสิกเป็นสีของเบสอินทรีย์ (Organic base) ละลายน้ำได้ ตัวสีข้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ให้แคทไอออน (Cation) บางครั้งจึงเรียกสีข้อมชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน (Cationic dye) สามารถข้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของสีจะจับกับประจุลบของเส้นใย สีประเภทนี้มีความคงทนต่ำ นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออก ที่นิยมความสดใสของสีมากกว่าความคงทนของสี สามารถใช้ข้อมเส้นใยอะคริลิกได้ ใช้ข้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด แต่ข้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่ติดเลย ตัวสีข้อมเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครโมฟอร์ให้แคทไอออน (Cation) บางครั้งจึงเรียกสีข้อมชนิดนี้ว่า สีแคทไอออน สามารถข้อมติดกับเส้นใยได้โดยประจุบวกของสีจะจับกับประจุลบของเส้นใย สีข้อมกลุ่มนี้มักมีหมู่เอมีน (Amine group) ในโมเลกุล

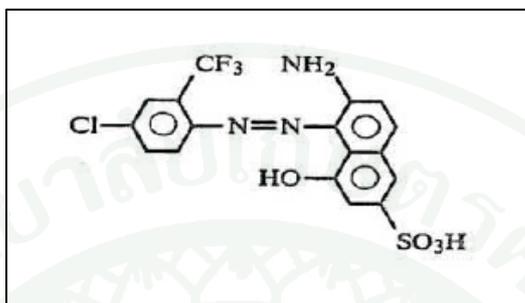


ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีเบสิก

### 1.2.4 สีแอซิด (Acid dye)

สีแอซิดหรือสีกรดเกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ มีแอนไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี สีในกลุ่มนี้ต้องข้อมในน้ำที่มีสภาวะเป็นกรด สีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่ายการเก็บและเข้าหีบห่อต้องระมัดระวังเป็นอย่างดีถ้าสีดูดความชื้นเข้าไปจะเสื่อมสภาพเร็ว ตัวสีสามารถดูดติด (Affinity) เส้นใยโปรตีนโดยตรง ผลิตขึ้นเพื่อใช้ข้อมเส้นใยขนสัตว์และไหม

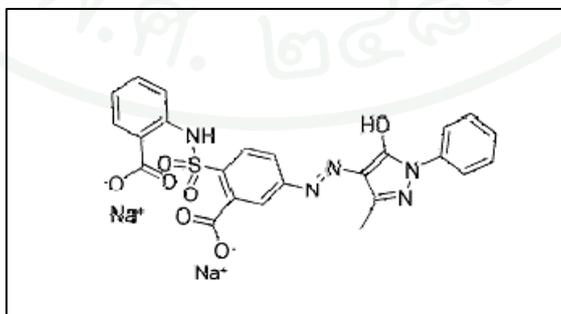
สำหรับการเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนโมเลกุลของสีกับประจุบวกบนโมเลกุลของเส้นใย และสีกลุ่มนี้มักมี กลุ่มซัลโฟนิค (Sulfonic groups) ซึ่งเป็นตัวให้ประจุลบในน้ำ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแอซิด (Acid red 266)

#### 1.2.5 สีมอร์แดนท์ (Mordant dye)

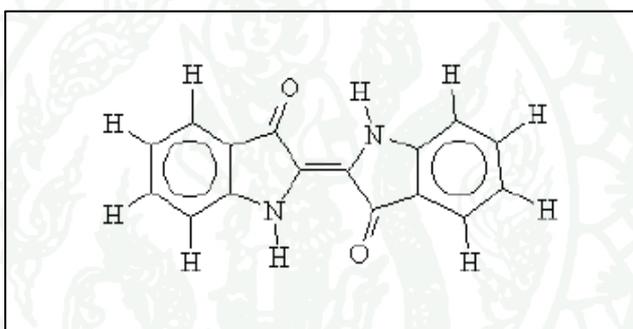
สีมอร์แดนท์ หรือ สีโครม เป็นสีที่มีโครงสร้างเคมี เหมือนกับ สีเอซิดมาก เพียงแต่จะมีกลุ่มเคมีซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบ Co-ordinate ที่ถาวรได้เพิ่มขึ้น สารประกอบ Co-ordinate ใหม่จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า จึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้น สีมอร์แดนท์มีคุณสมบัติในการย้อมเหมือนกับสีเอซิด แต่จะใช้เป็นสีเอซิดไม่ได้ เพราะถ้ายังไม่ได้ให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียมสีจะไม่ทนต่อแสง สีนี้ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน



ภาพที่ 5 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีมอร์แดนท์ (Mordant yellow 30)

### 1.2.6 สีแคว้ต (Vat dye)

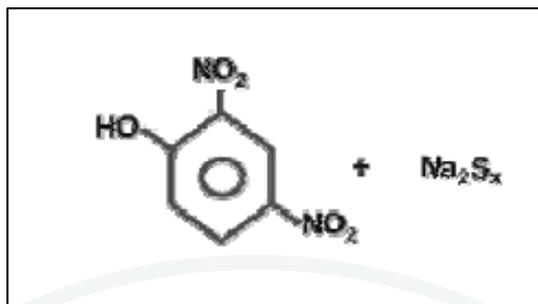
สีแคว้ตได้ชื่อมาจากที่ตัวสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ มีกลุ่มคีโตน (Keto group) ดังภาพที่ 6 สีแคว้ตมักใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะเส้นใยฝ้าย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำต้องใช้สารที่เหมาะสมรีดิวซ์ ทำให้สีชนิดนี้สามารถละลายน้ำได้ เช่นเดียวกับสีซัลเฟอร์ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้กันคือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ สีย้อมเมื่อรีดิวซ์แล้วจะให้สารประกอบลิวโค (Leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสกับอากาศสารประกอบลิวโค จะถูกออกซิไดส์กลับไปเป็นภาพที่ไม่ละลายน้ำทำให้ติดทนถาวรกับเส้นใย สีย้อมชนิดนี้มี ส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 ชนิด คือ สีครามอินดิโก (Indigo) และสีอะมิโนแอนทราควิโนน (Aminoanthraquinone)



ภาพที่ 6 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีแคว้ต

### 1.2.7 สีซัลเฟอร์ (Sulphur dye)

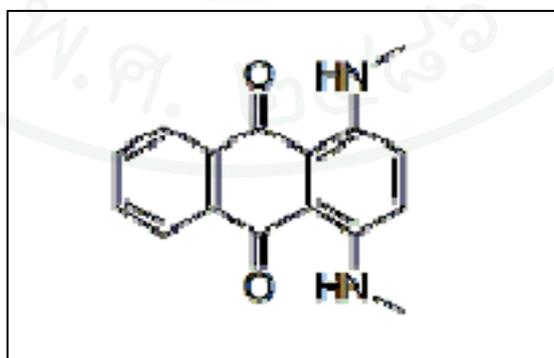
สีซัลเฟอร์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบในส่วนที่เป็นโครโมฟอร์และส่วนของสายโซ่พอลิซัลไฟด์ ดังภาพที่ 7 สีชนิดนี้ย้อมง่ายมีราคาถูก ความคงทนต่อน้ำดี ใช้ย้อมเส้นใยฝ้ายโดยเฉพาะ มีราคาค่อนข้างถูก สีที่ย้อมได้ไม่ค่อยสดใส ปกติแล้วสีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่ในปัจจุบันผู้ผลิตได้ทำการผลิตสีย้อมชนิดนี้ขึ้นมาใหม่โดยนำตัวสีย้อมไปรีดิวซ์ ทำให้สีชนิดนี้สามารถละลายน้ำได้ การที่สีย้อมชนิดนี้ถูกเรียกว่า สีซัลเฟอร์ ก็เพราะว่าสารที่จะนำมารีดิวซ์เป็นสารละลายของโซเดียมซัลไฟด์และโครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์ประกอบไปด้วยหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic group) สีย้อมชนิดนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแทรกซึมเข้าไปใยเส้นใยแล้วสามารถยึดติดกับเส้นใยได้อย่างถาวรได้โดยการออกซิไดส์สีกลับคืนสู่รูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยการทำปฏิกิริยากับอากาศ (Air oxidation)



ภาพที่ 7 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีซัลเฟอร์

### 1.2.8 สีดิสเพิร์ส (Disperse dye)

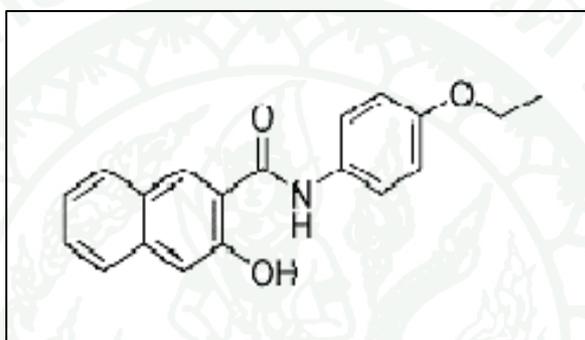
สีชนิดนี้ใช้ย้อมเส้นใยอะซิเตทหรือเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย สีย้อมชนิดนี้ไม่ละลายน้ำ แต่มีลักษณะเป็นตะอองละเอียดลอยตัวอยู่ในน้ำ เมื่อมีสารที่ช่วยกระจาย (Dispersing agent) ที่เหมาะสมมาช่วยจะสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดาได้โดยไม่ต้องใช้สารอย่างอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ที่จะช่วยให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยได้มากขึ้นเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ สีดิสเพิร์สอาจแบ่งได้อีกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามลักษณะส่วนประกอบทางเคมี ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo dyes) และ สีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน (Aminoanthraquinone) ซึ่งสีทั้ง 2 กลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanolanine) :  $-NH_2-CH_2-CH_2-OH$  หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ 8 ทั้งนี้ สีดิสเพิร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควันทันหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น



ภาพที่ 8 สูตรโครงสร้างโมเลกุลสีดิสเพิร์ส (Disperse blue 14)

### 1.2.9 สีอะโซอิก (Azoic dye)

สีในกลุ่มนี้เป็นสารประกอบอะโซ (Azo) แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำมาย้อมทับอีกครั้งด้วยเกลือไดอะโซเนียม (Diazonium salt) เกลื่อนี้จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอล เกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย ที่มีสูตรโครงสร้างของสีอะโซอิกดังภาพที่ 9 สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลสและไนลอน สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู



ภาพที่ 9 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของสีอะโซอิก

### 1.2.10 สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dye)

สีชนิดนี้เดิมเป็นสีมอร์แดนท์ เมื่อนำมาให้ทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะจะได้สารประกอบที่ให้สีชนิดใหม่ นิยมใช้เกลือของโครเมียมมาทำปฏิกิริยาสีเมทัลคอมเพล็กซ์สามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของน้ำย้อม ได้แก่

- 1) สีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกรด
- 2) สีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกลางสีชนิดนี้ถ้ามีเกลืออนินทรีย์ในน้ำจะทำให้ละลายน้ำได้ไม่ดี ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำค่อนข้างบริสุทธิ์ไม่มีเกลือแร่ปนอยู่

ตารางที่ 1 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสี ย้อม	สมบัติกายภาพ และเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับ สีย้อม	พันธะหรือ กลไกการ ติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีไดเร็กต์ (Direct dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- พันธะไฮโดรเจน - พันธะโคออร์ดิเนชัน	- แห้งเส้นใยในสารละลายต่าง อ่อน - เติมอิเล็กโตรไลต์โซเดียม คลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต และ ย้อมสีที่อุณหภูมิ 98 องศา เซลเซียส
สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น	- ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสคอส	- พันธะโควาเลนต์	- แห้งเส้นใยในสารละลายกรด - เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้น ใย - เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ระหว่างสีกับเส้นใย
สีเบสิก (Basic dye)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี	- อะคริลิก	- พันธะไฮโดรเจน - พันธะโคออร์ดิเนชัน	- แห้งเส้นใยในสารละลายพี เอช 4-6 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิ ให้ได้ 100 – 105 องศา เซลเซียส
สีเอซิด (Acid dyes)	- กระจุลบ - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไฮโดรเจน - พันธะโคออร์ดิเนชัน	- แห้งเส้นใยในสารละลายพี เอช 3-5 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุ บวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบ ที่อุณหภูมิ 50-110 องศา เซลเซียส

## ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทสี ย้อม	สมบัติ กายภาพ และเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสม กับ สีย้อม	พันธะหรือ กลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีมอร์แดนท์ หรือโครม (Mordant or chrome)	-ประจุลบ -ละลายน้ำดี -สีติดแน่น	-ขนสัตว์	- คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว เส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลาย กรด -เติมโซเดียมไดโครเมตและ สีย้อม -เพิ่มอุณหภูมิถึง 98 องศา เซลเซียส
สีวัต (Vat dye)	-เป็นคอล ลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยา ในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	- ปฏิกิริยาตก ตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลาย ด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอ์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้น ใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีซัลเฟอร์ (Sulphur dye)	-เป็นคอล ลอยด์หลัง เกิดปฏิกิริยา ในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	- ปฏิกิริยาตก ตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลาย ด่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอ์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้น ใยด้วยอิเล็กโตรไลต์

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทสี ย้อม	สมบัติกายภาพ และเคมี	เส้นใยที่ เหมาะสมกับ สีย้อม	พันธะหรือ กลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีดิสเพอร์ส (Disperse dye)	- ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้ น้อยมาก - กระจายอยู่ใน น้ำเป็นอนุภาค คอลลอยด์ - สัตัดแน่นดี	- อีคลีริก - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต	- คอลลอยด์ของ สีย้อมดูดติดผิว เส้นใย	- แช่เส้นใยใน สารละลายฟิเอช 4.5 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่ม อุณหภูมิให้ได้ 130 องศาเซลเซียส
สีอะโซอิก (Azoic dye)	- เป็นคอลลอยด์ หลังเกิดปฏิกิริยา ในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สัตัดแน่น	- ฝ้าย - วิสคอส	- ปฏิกิริยาดก ตะกอนผลึก ภายในเส้นใย	- ละลายสีย้อมใน สารละลายต่างที่มี โซเดียม ซัลเฟต - สีย้อมจะแพร่ กระจายสู่เส้นใย ด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิด ตะกอนผลึก
สีเมทัลคอม เพล็กซ์เอซิด (Metalcomplex acid dye)	- กระจุก - ละลายน้ำน้อย - สัตัดแน่นดี	- ไนลอน - ขนสัตว์	- พันธะไอออนิก	- แช่เส้นใยในสาร ละลายฟิเอช 5-7 - เส้นใยซึ่งสมมติว่า มีประจุบวกติดกับ สีย้อมที่มีประจุลบ ที่อุณหภูมิ 50-110 องศาเซลเซียส

ที่มา: Buckley (1992)

### 1.3 ผลกระทบของสีข้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของสีข้อมต่อสิ่งแวดล้อม หรือสมบัติด้านมลพิษของสีข้อมนั้น พบว่า สีข้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของสีข้อมในน้ำทิ้ง ปัจจุบันมิได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีข้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง เนื่องจากสีข้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่รังเกียจของผู้พบเห็นได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งผลกระทบของน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกข้อมต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1.3.1 สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถทำความสะอาดด้วยตัวเอง (Self Purification) ได้ ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นจากการเกิดปฏิกิริยาแอนแอโรบิก (Anaerobic) และทำให้ไม่สามารถใช้แหล่งน้ำนั้นทำประโยชน์ได้ สารอินทรีย์บางชนิดเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต มีผลทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ในกรณีที่ได้รับสารโดยตรงจากการบริโภคสัตว์น้ำ นอกจากนี้สารพิษเหล่านี้ยังอาจสะสมอยู่ในระบบนิเวศ หากสารนั้นเป็นสารที่สลายตัวได้ยาก

1.3.2 ค่าความเป็นด่าง จะทำให้น้ำทิ้งที่มีค่าพีเอชสูง ๆ ซึ่งเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงแล้ว จะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพราะโดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะดำรงชีพอยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง คือในช่วงพีเอช 6 – 9

1.3.3 อุณหภูมิของน้ำทิ้งที่สูง จะมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง

1.3.4 ปริมาณสารละลายน้ำทั้งหมด อาจทำให้สัตว์น้ำเกิดโรคที่ร้ายแรงได้ และทำให้ไม่สามารถใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ได้

1.3.5 สี ทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ดีของแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณแสงที่จะส่งผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

1.3.6 โลหะหนัก (Heavy Metals) ทำให้เกิดโรคที่ร้ายแรงในสัตว์น้ำ และยังสามารถสะสมอยู่ในระบบนิเวศ ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ รวมทั้งมนุษย์ด้วย

1.3.7 สารแขวนลอย จะเพิ่มสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ สามารถตกตะกอนทำให้แหล่งน้ำตื้นเขินทำให้มีผลกระทบต่อระบบนิเวศและทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำด้วย

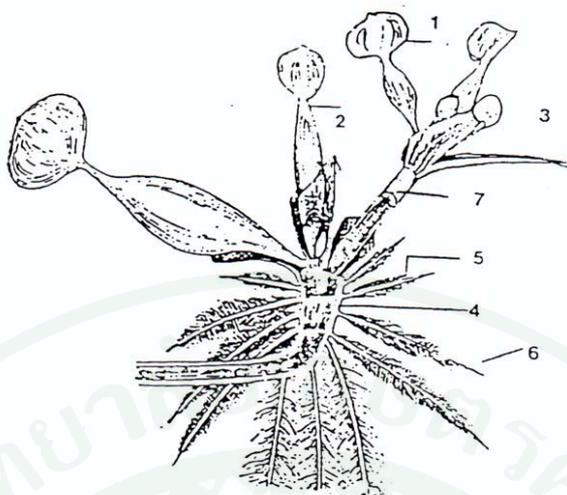
## 2. ผักตบชวา

### 2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ชื่อไทย	: ผักตบชวา
ชื่อสามัญ	: Water hyacinth
ชื่อวิทยาศาสตร์	: <i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms
ชื่อวงศ์	: PONTEDERIACEAE

ผักตบชวาเป็นวัชพืชข้ามปี ประกอบด้วยลำต้นที่มีราก (Rhizomatous System) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 – 6 ซม. และยาวประมาณ 30 ซม. ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลม พองออก ภายในมีเนื้อพรุนคล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องพยุงให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอยโดยแตกต่างออกจากข้อบนลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10 – 90 ซม. และมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6 – 12 ดอก ดังภาพที่ 10

ผักตบชวาจัดเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (Vegetative Propagation) และแบบใช้เพศ (Sexual Reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อเป็นต้นใหม่ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่าทุกระยะเวลา 62 วันหรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้น เป็น 6 แสนต้นภายในเวลาเพียง 8 เดือนสำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (Self Pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้นเนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่โตเร็วจึงก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ต่อแหล่งน้ำ



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบต่างๆ ของผักตบชวา

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| 1. แผ่นใบ   | 2. ท่อนพวงลำต้น |
| 3. ลิเกิวล์ | 4. เหง้า        |
| 5. ขนราก    | 6. หมวกราก      |
| 7. ลำต้น    |                 |

## 2.2 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ pH 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 องศาเซลเซียส และในต้นพืชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 (เปล่งศักดิ์, 2546) ซึ่งในปัจจุบันพบว่าการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ

## 2.3 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

โครงสร้างลำต้นผักตบชวาส่วนใหญ่มีความพรุนคล้ายฟองน้ำ ดังนั้นผักตบชวาจึงมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและดูดซึมน้ำได้สูงดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยฝักตบชวา

ลักษณะ	ค่าเฉลี่ย
เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	0.80-1.20
ความถ่วงจำเพาะ	0.428
ปริมาณความชื้น (%)	8.44
การดูดซึมน้ำ (%)	38.8

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

### 3.4 องค์ประกอบของฝักตบชวา

ต้นฝักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฝักตบชวา พบว่า ฝักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินและแร่ธาตุอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบในฝักตบชวาแห้ง

องค์ประกอบ	สัดส่วนเปอร์เซ็นต์
ลิกนิน	12-13
เซลลูโลส	43-44
เพนโตแซน	14-15
ไนโตรเจน	2.8-3.5
โซเดียม	1.5-2.5
โปแตสเซียม	2.0-3.5
แคลเซียม	0.6-1.3

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

การที่ผักตบชวาประกอบด้วยเซลล์สูงถึงร้อยละ 43-44 จะช่วยให้มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนได้มากยิ่งขึ้น เมื่อปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี

#### 4. ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ เป็นถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน มีลักษณะเป็นเกล็ด เกรด PHO 8×30 (ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for testing and material, (ASTM) การเรียงตั้งไม่เป็นระเบียบทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

สมบัติทางกายภาพ	ค่าที่ตรวจวัด
ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (ASTM เมช/มิลลิเมตร)	
+8 (2.36 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
8×30 (2.36-0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 90
-30 (0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
ความหนาแน่น	น้อยกว่า 0.5 กรัม/ซีซี
ความชื้น	มากกว่าร้อยละ 8 โดยมวล
ปริมาณเถ้า	มากกว่าร้อยละ 3.5 โดยมวล
พีเอช	9-11
พื้นที่ผิว (จากการคำนวณ)	น้อยกว่า 1,100 ตารางเมตร/กรัม
ไอโอดีน นัมเบอร์ (AWWA B 604)	น้อยกว่า 1,050 มิลลิกรัม/กรัม
ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (ASTM 3467-88)	น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมวล
ค่าความแข็ง (ASTM 3802-79)	น้อยกว่าร้อยละ 98

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น การดูดกลิ่น (Deodorization) การดูดสี (Decolourization) การลดสารคลอรีน (Dechlorination) และสารกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นต้น

## 5. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่ออกโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

## 5.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

5.1.1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

5.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

5.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

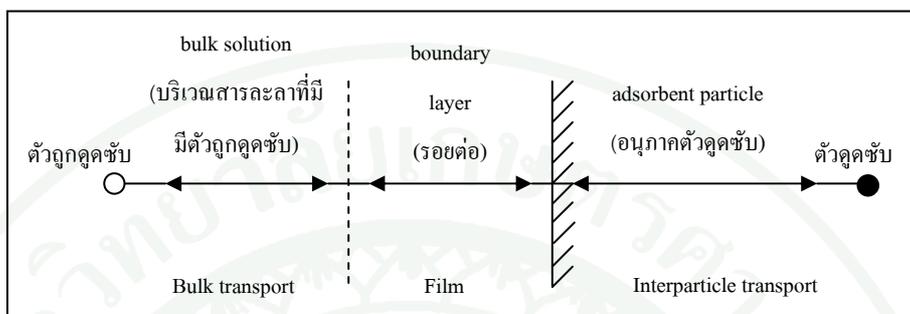
## 5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

5.2.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

5.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

5.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

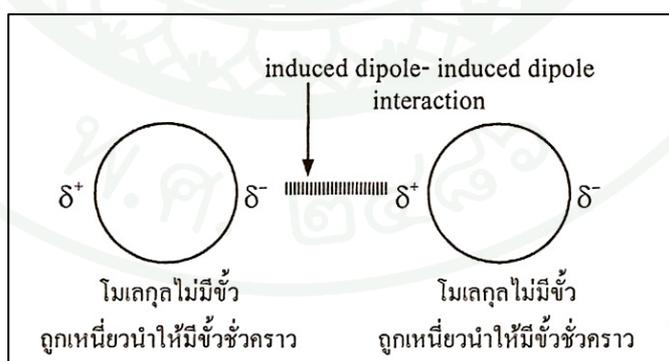
### 5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (Chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

5.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่า แรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (Induce dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced dipole-induced dipole attraction)

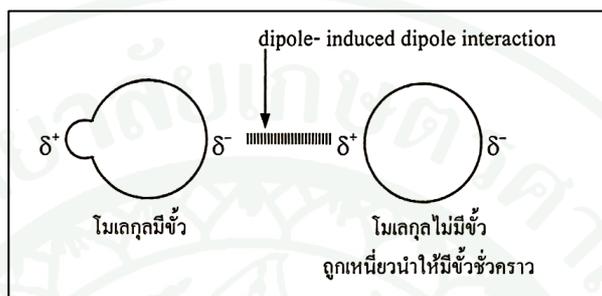
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย



ภาพที่ 12 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

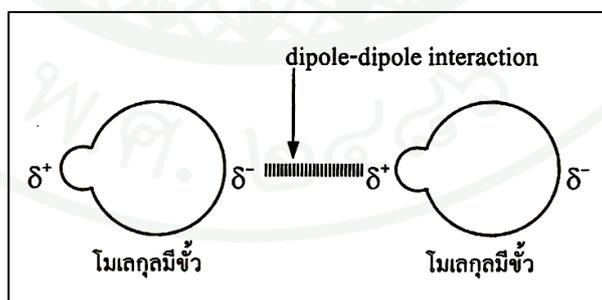
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-induced dipole attraction) ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แรงแดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (Dipole-dipole attraction) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แรงแดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ในกรณีที่มีโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ฮาโลฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพ สามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (Desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

5.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลงั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

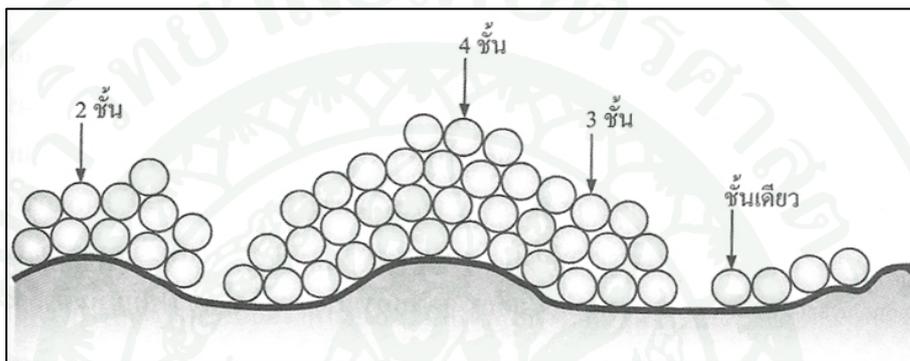
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

## 5.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

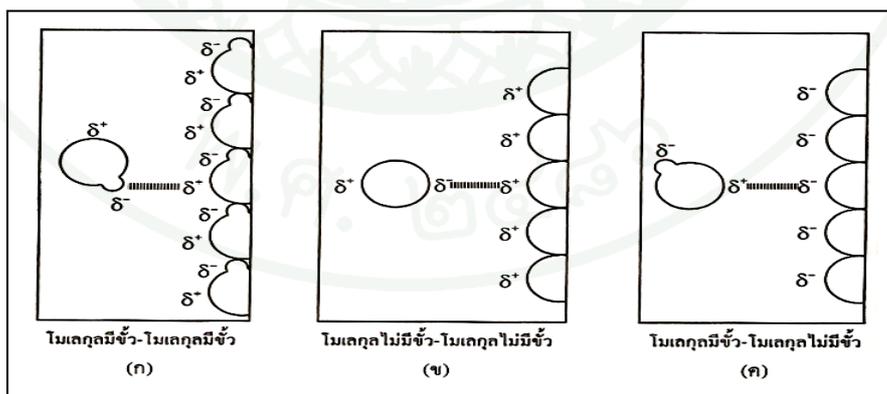
5.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical adsorption van der Waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิว

ตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวดูดซับ จะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 15 การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)



ภาพที่ 16 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

## ภาพที่ 16 (ต่อ)

หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุล ตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้าง โดย Maron and Prutton (1961))

## 5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

5.5.1 อัตราการปั่นกววน เพื่อให้มีการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์มหรือการแพร่เข้าสู่โพรง ถ้าอัตราการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิวในตรงกันข้าม ถ้าอัตราการปั่นกววนสูงจะเกิดฟิล์มบางทำ

ให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดติดผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิว

5.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

5.5.3 ขนาดและลักษณะของสารถูกดูดติดผิว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอน การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้ เพราะว่า แรงดึงดูดระหว่างสารถูกดูดติดผิวและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

5.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดติดผิวได้ดี

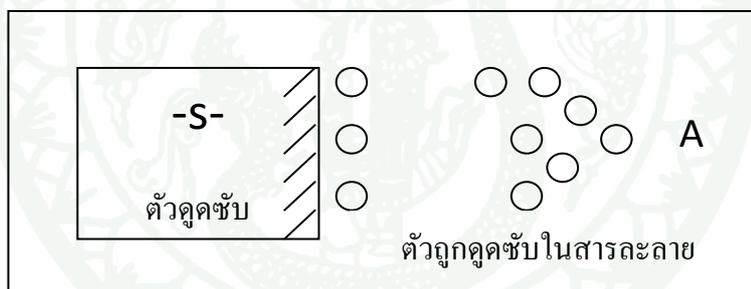
5.5.5 พิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

5.5.6 อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบกระบวนการคายความร้อน

5.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของถังดูดติดผิว โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

### 5.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วน ไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนิน ไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่



ภาพที่ 17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

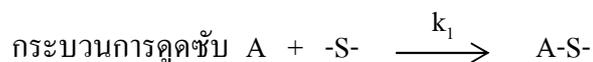
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมล/ลิตร ในสารละลาย

-S- เป็น โมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1- q) เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q)$$



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = K[C]$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล } K = \frac{q}{C} \dots\dots\dots(2)$$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_i - C_e) \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ  $q$  เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

$W$  เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

$V$  เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

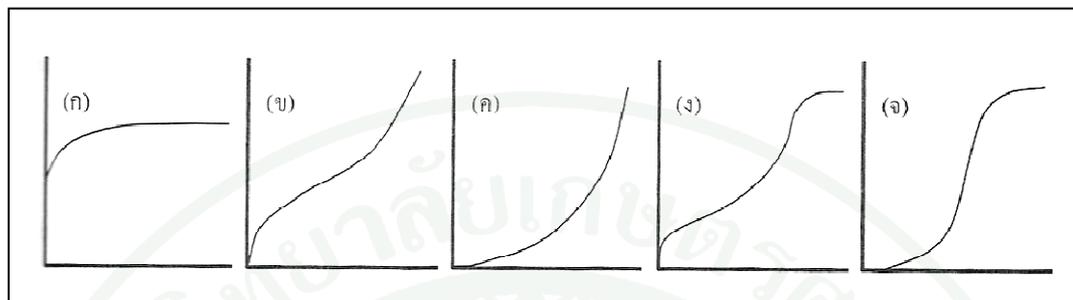
$C_i$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

$C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็น โมลต่อลิตร (mol/l)

### 5.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้างโดย Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 18 รูป (ก) จัดเป็น ไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

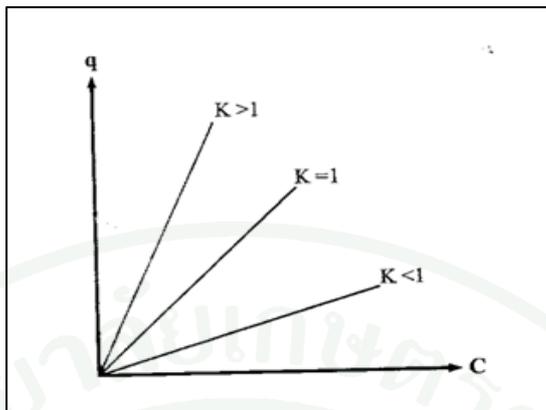
สมการ ไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 3 สมการ ดังนี้

5.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  ตามสมการที่ (2)

$$K = \frac{q}{C}$$

จะได้  $q = KC$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



ภาพที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

$K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

5.7.2 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) โดยที่การดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

$K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป  $n$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(5)$$

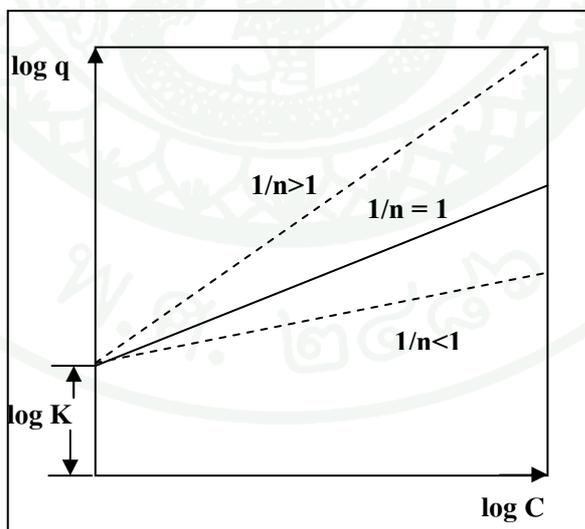
เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$  คือ ความชันของกราฟ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K$



ภาพที่ 20 กราฟความชันระหว่าง  $\log q$  และ  $\log C$

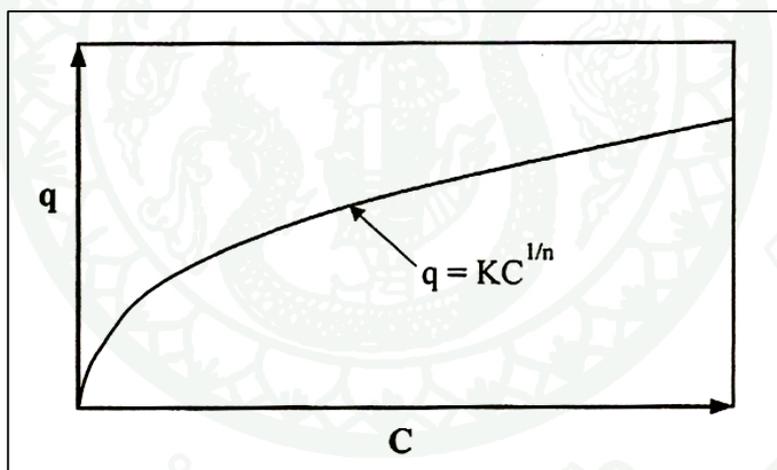
ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า  $\frac{1}{n} < 1$  บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น  $C$  หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มากหรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ 21 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้

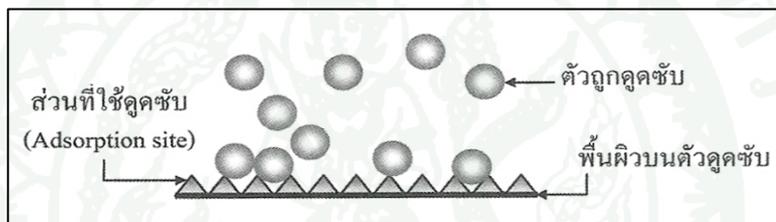


ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

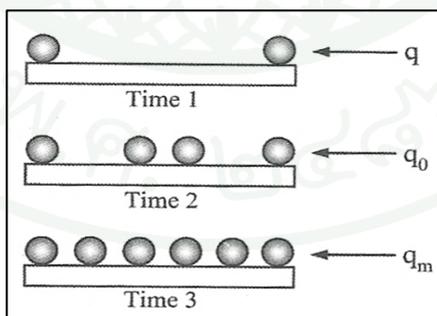
5.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 23 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{Kq_m C} \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

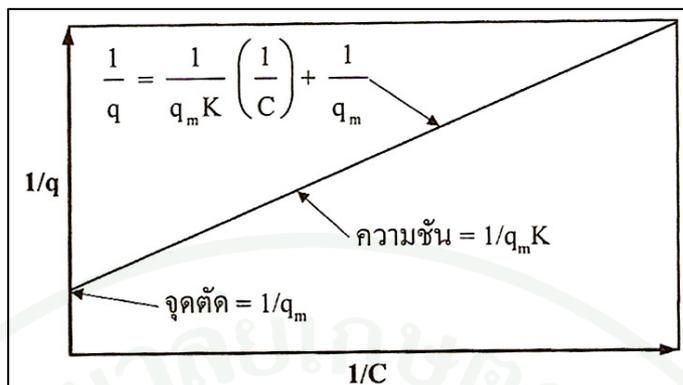
$q_m$  คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{Kq_m}$

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

## 5.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

5.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอกติเวเตดซีลิกา (Zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

5.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

5.8.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

5.8.4 วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย เปลือกกุ้ง (นำมาทำไคโตซาน) กากกาแฟที่ใช้แล้ว ชาและชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (Rice straw) เปลือกไม้ (Bark) ถ่านแกลบดำ ชังข้าวโพด และถ่านจากการเผาตันรูปถ่าน ถ่านกอกกลม ถ่านพุทธรักษา และผักตบชวา เป็นต้น

5.8.5 สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

## 6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิติโรจน์ และคณะ (2543) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน ที่นำเข้ามาจากประเทศอเมริกา และจากกะลามะพร้าวที่ผลิตได้ในประเทศไทย โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาเข้าสู่สมดุล ปริมาณถ่านกัมมันต์ ปริมาณสีย้อมเริ่มต้น ความเป็นกรด-เบส ของสารละลายสีย้อมเริ่มต้น การปรับสภาพด้วยเกลือแอง ขนาดของถ่านกัมมันต์เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินมีอัตราเร็วของการดูดซับสูงกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ความสามารถในการดูดซับยังมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสีย้อม พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ความสามารถในการดูดซับดีที่สารละลายสีมีค่าเป็นกรดอ่อน ขนาดของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดที่อยู่ในช่วง 125-150 ไมโครเมตร เหมาะสมกับการดูดซับสีย้อมแบบจำลองของการดูดซับสูงสุดของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าวได้เท่ากับ 222.22 และ 158.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อใช้เกลือแองในการปรับสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินในสถานะที่ดูดซับที่เหมาะสม ดังนั้นสามารถที่จะใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว ในการดูดซับสีย้อมทดแทนถ่านกัมมันต์จากถ่านหินได้ ถึงแม้อัตราการดูดซับจะช้ากว่าเล็กน้อย

รัตนา (2543) ได้ศึกษาการดูดซับของสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม 4 ชนิด (C.I.Acid Red 360, C.I.Reactive Red 158, C.I. Direct Red 80 และ C.I.Basic Red 24) บนตัวดูดซับ 3 ชนิด (เปลือกกุ้ง, ไคติน และไคโตซาน) พบว่า ตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีแอสิด สีรีแอคทีฟ และสีไดเร็คได้ดีในสารละลายกรดที่มีค่าพีเอช 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานจะดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและเปลือกกุ้ง ตรงข้ามกับสีเบสิกจะถูกดูดซับได้ดีในสารละลายด่างที่มีค่าพีเอช 10 หรือสูงกว่า โดยเปลือกกุ้งจะดูดซับสีเบสิกได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและไคโตซานมาก และในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ พบว่า ไคโตซานสามารถดูดซับสีแอสิด สีรีแอคทีฟและสีไดเร็ค ได้ในปริมาณสูงสุดเกือบถึงร้อยละ 72, 61 และ 94 ตามลำดับ ส่วนเปลือกกุ้งสามารถดูดซับสีเบสิกจากน้ำทิ้งได้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 43 ปริมาณสีย้อมที่กำจัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมในน้ำทิ้ง

เปล่งศักดิ์ (2546) ได้ศึกษาการใช้เรซินฟักตบขบวนการบำบัดน้ำเสียข้อมผ้า พบว่า เรซินฟักตบขบวนการแบบกรดแก่มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 0.68 meq/g และเรซินฟักตบขบวนการแบบกรดแก่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สีเอลิต สีโคเร็กซ์ และสีรีแอคทีฟ มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ร้อยละ 98.78, 96.70 และ 46.35 ตามลำดับประสิทธิภาพในการบำบัดสี ซีโอดี สารแขวนลอย และปริมาณสารละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียข้อมผ้า มีค่าร้อยละ 52.66, 38.46, 54.28 และ 79.67 ตามลำดับ ค่าพีเอชหลังการบำบัดมีค่าลดลงจาก 7.1 เป็น 3.6 หลังการบำบัด ซึ่งคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินฟักตบขบวนการแบบกรดแก่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พบว่า คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกพารามิเตอร์ ยกเว้น ค่าพีเอช ดังนั้นจึงต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วยสารละลายต่างหรือปูนขาวก่อนปล่อยทิ้งต่อไป

สุภาพร (2547) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีและปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งสีข้อมผ้าโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ พบว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีต่างกัน เศษถ่านไม้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ ขี้เถ้า และ ฟางข้าว ในน้ำลิตรที่ 3 และผลของการเปลี่ยนแปลง pH โดยใช้วัสดุทั้ง 3 ชนิด พบว่า ฟางข้าว ขี้เถ้า และ เศษถ่านไม้ เป็นผลให้ค่า pH ของน้ำสีข้อมสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานมีค่าลดลง โดยน้ำสีข้อมสังเคราะห์ที่ผ่านฟางข้าว ขี้เถ้า และ เศษถ่านไม้ มีค่าอยู่ในช่วง 5.90 – 7.43, 5.87 – 7.71 และ 7.80 – 9.17 ตามลำดับ ส่วนในน้ำทิ้งจากโรงงานที่ผ่านฟางข้าว ขี้เถ้า และ ถ่านไม้ มีค่าอยู่ในช่วง 6.97 – 7.97, 6.73 – 7.67 และ 8.42 – 8.96 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสำหรับประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก พบว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิดสามารถดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ตะกั่ว และ โครเมียมได้

กรกช (2547) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของการลดซีโอดี และสี ออกจากน้ำเสียด้วยระบบดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมีย พบว่า น้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมฟอกข้อมที่มีซีโอดีระหว่าง 1600 – 1800 mg/l และมีค่าสีระหว่าง 40 – 60 su ผ่านการทดลองแบบแบตช์ และถึงกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ยาว 30 cm ผลการทดลองเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมียดูดซับซีโอดีและสีแล้ว ได้ผลการทดลองคือ

1. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมีย ใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากท้องถิ่น
2. เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย พบว่า ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นด้วย
3. เมื่อเปลี่ยนแปลงพีเอช พบว่า แนวโน้มประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อมีค่าพีเอชเพิ่มจาก 3 ถึง 5 แต่พบว่าแนวโน้มประสิทธิภาพลดลงหลังจากพีเอชมากกว่า 7
4. จากการทดลองแบบถ่วง พบว่า เมื่อใช้อัตราการระบรทุกน้อยกว่าจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงกว่าเมื่อใช้อัตราการระบรทุกที่มากกว่า

จินตนา (2550) ได้ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกซ์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อปรับสภาพตัวดูดซับซึ่งตัวดูดซับที่ได้มีลักษณะเป็นผลและถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15% 20% 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่า พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไคเรกซ์โดยทำการทดลองแบบแบตช์ พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับเป็นไปตามกลไกสมการการดูดซับของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงตัวดูดซับจากผักตบชวาสามารถกำจัดสีย้อมไคเรกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Kadirvelu *et al.*. (2003) ได้ศึกษาเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมแลโละหนักโดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ การใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกต้นฝ้าย เศษต้นมะพร้าว ของเสียจากอุตสาหกรรมสาธู ชั่งข้าวโพด และแกนต้นกล้วย มาใช้ดูดซับสี rhodamine-B, Congo red, methyl violet, methylene blue, malachite green, mercury (HgCl<sub>2</sub>) and nigel (NiSO<sub>4</sub>) วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากวัสดุดิบต่างๆสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดี แต่เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับสีย้อมจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้

Senthikumaar *et al.* (2006) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากดอกมะพร้าว (Coconut Tree Flower) และเส้นใยปอกระเจา (Jute Fiber) เพื่อใช้ดูดซับสี Reactive Red 120 และนำไปดูดซับสีที่ความเข้มข้น 20, 30 และ 40 mg/l และเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 536 nm พบว่า เปรอร์เซ็นต์ในการดูดซับสี Reactive Red 120 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากเส้นใยปอกระเจาสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากดอกมะพร้าว คือ 200 mg/g และ 181.9 mg/g ตามลำดับ

Santhy *et al.* (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากใยเปลือกมะพร้าว พบว่าในการทดลองแบบแบตช์ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลและปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ผลการทดลองพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับที่ผิวหน้าของแลงเมียร์ ในการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลที่น้อยลงและใช้ปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น และการฟื้นฟูถ่านที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ถ่านจากใยเปลือกมะพร้าวสามารถคลอรีนและซีโอดีในน้ำเสียได้

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 เครื่องยวี่ วิชเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Spectrum SP-1102
- 1.2 pH Meter รุ่น 410 บริษัท Thermo Orion Co.,Ltd.
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด อ่านค่าละเอียด 0.0001 g รุ่น WB-0250003 บริษัท KERM & Sohn GmbH
- 1.4 เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Model VRN-480 บริษัท Gemmy Industrial Corp.
- 1.5 ตู้อบ (Oven) รุ่น OF-11E บริษัท JEIO TECH, KOREA
- 1.6 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- 1.7 เดสซิเคเตอร์ (dessicator)
- 1.8 ชุดกรองประคิษฐ์ และภาชนะทรงกระบอกสำหรับบรรจุตัวดูดซับแบบต่อเนื่อง
- 1.9 ปั้ม (Pump)
- 1.10 เครื่องปั่นละเอียด
- 1.11 เครื่องแก้วต่างๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (ที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด)
- 1.12 ไขพัดที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์

#### 2. สารเคมี

- 2.1 สีย้อม จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาอดยตุง 9 ชนิด คือ 6% Super Black G, 2% Turquoise H-GN, 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 2% Orange LS-BR, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G
- 2.2 สารเคมีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
- 2.3 สารเคมีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

## วิธีการ

### 1. การเตรียมสารละลายย้อมมาตรฐาน เข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร

ซั่งสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี (มีทั้งหมด 9 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 5) 50 มิลลิกรัม ใส่ใน บีกเกอร์แต่ละใบ ละลายด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิตร ในขวดวัดปริมาตร พร้อมกับนำสารละลายย้อมมาตรฐานแต่ละสีไปสแกนหาความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ( $\lambda_{max}$ ) ด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 5 ความยาวคลื่นที่แต่ละสีย้อมจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यอยง 9 ชนิด ที่ดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด

Dyes	$\lambda_{max}$ (nm)
 6% Super Black G	594
 2% Turquoise H-GN	662
 2% Yellow LS-4G	420
 2% Yellow LS-R-01	400
 2% Orange LS-BR	434
 4% Navy LS-G	616
 2% Red LS-B	546
 2% Blue LS-3R	588
 2% Br.Blue LS-G	666

## 2. การเตรียมสารละลายย้อมมาตรฐานผสม

ดวงสารละลายย้อมมาตรฐานแต่ละสีในข้อ 1 มาปริมาณเท่าๆกัน กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและใช้สารละลายย้อมมาตรฐานผสมนี้เป็นน้ำเสยสังเคราะห์ แทนน้ำที่จกโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยคง

## 3. การเตรียมตัวดูดซับผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

3.1 ผงใบผักตบชวา เตรียมโดยนำส่วนของใบผักตบชวามาล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตากแดดให้แห้ง ต้มด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 15 นาที ตากแดดให้แห้ง บั่นด้วยเครื่องปั่นจนละเอียด ร่อนใบผักตบชวาผ่านตะแกรงขนาด 425 ไมครอน อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บผงใบผักตบชวาที่ผ่านจากการอบในภาชนะที่ปิดมิดชิดไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป



ภาพที่ 25 การเตรียมตัวดูดซับผงใบผักตบชวา

3.2 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ โดยนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บถ่านที่ผ่านจากการอบในภาชนะที่ปิดมิดชิดไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

#### 4. ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับของผงใบผักตบชวา และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบ็ดเสร็จ

ปัจจัยที่ทำการศึกษา เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ มีดังนี้

##### 4.1 ศึกษาการดูดซับสีย้อมเบื้องต้น 9 ชนิดด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ชั่งผงใบผักตบชวาที่เตรียมขึ้นจากข้อ 3.1 ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานแต่ละสี ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละขวดทั้งหมด 9 ใบ เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโดยวัดความยาวคลื่นที่  $\lambda_{max}$  ของแต่ละสีด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา

##### 4.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

นำสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4, 5, 7 และ 8 ตามลำดับ และชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1 กรัม (เป็นปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 4.1) ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 4 ใบ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าดังแสดงในภาพที่ 26 เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมโดยวัดความยาวคลื่นที่  $\lambda_{max}$  ของแต่ละสีด้วยเครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา

#### 4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบในการเขย่า

ชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อัตราการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 5 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วยรอบ 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา

#### 4.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

ชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อัตราการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วยรอบที่ให้อัตราการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 ระยะเวลาเขย่าต่างๆ คือ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา



ภาพที่ 26 การเขย่าด้วยเครื่องเขย่า

#### 4.5 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

ชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 6 ชนิด ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่มีการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 และระยะเวลาเขย่าที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่างๆ คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 9 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา

#### 4.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม

ชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 6 ชนิด ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ โดยสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมแต่ละความเข้มข้นถูกปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 และระยะเวลาเขย่าที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ให้ร้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม และสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 9 ชนิด มาทำการทดลองเช่นเดียวกับผงใบผักตบชวา

4.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณและไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ชั่งผงใบผักตบชวา ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 กรัม ต่อสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ที่ความเข้มข้นที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 6 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 และระยะเวลาเขย่าที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ผงผักตบชวา และสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด

4.8 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสี่ข้อมในสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ซ้ำ 7 ครั้ง

ชั่งผงใบผักตบชวาให้มีปริมาณที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.7 ต่อสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ที่ความเข้มข้นที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.6 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 7 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3 และระยะเวลาเขย่าที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ให้อ้อยละการดูดซับดีที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 4.2

นำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ผงผักตบชวา และสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด

## 5. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้ชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่บรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ทำการทดลองโดยใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 ให้ไหลผ่านชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ ซึ่งบรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 373 กรัม ทำการทดลองที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่ผ่านการดูดซับ 50 มิลลิลิตร ทุก 15 นาที และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม



ภาพที่ 27 การศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่อง

## 6. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการใช้งาน

ทำการทดลองโดยนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการใช้งาน จากชุดเครื่องกรองประดิษฐ์มาล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นแช่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง ตากให้แห้งแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ มาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ในชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเปรียบเทียบกับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

## 7. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง

บรรจุผงใบผักตบชวาลงในถุงตาข่ายพลาสติกที่ประดิษฐ์ขึ้น (filter cloth no: 48×w.160 cm) 4 ถุงๆละ 50 กรัม แล้วนำไปแช่ในถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร บรรจุสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมปริมาตร 10 ลิตร ปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 บั่นกวนด้วยใบพัดที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์เป็นเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่างๆ กัน คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาทีและนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสี



ภาพที่ 28 การทดลองในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

## 8. การเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

นำตัวอย่างน้ำทั้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง มาวิเคราะห์ดัชนีชี้บอคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solid) ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ความเค็ม (Salinity) ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ย่อยสลายสารเคมีโดยวิธีทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD) และวิเคราะห์หาความเข้มข้นสีย้อมในน้ำทั้ง

## 9. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง (พื้นที่ทรงงาน) อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ของผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

### 9.1 ศึกษาวิธีแบบแบดซ์

นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง มาทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบดซ์ของผงใบผักตบชวา และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ดังการทดลองข้อที่ 4.8 ซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

### 9.2 ศึกษาด้วยวิธีแบบต่อเนื่อง

นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง มาทดลองโดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลองแบบต่อเนื่องของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ดังการทดลองข้อที่ 5 แล้วหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

### 9.3 ศึกษาโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง

นำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุงปริมาตร 10 ลิตร มาทดลองโดยใช้สภาวะที่ได้จากการทดลอง ในข้อ 7 หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

## 10. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและดิน วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 11. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาทำการวิจัย เริ่มตั้งแต่เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2553 ถึง เดือนกันยายน พ.ศ. 2554

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการบำบัดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตง ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เป็นตัวดูดซับเบื้องต้น ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ความเร็วรอบในการเขย่า ระยะเวลาเขย่า ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปริมาณตัวดูดซับ และการวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยทำการทดลองแบบแบดจ์ พร้อมทั้งศึกษาการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับน้ำเสียจากโครงการพัฒนาคอตง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้ผงใบผักตบชวาใส่ถุงตาข่ายพลาสติกในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียปริมาตร 10 ลิตร และส่วนที่ 2 ใช้ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์บำบัดสีย้อมโดยใช้ชุดกรองประดิษฐ์ โดยการทดลองทั้ง 2 ส่วนนี้ใช้น้ำเสียดังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโครงการพัฒนาคอตง ซึ่งการทดลองทั้งหมดให้ผลการทดลองดังนี้

### 1. ลักษณะของตัวดูดซับที่ได้

#### 1.1 ผงใบผักตบชวา

จากการเตรียมตัวดูดซับจากใบผักตบชวาในการทดลองข้อที่ 3.1 ได้ผงใบผักตบชวาที่มีลักษณะเป็นผงสีเขียวอมน้ำตาล ละเอียด ปนหยาบ เล็กน้อย ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ผงใบผักตบชวา

## 1.2 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นเกล็ด เกรด PHO 8×30 (ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for testing ang material, ASTM) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทางกายภาพ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

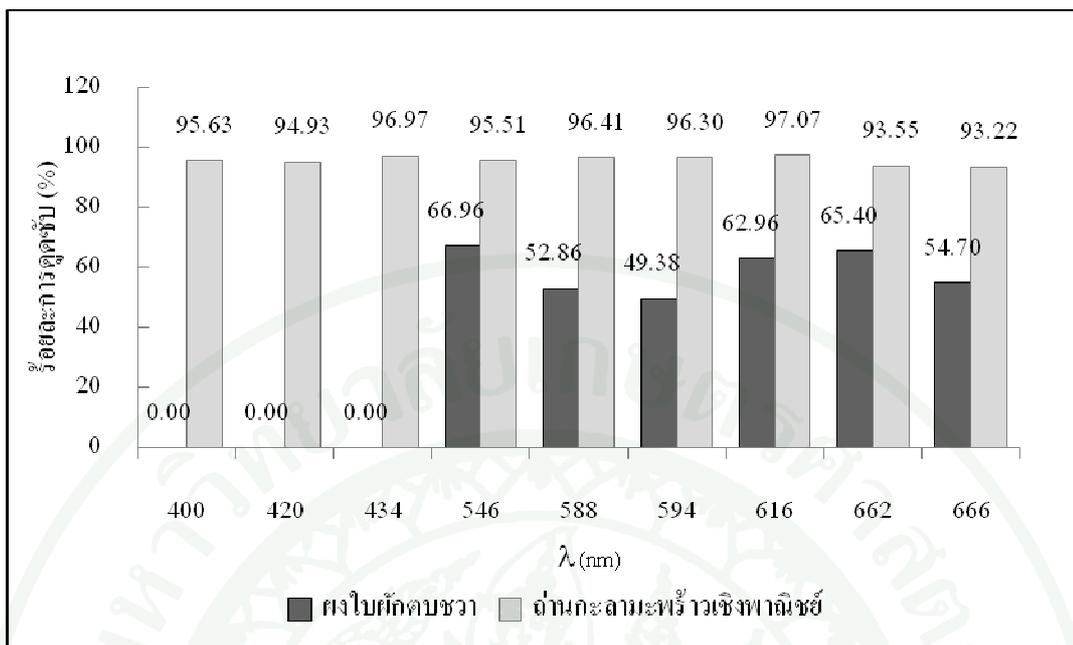
## 2. ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับของผงใบผักตบชวา และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

### 2.1 ศึกษาการดูดซับสีย้อมเบื้องต้น 9 ชนิดด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

จากการทดลองในข้อที่ 4.1 พบว่า ผงใบผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานได้ 6 ชนิด จากสีย้อมทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G โดยได้ร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 66.96, 52.86, 49.38, 62.96, 65.40 และ 54.70 ตามลำดับ และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานได้ทั้ง 9 ชนิด โดยได้ร้อยละการดูดซับสีย้อมเท่ากับ 95.63, 94.93, 96.97, 95.51, 96.41, 96.30, 97.07, 93.55 และ 93.22 ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 และแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมดังกราฟในภาพที่ 31

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม 9 ชนิดด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ชนิดสี	$\lambda$ (nm)	ร้อยละการดูดซับ	
		ผงใบผักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
2% Yellow LS-R-01	400	0.00	95.63
2% Yellow LS-4G	420	0.00	94.93
2% Orange LS-BR	434	0.00	96.97
2% Red LS-B	546	66.96	95.51
2% Blue LS-3R	588	52.86	96.41
6% Super Black G	594	49.38	96.30
4% Navy LS-G	616	62.96	97.07
2% Turquoise H-GN	662	65.40	93.55
2% Br.Blue LS-G	666	54.70	93.22



ภาพที่ 31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม 9 ชนิดด้วยผงใบผักตบชวา และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

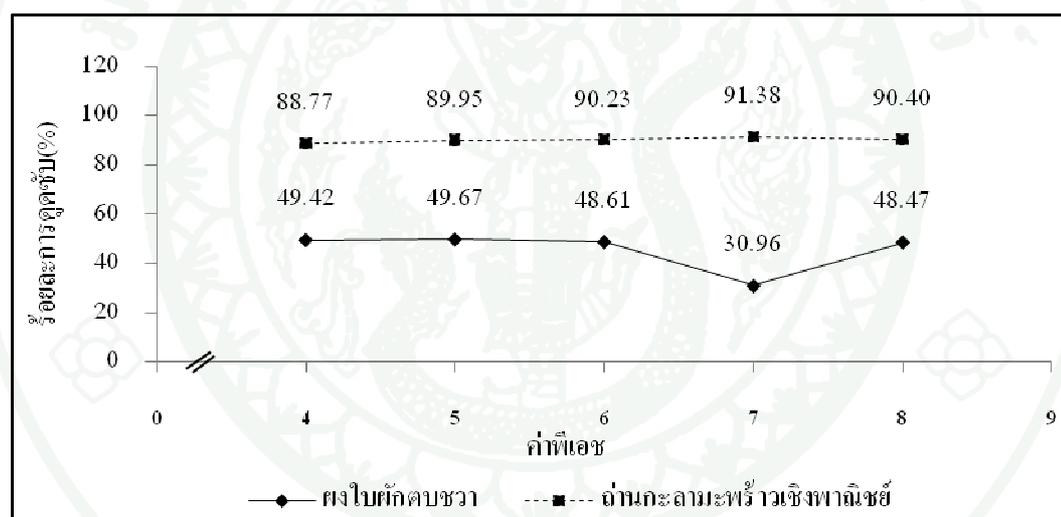
## 2.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.1 ใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ที่ทำการแปรผันพีเอชของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเป็น 4, 5, 7 และ 8 พบว่าผงใบผักตบชวาดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 49.67 ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 32 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 47.78% , 2% Blue LS-3R 49.78%, 6% Super Black G 51.05% , 4% Navy LS-G 52.21%, 2% Turquoise H-GN 48.84% และ 2% Br.Blue LS-G 48.33%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด ได้ดีที่สุดในที่พีเอชเท่ากับ 7 โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 91.38 ดังตารางที่ 7 และภาพที่ 32 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 91.33%, 2% Yellow LS-4G 90.38%, 2% Orange LS-BR 91.50%, 2% Red LS-B 91.43% , 2% Blue LS-3R 93.02%, 6% Super Black G 91.85%, 4%Navy LS-G 92.91%, 2% Turquoise H-GN 90.32% และ 2% Br.Blue LS-G 86.99%

ตารางที่ 7 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผง  
ไบฟักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

พีเอช	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงไบฟักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
4	49.42	88.77
5	49.67	89.95
6	48.61	90.23
7	30.96	91.38
8	48.47	90.40



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยผงไบฟักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช

จากผลการทดลอง พบว่า การดูดซับสีย้อมทั้ง 6 สีด้วยผงไบฟักตบชวามีแนวโน้มคล้ายกัน  
ทั้ง 6 สี และการดูดซับสีย้อมทั้ง 9 สีด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ก็มีแนวโน้มคล้ายกันทั้ง 9 สี  
คือ ผงไบฟักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับได้ดีที่พีเอชเป็นกรดอ่อนๆ  
หรือเบสอ่อนๆ ทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีสภาพที่มีประจุอ่อนๆ จึงสามารถแทรกตัวอยู่ในระหว่าง  
โมเลกุลเส้นใยและยึดจับกันด้วยพันธะ โควาเลนต์และพันธะไฮโดรเจน

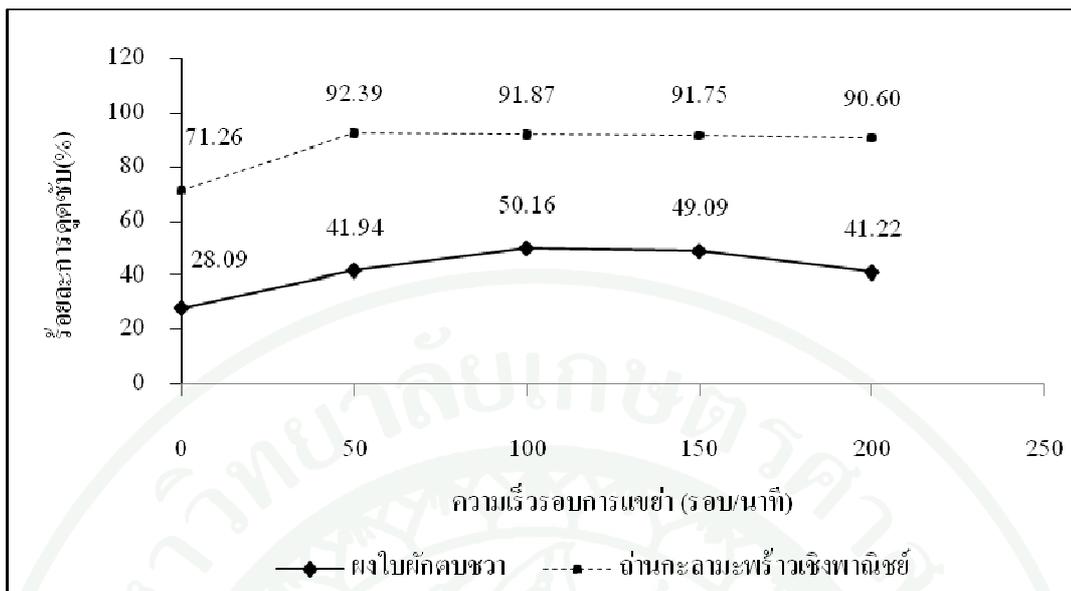
### 2.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วยรอบในการเขย่า

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.1 และ 4.2 ทำการแปรผันความเร็วยรอบในการเขย่าเท่ากับ 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 6 ชนิด ได้ดีที่สุดที่ความเร็วยรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 49.67 ดังตารางที่ 8 และภาพที่ 33 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 50.28% , 2% Blue LS-3R 49.92%, 6% Super Black G 50.00% , 4% Navy LS-G 52.21%, 2% Turquoise H-GN 50.41% และ 2% Br.Blue LS-G 49.12%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 9 ชนิด ได้ดีที่สุดที่ความเร็วยรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 91.38 ดังตารางที่ 8 และภาพที่ 33 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 92.73%, 2% Yellow LS-4G 94.44%, 2% Orange LS-BR 92.67%, 2% Red LS-B 91.89% , 2% Blue LS-3R 93.33%, 6% Super Black G 93.62%, 4% Navy LS-G 95.04%, 2% Turquoise H-GN 88.46% และ 2% Br.Blue LS-G 89.33%

**ตารางที่ 8** อิทธิพลของความเร็วยรอบในการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ความเร็วยรอบในการเขย่า (รอบ/นาที)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงใบผักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
0	20.09	71.26
50	41.94	92.39
100	50.16	91.87
150	49.09	91.75
200	41.22	90.60



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็รรอบการแช่

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับของทั้งผงใบผักตบชวาถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็รรอบในการแช่เพิ่มขึ้นอธิบายได้ว่าความเร็รรอบการแช่ส่งผลถึงอัตราเร็วในการดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของสีชั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ของตัวดูดซับ การแช่เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ เนื่องจากทำให้โมเลกุลสีย้อมเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และช่วยลดความหนาของชั้นฟิล์มของน้ำล้อมรอบตัวดูดซับอยู่ และที่ความเร็รรอบการแช่มากกว่าจุดที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด ร้อยละการดูดซับค่อนข้างคงที่ เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับส่วนใหญ่ถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของสีย้อม (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

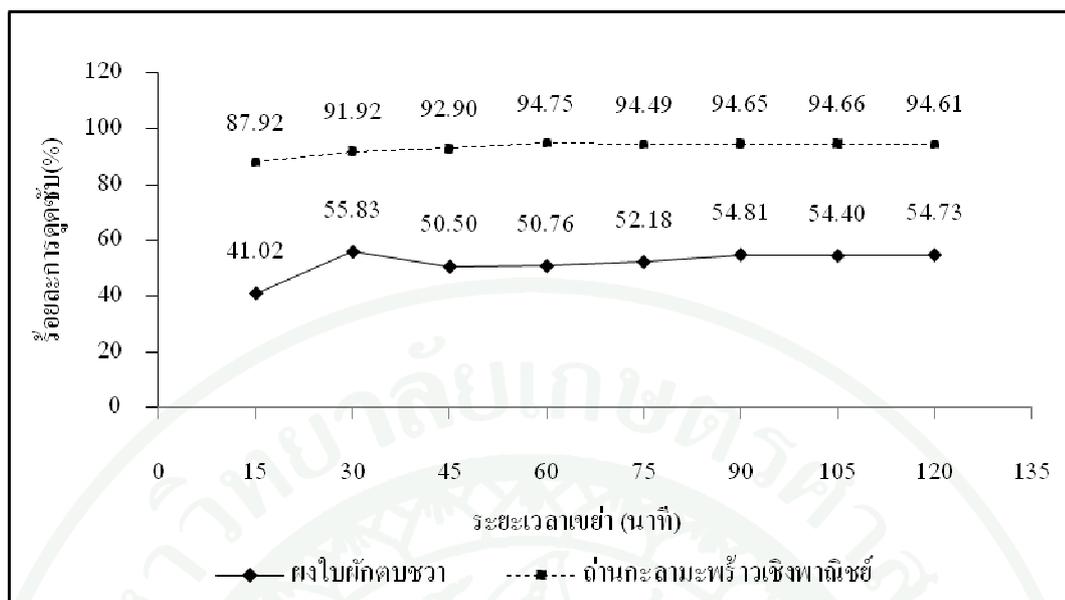
## 2.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ทำการแปรผันระยะเวลาเขย่าเท่ากับ 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 6 ชนิด ได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาเขย่า 30 นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 55.83 ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 34 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ เท่ากับ 2% Red LS-B 50.00% , 2% Blue LS-3R 55.56% , 6% Super Black G 55.84% , 4% Navy LS-G 59.67% , 2% Turquoise H-GN 57.14% และ 2% Br.Blue LS-G 56.76%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 9 ชนิด ได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาเขย่า 60 นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 94.75 ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 34 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 92.73% , 2% Yellow LS-4G 96.30% , 2% Orange LS-BR 94.12% , 2% Red LS-B 92.50% , 2% Blue LS-3R 95.83% , 6% Super Black G 96.00% , 4% Navy LS-G 96.15% , 2% Turquoise H-GN 92.86% และ 2% Br.Blue LS-G 96.30%

**ตารางที่ 9** อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ระยะเวลาเขย่า (นาที)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงใบผักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
15	41.02	87.92
30	55.83	91.92
45	50.50	92.90
60	50.76	94.75
75	52.18	94.49
90	54.81	94.65
105	54.40	94.66
120	54.73	94.61



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการติดสีที่ย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักคตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาแช่

จากผลการทดลอง พบว่า ทั้งผงใบผักคตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์จะให้ประสิทธิภาพการติดสีที่ดีที่สุดที่ระยะเวลาแช่หนึ่งจากนั้นประสิทธิภาพการติดสีจะลดลงอธิบายได้ว่าในระยะเวลาเริ่มต้นนี้พื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่มากทำให้มีอัตราการติดสีมีมากขึ้นจนถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกรอบครอบด้วยตัวถูกดูดซับ (สีย้อม) ซึ่งตัวดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการติดสีลดลง

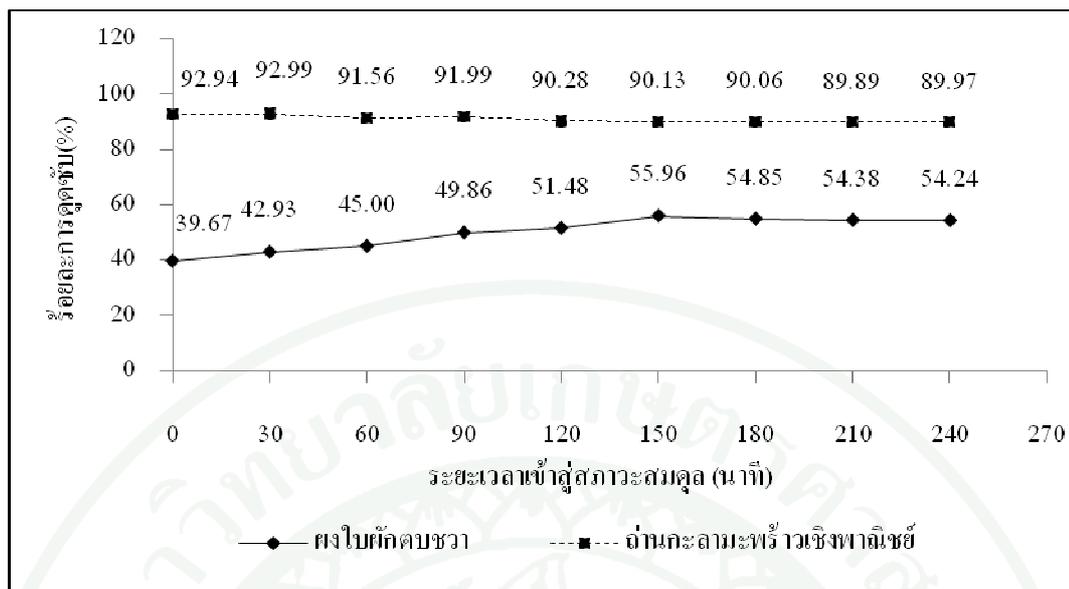
### 2.5 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ทำการแปรผันระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเท่ากับ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที พบว่าผงใบผักคตบชวาดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 150 นาที โดยได้ร้อยละการติดสีเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 55.96 ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 35 และได้ร้อยละการติดสีสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 51.19% , 2% Blue LS-3R 59.01%, 6% Super Black G 60.68% , 4% Navy LS-G 61.25%, 2% Turquoise H-GN 53.17% และ 2% Br.Blue LS-G 50.43%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด ได้ดีที่สุดในระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 92.99 ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 35 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 90.74%, 2% Yellow LS-4G 91.36%, 2% Orange LS-BR 89.80%, 2% Red LS-B 95.24% , 2% Blue LS-3R 93.02%, 6% Super Black G 94.33%, 4% Navy LS-G 94.56%, 2% Turquoise H-GN 96.15% และ 2% Br.Blue LS-G 91.67%

**ตารางที่ 10** อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (นาที)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงใบฝักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
0	39.67	92.94
30	42.93	92.99
60	45.00	91.56
90	49.86	91.99
120	51.48	90.28
150	55.96	90.13
180	54.85	90.06
210	54.38	89.89
240	54.24	89.97



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

จากผลการทดลองอธิบายได้ว่าเมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีระยะเวลาในการยึดเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับมากขึ้น หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะคงที่และลดลง เนื่องจากการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (อัตราดูดเท่ากับอัตราคาย) และตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวและเริ่มหมดสภาพ ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดลง (นิพนธ์ และคณะ, 2550)

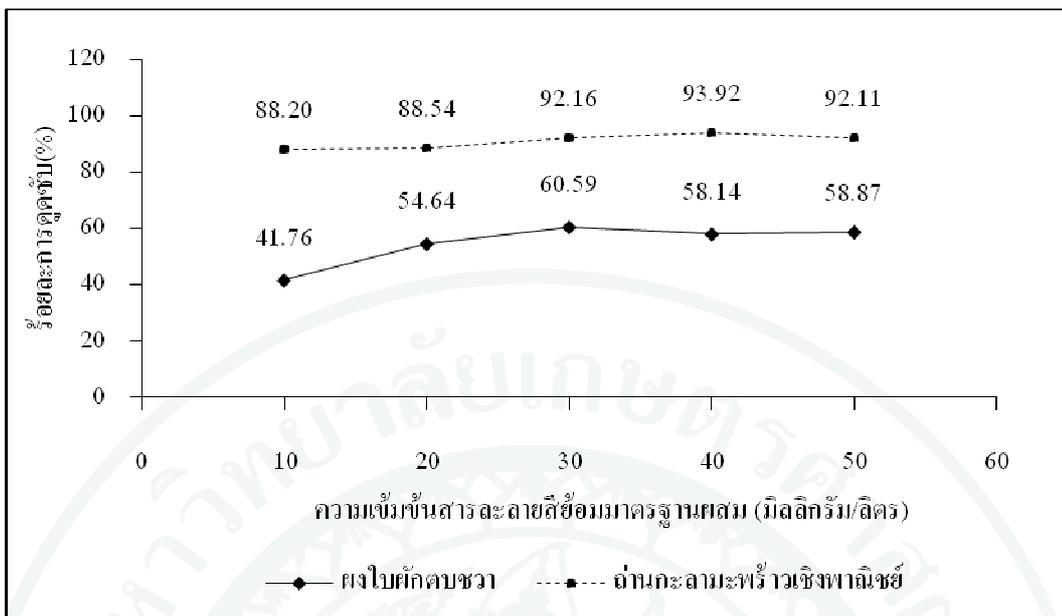
## 2.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.6 ทำการแปรผันความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิดได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 60.59 ดังตารางที่ 11 และภาพที่ 36 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 48.04% , 2% Blue LS-3R 61.70%, 6% Super Black G 64.58% , 4% Navy LS-G 66.67%, 2% Turquoise H-GN 62.07% และ 2% Br.Blue LS-G 60.49%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิดได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 93.92 ดังตารางที่ 11 และภาพที่ 36 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 93.18%, 2% Yellow LS-4G 93.18%, 2% Orange LS-BR 89.68%, 2% Red LS-B 96.67% , 2% Blue LS-3R 94.44%, 6% Super Black G 94.59%, 4% Navy LS-G 95.73%, 2% Turquoise H-GN 94.44% และ 2% Br.Blue LS-G 95.45%

**ตารางที่ 11** อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบฝักคอบขวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ความเข้มข้นสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงใบฝักคอบขวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
10	41.76	88.20
20	54.64	88.54
30	60.59	92.16
40	58.14	93.92
50	58.87	92.11



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับซีอิ้วมเฉลี่ยจากสารละลายซีอิ้วมาตรฐานผสมด้วยผงบักคอบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นสารละลายซีอิ้วมาตรฐานผสม

จากผลการทดลองอธิบายได้ว่าการดูดซับ โมเลกุลของสีจะถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อสีมีความเข้มข้นสูงขึ้น เพราะ โมเลกุลของสีมีมากขึ้น แต่ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับสีขึ้นอยู่กับปริมาณขนาดและระยะเวลาที่ใช้ของตัวดูดซับ เนื่องจากเมื่อถึงจุดสมดุลความสามารถในการดูดซับสีของตัวดูดซับ (ทั้ง 2 ชนิด) จะคงที่และลดลงจนไม่สามารถดูดซับ ได้อีก (อารยา และคณะ, 2549) และจากความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูงจะมีจำนวนโมเลกุลมาก ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

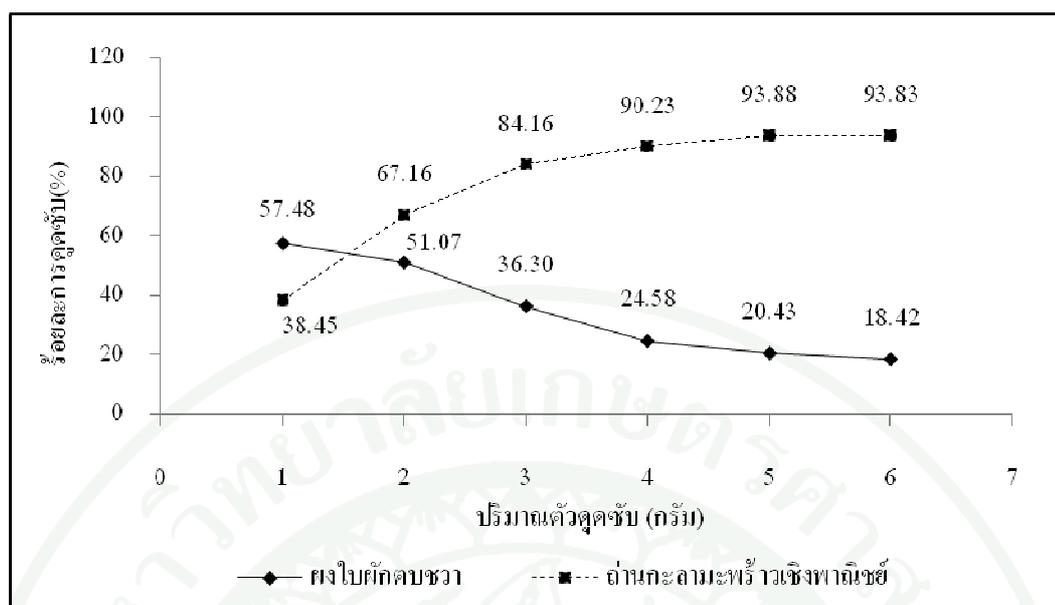
## 2.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่เหมาะสม

จากผลการทดลองในข้อที่ 4.7 ทำการแปรผันปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, และ 6 กรัม พบว่าผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิดได้ดีที่สุดที่ปริมาณ 1 กรัม โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 57.48 ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 37 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 49.49% , 2% Blue LS-3R 60.47%, 6% Super Black G 62.22% , 4% Navy LS-G 64.54%, 2% Turquoise H-GN 56.00% และ 2% Br.Blue LS-G 52.17%

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิดได้ดีที่สุดที่ปริมาณ 5 กรัม โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 93.88 ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 37 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมแต่ละสีเป็นดังนี้ คือ 2% Yellow LS-R-01 93.18%, 2% Yellow LS-4G 93.33%, 2% Orange LS-BR 92.68%, 2% Red LS-B 95.70% , 2% Blue LS-3R 94.74%, 6% Super Black G 94.87%, 4% Navy LS-G 96.75%, 2% Turquoise H-GN 92.00% และ 2% Br.Blue LS-G 91.67%

**ตารางที่ 12** อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	
	ผงใบผักตบชวา	ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์
1	57.48	38.45
2	51.07	67.16
3	36.30	84.16
4	24.58	90.23
5	20.43	93.88
6	18.42	93.83



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซั้บสี่ย้อมเฉลี่ยจากสารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสมด้วยฝงผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซั้บ

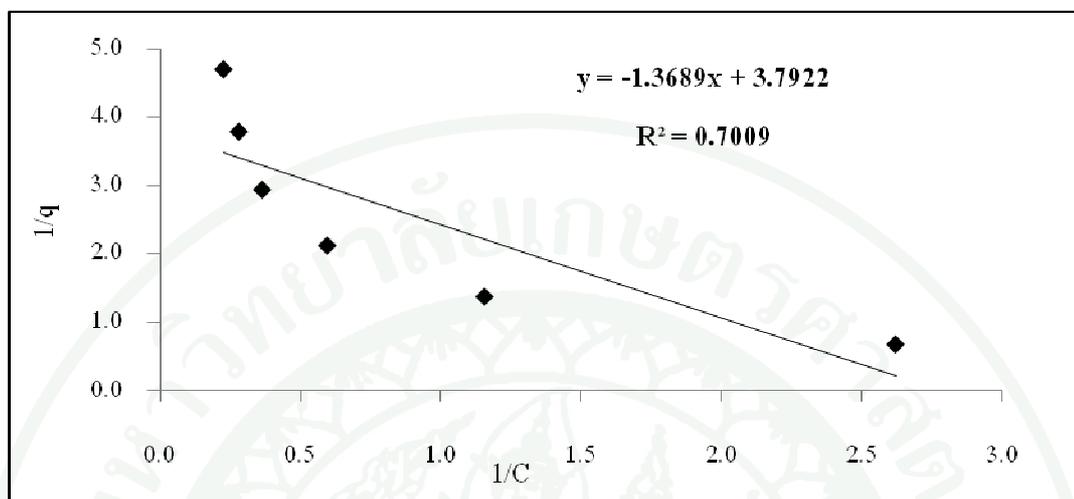
ตามหลักการทั่วไปการดูดซั้บถ่านเพิ่มปริมาณตัวดูดซั้บเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้ประสิทธิภาพการดูดซั้บมากขึ้น แต่จากผลการทดลองของฝงใบผักตบชวาไม่เป็นเช่นนั้นอาจเนื่องจากฝงใบผักตบชวาประกอบด้วยเม็ดสี่เหลี่ยม (คลอโรฟิลล์) ทำให้การเพิ่มปริมาณฝงใบผักตบชวาเป็นการเพิ่มปริมาณสี่เหลี่ยมออกมารบกวนการดูดซั้บได้จึงเป็นสาเหตุให้การเพิ่มปริมาณฝงใบผักตบชวาทำให้ประสิทธิภาพการดูดซั้บลดลง และในการดูดซั้บการใช้ถ่านในปริมาณมาก จะส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซั้บมาก ในขณะที่ความเข้มข้นของสารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสมเท่ากัน ดังนั้นถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถดูดซั้บได้มากกว่าถ่านที่มีพื้นที่ผิวน้อย (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

## 2.8 ผลของไอโซเทอร์มการดูดซั้บสี่ย้อมจากสารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสม

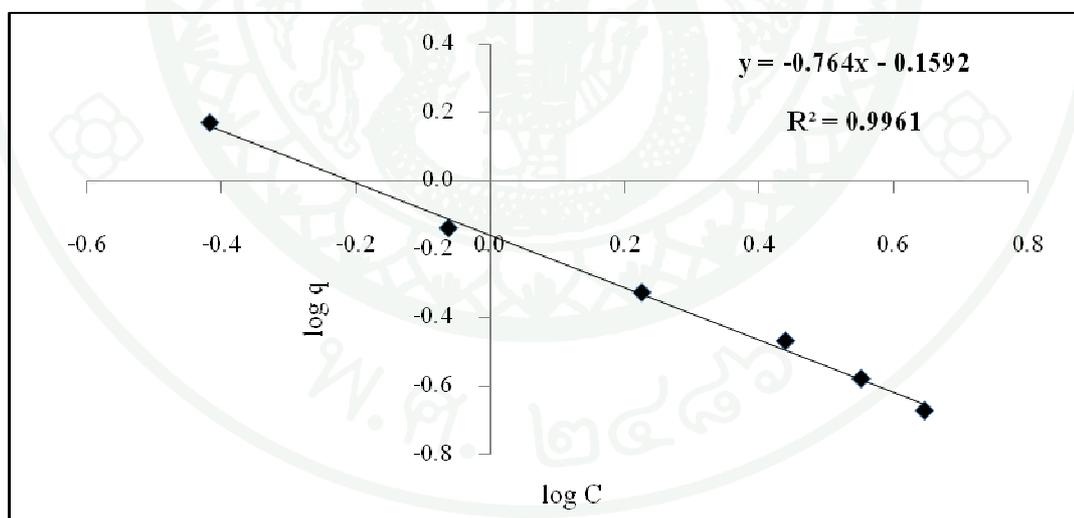
### 2.8.1 ฝงใบผักตบชวา

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซั้บสี่ย้อมจากสารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสมโดยใช้สมการการดูดซั้บของแลงเมียร์และฟรุนดิช ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการดูดซั้บสี่ย้อมจากสารละลายสี่ย้อมมาตรฐานผสมของฝงใบผักตบชวาในการทดลองข้อที่ 4.7 และเมื่อนำมาเขียน

กราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 38 และ 39 ตามลำดับ



ภาพที่ 38 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวา



ภาพที่ 39 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐาน ผสมด้วยผงใบผักตบชวา

ผลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมทั้ง 2 ไอโซเทอร์ม มีค่าเท่ากับ 0.7009 และ 0.9961 ตามลำดับ แสดง

ว่าการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของผงไบฟักตบชวา มีกลไกการดูดซับ สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิช

กลไกการดูดซับของแลงเมียร์นั้นพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกของการดูดซับที่เหมือนกัน โดยตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณและเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่วนกลไกการดูดซับของฟรุนดลิช คือ พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) การดูดซับจะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับ เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถเกิดการซ้อนทับกันได้ เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับได้ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (โสภา, 2548)

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของแลงเมียร์

โดยทั่วไป คือ  $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$  เมื่อจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left( \frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m}$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = -1.3689 \frac{1}{C} + 3.7922$$

เขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -1.3689 และ จุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 3.7922 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = -1.3689$$

$$\frac{1}{q_m} = 3.7922$$

ดังนั้น  $K = -2.7703$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวา พบว่า ค่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงปริมาณโมเลกุลสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของผงใบผักตบชวา

สำหรับสมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมของฟรุณดิชมีรูปแบบของสมการ คือ  $q = KC^{1/n}$  นำสมการมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการิทึม จะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = -0.1592 - 0.764 \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -0.764 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -1.1592 นั่นคือ

$$\log K = -1.1592$$

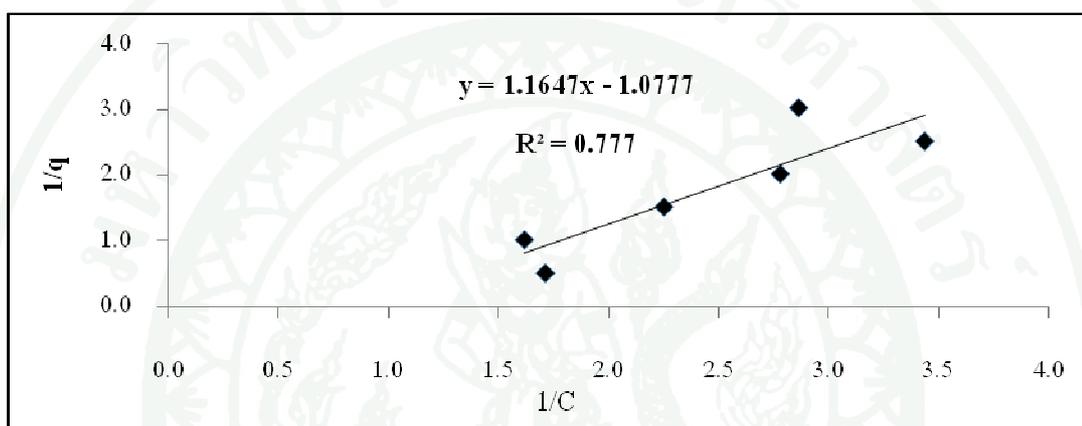
$$1/n = -0.764$$

$$n = 1.3089$$

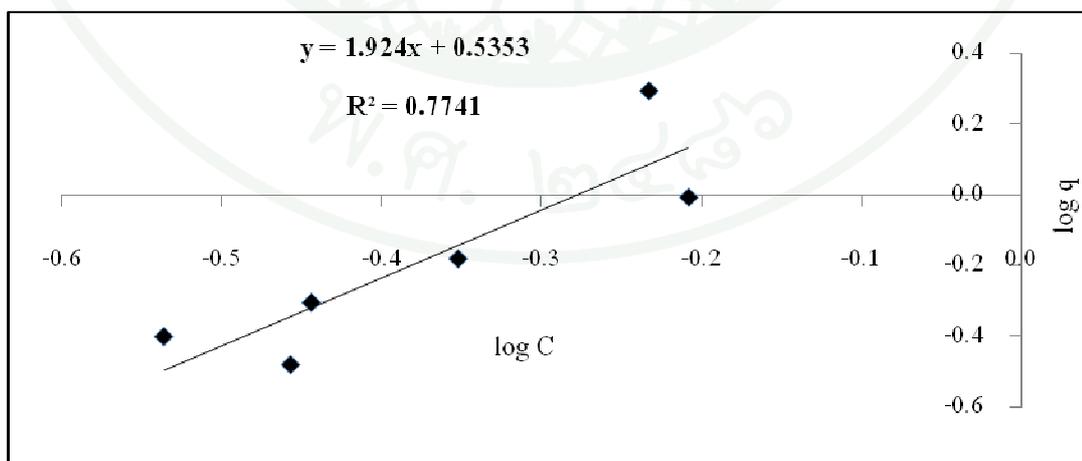
ไอโซเทอร์มจากสมการการดูดซับของฟรุณดิช ในการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวา พบว่า ค่า  $1/n$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของผงใบผักตบชวาถูกดูดซับได้มาก หรือกล่าวได้ว่าบริเวณพื้นที่ผิวของผงใบผักตบชวามีปริมาณมากในการดูดซับ

## 2.8.2 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม โดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการทดลองข้อที่ 4.7 และเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช จะได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 40 และ 41 ตามลำดับ



ภาพที่ 40 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์



ภาพที่ 41 ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช ในการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ผลจากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมทั้ง 2 ไอโซเทอร์ม มีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 0.777 และ 0.7741 ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ มีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิช

สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ของการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ที่ได้จากการทดลองเป็นดังนี้

$$\frac{1}{q} = 1.1647 \frac{1}{C} - 1.0777$$

เขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.1647 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ -1.0777 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 1.1647$$

$$\frac{1}{q_m} = -1.0777$$

ดังนั้น  $K = -0.9253$

จากไอโซเทอร์มสมการการดูดซับของแลงเมียร์ ในการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ พบว่า ค่า  $K$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงปริมาณโมเลกุลสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสม ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

สำหรับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับสี่เหลี่ยมจากสารละลายสี่เหลี่ยมมาตรฐานผสมของฟรุนดลิช มีรูปแบบของสมการ คือ  $q = KC^{1/n}$  นำสมการมาเขียนใหม่ในรูปของล็อกการิทึม จะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = 0.5353 + 1.924 \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.924 และจุดตัดบนแกนตั้ง เท่ากับ 0.5353 นั่นคือ

$$\log K = 0.5353$$

$$1/n = 1.924$$

$$n = 0.5197$$

โซเทอร์มจากสมการดูดซับของฟรุนดลิช ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์ พบว่า ค่า  $1/n$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับได้น้อย หรือกล่าวว่าเป็นบริเวณพื้นที่ผิวของถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์มีปริมาณจำกัดในการดูดซับ

2.9 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ผงใบผักตบชวาและถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์ ทำการทดลอง 7 ซ้ำ

### 2.9.1 ผงใบผักตบชวา

ทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบเบดซ์ โดยใช้ผงใบผักตบชวา 1 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 5 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 100 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 30 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 150 นาที พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสี ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ผงใบผักตบชวา ทำการทดลอง 7 ชั่วโมง

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Red LS-B	49.11
2% Blue LS-3R	59.93
6% Super Black G	60.00
4% Navy LS-G	61.67
2% Turquoise H-GN	51.55
2% Br.Blue LS-G	50.34
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	55.43

### 2.9.2 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบเบดซ์ โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5 กรัม ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 7 ความเร็วรอบการเขย่าเท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 60 นาที เวลาที่ใช้เข้าสู่ภาวะสมดุลเท่ากับ 30 นาที พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 และได้ร้อยละการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมแต่ละสี ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยใช้ถ่านกัมลา มะพร้าวเชิงพาณิชย์ ทำการทดลอง 7 ชั่วโมง

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Yellow LS-R-01	92.52
2% Yellow LS-4G	92.69
2% Orange LS-BR	91.79
2% Red LS-B	95.24
2% Blue LS-3R	92.48
6% Super Black G	94.64
4% Navy LS-G	95.12
2% Turquoise H-GN	91.30
2% Br.Blue LS-G	91.56
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	93.04

### 3. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมของถ่านกัมลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ด้วยการทดลองแบบต่อเนื่องด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์

การทดลองใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 7 ให้ไหลผ่านชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ ซึ่งบรรจุถ่านกัมลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ ปริมาณ 373 กรัม ทำการทดลองที่อัตราการไหล 60, 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม หลังการดูดซับทุกๆ 15 นาที ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการดูดซับ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม จากการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ร้อยละความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม หลังการดูดซับเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง โดยถ่านกัมลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เริ่มหมดประสิทธิภาพ เมื่อปล่อยให้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมไหลผ่าน ที่ปริมาตร 19.8 , 16.8 และ 21.6 ลิตร ด้วยอัตราการไหล 60, 80, และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ และถ่านกัมลามะพร้าวเชิงพาณิชย์หมด

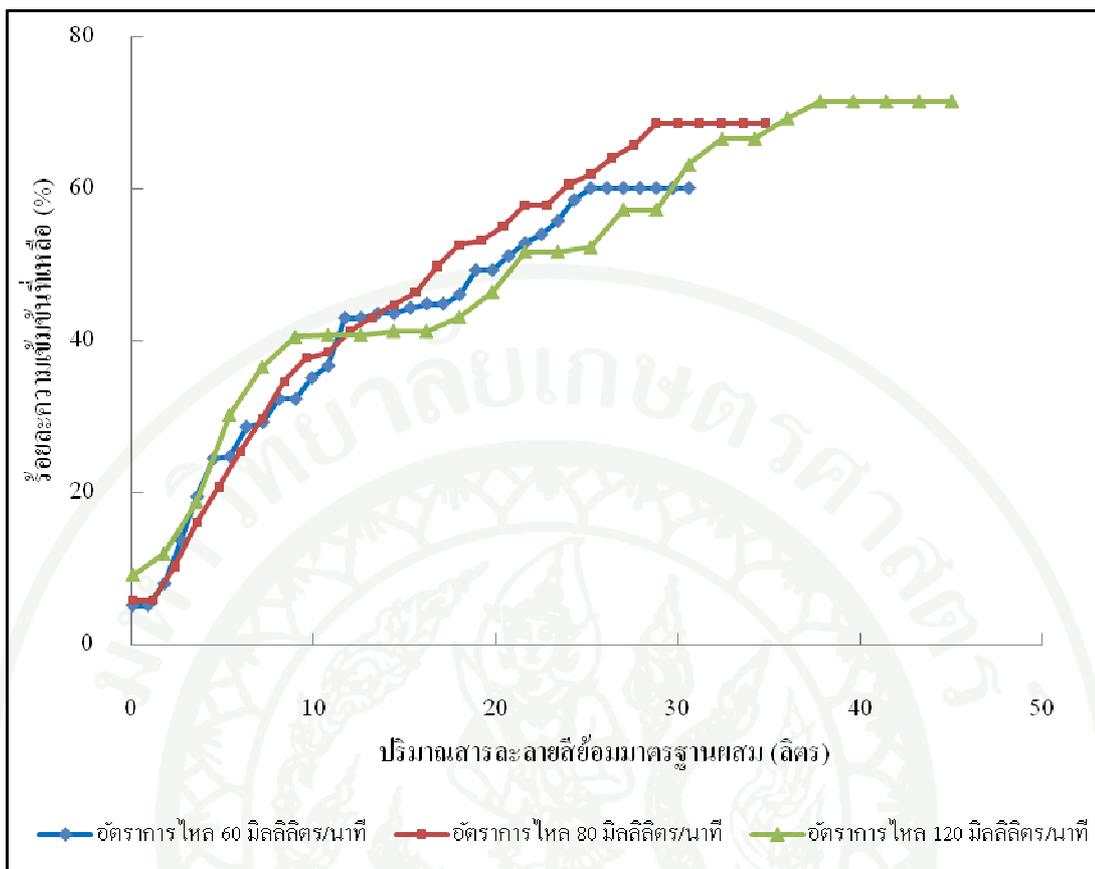
ประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อปริมาตรสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม 25.2, 28.8, และ 37.8 ลิตร ด้วยอัตราการไหล 60, 80, และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ดังตารางที่ 15 และภาพที่ 42

**ตารางที่ 15** ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่ อัตราไหล 60, 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา (นาที)	60 มิลลิลิตร/นาที			80 มิลลิลิตร/นาที			120 มิลลิลิตร/นาที		
	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ
1	0.06	5.12	94.88	0.08	5.79	94.21	0.12	9.19	90.81
15	0.9	5.12	94.88	1.2	5.79	94.22	1.8	11.90	88.10
30	1.8	7.96	92.04	2.4	10.28	89.72	3.6	18.74	81.26
45	2.7	13.66	86.34	3.6	16.07	83.93	5.4	30.24	69.76
60	3.6	19.40	80.60	4.8	20.69	79.31	7.2	36.53	63.47
75	4.5	24.42	75.59	6.0	25.34	74.66	9	40.50	59.50
90	5.4	24.66	75.34	7.2	29.76	70.24	10.8	40.72	59.28
105	6.3	28.58	71.42	8.4	34.59	65.41	12.6	40.72	59.28
120	7.2	29.17	70.83	9.6	37.72	62.28	14.4	41.25	58.75
135	8.1	32.26	67.74	10.8	38.43	61.57	16.2	41.25	58.75
150	9.0	32.26	67.74	12.0	41.27	58.73	18.0	43.10	56.90
165	9.9	35.04	64.96	13.2	43.00	57.00	19.8	46.43	53.57
180	10.8	36.63	63.37	14.4	44.68	55.32	21.6	51.71	48.29
195	11.7	42.92	57.08	15.6	46.32	53.68	23.4	51.71	48.29
210	12.6	42.92	57.08	16.8	49.80	50.20	25.2	52.26	47.74
225	13.5	43.50	56.50	18	52.61	47.39	27	57.26	42.75
240	14.4	43.50	56.50	19.2	53.22	46.78	28.8	57.26	42.75
255	15.3	44.24	55.76	20.4	55.08	44.92	30.6	63.17	36.83

ตารางที่ 15 (ต่อ)

เวลา (นาที)	60 มิลลิลิตร/นาที			80 มิลลิลิตร/นาที			120 มิลลิลิตร/นาที		
	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ	ปริมาตร สาร ละลาย (ลิตร)	ร้อยละ ความ เข้มข้น ที่เหลือ	ร้อยละ การดูด ซับ
270	16.2	44.80	55.20	21.6	57.78	42.22	32.4	66.54	33.46
285	17.1	44.80	55.20	22.8	57.78	41.11	34.2	66.54	33.46
300	18.0	46.00	54.00	24	60.56	39.44	36	69.28	30.72
345	20.7	51.09	48.91	27.6	65.74	34.26	41.4	71.50	28.50
360	21.6	52.76	47.24	28.8	68.60	31.40	43.2	71.50	28.50
375	22.5	53.93	45.06	30.0	68.60	31.40	45	71.50	28.50
390	23.4	55.68	44.32	31.2	68.60	31.40			
405	24.3	58.46	41.54	32.4	68.60	31.40			
420	25.2	60.03	39.97	33.6	68.60	31.40			
435	26.1	60.03	39.97	34.8	68.60	31.40			
450	27.0	60.03	39.97						
465	27.9	60.03	39.97						
480	28.8	60.03	39.97						
495	29.7	60.03	39.97						
510	30.6	60.03	39.97						



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความชื้นที่เพิ่มหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณสารละลายปุ๋ยมาตรฐานผสม ที่อัตราไหล 60, 80 และ 120 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4. ผลการฟื้นฟูสภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการใช้งาน

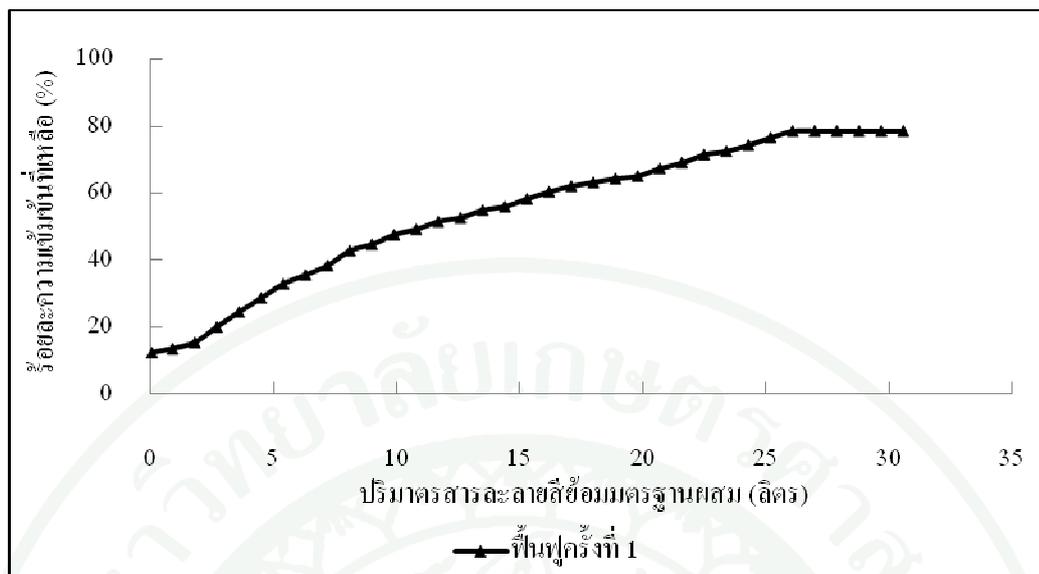
จากการทดลองข้อที่ 6 โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ จากการทดลองที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดมาฟื้นฟูสภาพ พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ หลังการฟื้นฟู พบว่า ร้อยละความชื้นของสารละลายปุ๋ยมาตรฐานผสม หลังการดูดซับเพิ่มขึ้น และมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เริ่มหมดประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อปล่อยให้สารละลายปุ๋ยมาตรฐานผสมไหลผ่านที่ปริมาตร 10.8 ลิตร และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์หมดประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อปริมาตรสารละลายปุ๋ยมาตรฐานผสม 26.1 ลิตร ดังตารางที่ 16 และภาพที่ 43

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์หลังการฟื้นฟูสภาพ ในการดูดซับสี  
 ย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่อง  
 กรองประดิษฐ์ที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลา(นาที)	อัตราการไหล 60 มิลลิลิตร/นาที		
	ปริมาตรสารละลายสีย้อม มาตรฐานผสม (ลิตร)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับ
1	0.06	12.46	87.55
15	0.9	13.60	86.41
30	1.8	15.48	84.52
45	2.7	20.16	79.84
60	3.6	24.60	75.40
75	4.5	28.77	71.23
90	5.4	32.96	67.04
105	6.3	35.64	64.36
120	7.2	38.49	61.52
135	8.1	42.89	57.11
150	9.0	44.77	55.23
165	9.9	47.65	52.36
180	10.8	49.29	50.72
195	11.7	51.59	48.41
210	12.6	52.73	47.27
225	13.5	54.96	45.04
240	14.4	56.10	43.90
255	15.3	58.38	41.62
270	16.2	60.48	39.52
285	17.1	62.18	37.82
300	18.0	63.32	36.68
315	18.9	64.43	35.57

## ตารางที่ 16 (ต่อ)

เวลา(นาที)	อัตราการไหล 60 มิลลิลิตร/นาที		
	ปริมาตรสารละลายที่ย้อม มาตรฐานผสม (ลิตร)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับ
330	19.8	65.17	34.83
345	20.7	67.49	32.51
360	21.6	69.16	30.84
375	22.5	71.59	28.41
390	23.4	72.60	27.40
405	24.3	74.45	25.55
420	25.2	76.71	23.29
435	26.1	78.65	21.35
450	27.0	78.65	21.35
465	27.9	78.65	21.35
480	28.8	78.65	21.35
495	29.7	78.65	21.35
510	30.6	78.65	21.35



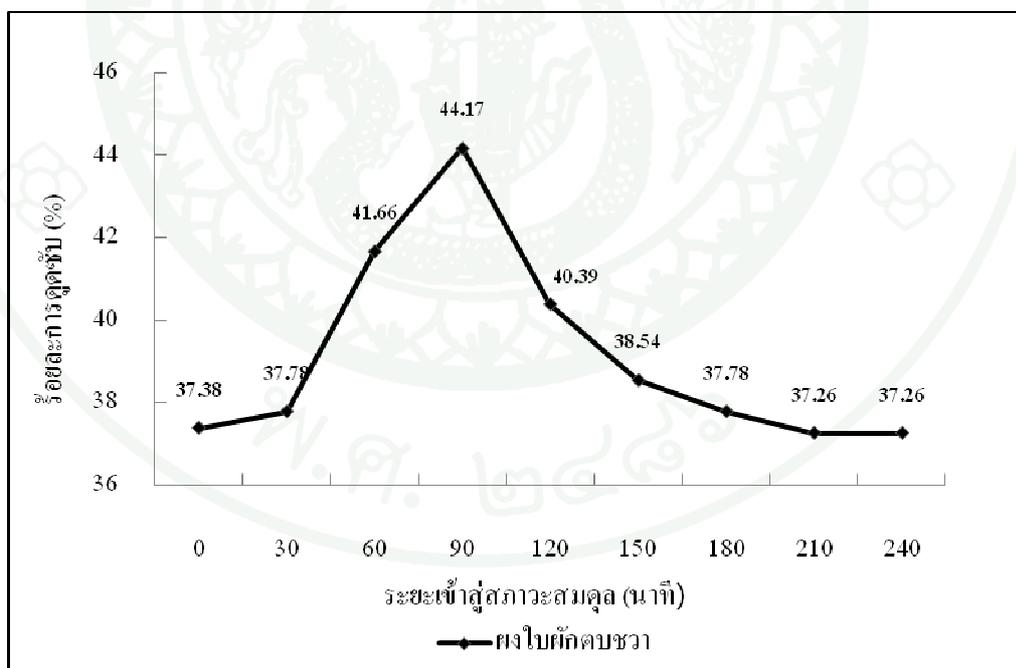
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ฟื้นฟูสภาพกับปริมาณสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม ที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

##### 5. ประสิทธิภาพการดูดซับสีในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง

การทดลองใช้สารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 บรรจุผงใบผักตบชวาลงในถุงตาข่ายพลาสติกที่ประดิษฐ์ขึ้น 4 ถุงๆละ 50 กรัม แล้วนำไปแช่ในถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร บรรจุสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 5 ทำการกวนด้วยใบพัดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่างๆ คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที โดยเก็บตัวอย่างสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที ผลการทดลอง พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิดได้ดีที่สุดที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 44.79 คิดเป็น 0.67 มิลลิกรัม/กรัม ดังตารางที่ 17 และภาพที่ 44 และได้ร้อยละการดูดซับสีข้อมแต่ละสีในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมเป็นดังนี้ คือ 2% Red LS-B 43.75% , 2% Blue LS-3R 42.86%, 6% Super Black G 44.19% , 4% Navy LS-G 46.67%, 2% Turquoise H-GN 45.83% และ 2% Br.Blue LS-G 45.45%

ตารางที่ 17 อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสี่ข้อมจากสารละลายสี่ข้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง

ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (นาที)	ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย
0	37.38
30	37.78
60	41.66
90	44.79
120	40.39
150	38.54
180	37.78
210	37.26
240	37.26



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสี่ข้อมมาตรฐานผสมโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริงกับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

จากผลการทดลอง พบว่า การนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยน้อยกว่าการทดลองแบบเบตซ์ที่ใส่ผงใบผักตบชวาลงไปในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม คือ ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 44.79 และ 55.43 ตามลำดับ เนื่องจากการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง ได้บรรจุผงใบผักตบชวาลงในถุงตาข่ายพลาสติก ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่น้อยในการสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ (สีข้อม) จึงทำให้อัตราการดูดซับน้อยลง

## 6. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง

จากการนำน้ำตัวอย่างจากน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง มาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ โดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ พีเอช ความขุ่น ความเค็ม ซีไอดี บีไอดี สภาพการนำไฟฟ้า ของแข็งทั้งหมด ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ไขมันและน้ำมัน ได้ผลการศึกษาและเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม	คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง
pH	5 - 9	9.74
ค่าความขุ่น (NTU)	50	68.87
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 300	5,356
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 50	568
ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 3,000	3.71
น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 5.0	14.147
ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 400	26.67
ค่า EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}^2$ )	ไม่ได้กำหนด	5.54
บีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ไม่เกิน 20	53.1

## 7. ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

### 7.1 ผงใบผักตบชวา

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบดซ์ คือ ผงใบผักตบชวาปริมาณ 1 กรัม พีเอชเท่ากับ 5 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาสู่สภาวะสมดุล 150 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งและคุณภาพน้ำหลังการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสีย้อมทั้ง 6 ชนิดในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 69.65 และได้ร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุงดังตารางที่ 19

**ตารางที่ 19** ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Red LS-B	66.67
2% Blue LS-3R	67.52
6% Super Black G	68.42
4% Navy LS-G	69.52
2% Turquoise H-GN	73.33
2% Br.Blue LS-G	72.41
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	69.65

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง โดยทำการทดลองแบบแบดซ์เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่า คือ ได้ร้อยละ การดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 69.65 และ 55.43 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากในการทดลองนี้ได้มีการนำใบ ผักตบชวาที่มีอายุตั้งแต่ 6 เดือนขึ้นไป มาทำการทดลองดังข้อที่ 3.1 แล้วนำผงใบผักตบชวาที่ได้มา ทำการทดลองแบบแบดซ์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ซึ่งตัวดูดซับผงใบผักตบชวาที่มีรูพรุนมากกว่าผงใบผักตบชวาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมในสารละลาย สีย้อมมาตรฐานผสม จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุงได้ง่ายขึ้น

## 7.2 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบแบดซ์ คือ ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 5 กรัม พีเอช เท่ากับ 7 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ระยะเวลาสู่สภาวะสมดุล 30 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งและคุณภาพน้ำหลังการดูดซับ ผล การทดลอง พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสีย้อมทั้ง 9 ชนิดในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 43.35 และ ได้ร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละสี ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุงดังตารางที่ 20

**ตารางที่ 20** ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Yellow LS-R-01	59.09
2% Yellow LS-4G	58.33
2% Orange LS-BR	55.22
2% Red LS-B	40.23
2% Blue LS-3R	38.67
6% Super Black G	42.67
4% Navy LS-G	34.85
2% Turquoise H-GN	27.78
2% Br.Blue LS-G	33.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	43.35

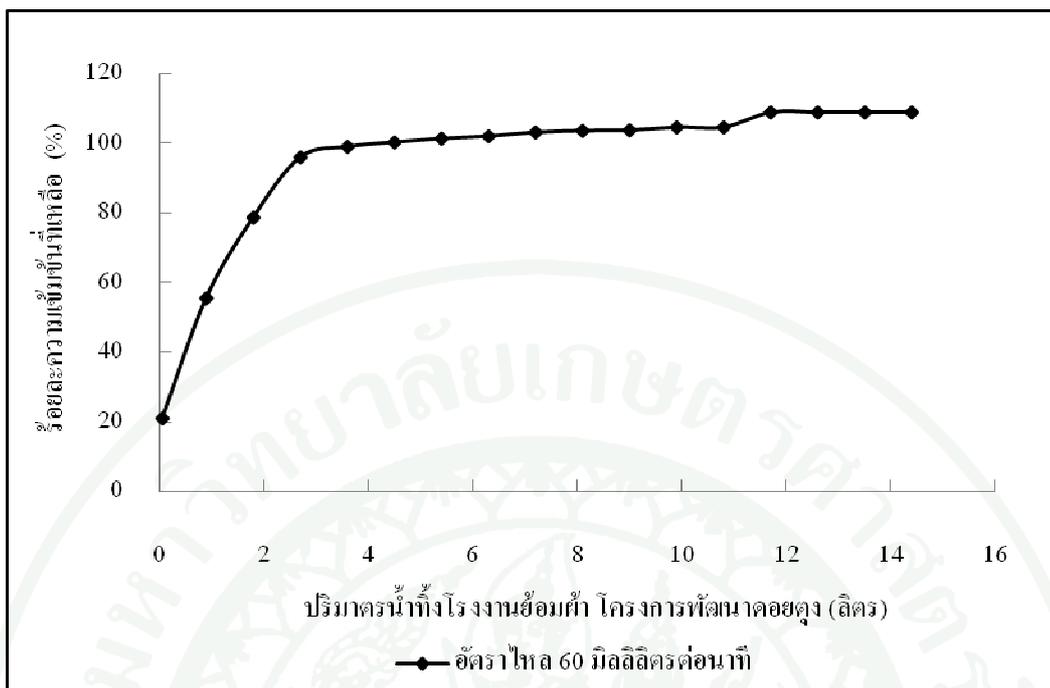
**8. ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์**

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ปรับพีเอชเท่ากับ 7 ใ้ไหลผ่านชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ ซึ่งบรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ ปริมาณ 373 กรัม อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าโครงการพัฒนาออยตุง หลังการดูดซับทุกๆ 15 นาที ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้ง พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สามารถดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ตั้งแต่วันที่แรกที่ปล่อยให้ น้ำไหลผ่าน โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 78.85 ที่ปริมาตร 0.06 มิลลิลิตรต่อนาที และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์หมดประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อปริมาตร 3.6 ลิตร ดังตารางที่ 21 และภาพที่ 45

ดังนั้นการนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดอยตุง โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ จึงไม่คุ้มค่าที่จะนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาใช้ในการบำบัดสีข้อม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมในน้ำทิ้งได้เพียงแค่ 1 ลิตรแรก และต้องใช้ปริมาณถ่านที่มาก ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

**ตารางที่ 21** ประสิทธิภาพของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ในการดูดซับสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดอยตุง โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ด้วยชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตร/นาที

เวลา(นาที)	อัตราการไหล 60 มิลลิลิตร/นาที		
	ปริมาณน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า (ลิตร)	ร้อยละความเข้มข้นที่เหลือ	ร้อยละการดูดซับ
1	0.06	21.15	78.85
15	0.9	55.67	44.33
30	1.8	78.81	21.20
45	2.7	96.11	3.90
60	3.6	99.12	0.88
75	4.5	100.39	-0.39
90	5.4	101.48	-1.48
105	6.3	102.15	-2.15
120	7.2	103.27	-3.27
135	8.1	103.73	-3.73
150	9.0	103.87	-3.87
165	9.9	104.72	-4.72
180	10.8	104.72	-4.72
195	11.7	109.01	-9.01
210	12.6	109.01	-9.01
225	13.5	109.01	-9.01
240	14.4	109.01	-9.01



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นที่เหลือหลังการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุงที่อัตรไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 9. ประสิทธิภาพของผงไบฟักตบขาวในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง โดยการนำผงไบฟักตบขาวไปประยุกต์ใช้จริง

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ปรับพีเอชเท่ากับ 5 บรรจุน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าในถังพลาสติกปริมาตร 10 ลิตร นำผงไบฟักตบขาวในถุงตาข่ายพลาสติกที่ประดิษฐ์ขึ้น 4 ถุงๆละ 50 กรัม ไปแช่ในถังพลาสติกขนาด 10 ลิตร ปั่นกวนด้วยใบพัดที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล 90 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งและคุณภาพน้ำหลังการดูดซับ พบว่า ผงไบฟักตบขาวดูดซับสีย้อมทั้ง 6 ชนิดได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 46.31 และได้ร้อยละการดูดซับสีย้อมแต่ละสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า  
โครงการพัฒนาคอตตง โดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริงที่ระยะเวลาเข้าสู่  
สภาวะสมดุล 90 นาที

ชนิดสี	ร้อยละการดูดซับ
2% Red LS-B	43.94
2% Blue LS-3R	42.50
6% Super Black G	44.44
4% Navy LS-G	45.37
2% Turquoise H-GN	51.61
2% Br.Blue LS-G	50.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	46.31

จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของผงใบผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้ง  
จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตตง โดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง เมื่อ  
เปรียบเทียบกับ การดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่  
ใกล้เคียงกัน คือ ได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 46.31 และ 44.79 ตามลำดับ จึงสามารถนำผงใบ  
ผักตบชวามาเป็นตัวดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตตง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การศึกษาการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยดอง ด้วยผงไบฟักตบชาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ซึ่งได้ทำการทดลองแบบแบดซ์ การทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่บรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์และแบบประยุกต์ใช้จริงด้วยผงไบฟักตบชา สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ ของผงไบฟักตบชาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด ของผงไบฟักตบชา คือ พีเอช 5 ความเร็วรอบในการเขย่า 100 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที และเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล 150 นาที สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณผงไบฟักตบชา 1 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 55.43 และดูดซับสีย้อมแต่ละสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด คือ 2% Red LS-B , 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 49.11 , 59.93, 60.00 , 61.67, 51.55 และ 50.33 ตามลำดับ และกระบวนการดูดซับของผงไบฟักตบชาสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิช สำหรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ในการดูดซับสีย้อมจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ คือ พีเอช 7 ความเร็วรอบในการเขย่า 50 รอบต่อนาที ระยะเวลาเขย่า 60 นาที และเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล 30 นาที สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตรและปริมาณถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 93.04 และดูดซับสีย้อมแต่ละสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 9 ชนิด คือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 92.52, 92.69, 91.79, 95.24 , 92.48, 94.64, 95.12, 91.30 และ 91.56 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับสมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์

2. ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่บรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 373 กรัม และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 20 มิลลิกรัม/ลิตร ที่พีเอช 7 พบว่า ที่อัตราไหล 60 มิลลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมสูงสุด โดยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เริ่มหมดประสิทธิภาพ เมื่อปล่อยให้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมไหลผ่าน ที่ปริมาตร 18.9 ลิตร และหมดประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อปริมาตรสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมไหลผ่านเท่ากับ 25.2 ลิตร จากนั้นนำถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ผ่านการใช้งานมาฟื้นฟูสภาพ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับหลังผ่านการใช้งาน พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 เริ่มหมดประสิทธิภาพ เมื่อปล่อยให้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมไหลผ่าน ที่ปริมาตร 10.8 ลิตร ดังนั้น ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วจะส่งผลให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลงและทำให้พื้นที่ผิวบางส่วนเกิดการสูญเสียไปในขณะที่ทำการดูดซับก่อนที่จะมีการนำตัวดูดซับมาฟื้นฟู รวมถึงในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับอาจทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ผิวในการดูดซับไปด้วย ซึ่งการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสามารถทำได้แต่ไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการจากการใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ หากตัวดูดซับมีปริมาณมากและมีวิธีการจัดเตรียมที่ง่ายจึงไม่สมควรในการนำตัวดูดซับนั้นๆ มาฟื้นฟูสภาพ

3. ประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ทำการทดลองโดยนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริง คือ สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 10 ลิตร ที่พีเอช 5 ตัวดูดซับจำนวน 200 กรัม ทำการกวนด้วยใบพัดเป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที ผงใบผักตบชวาดูดซับสีย้อมได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 44.79 และดูดซับสีย้อมแต่ละสีในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 6 ชนิด คือ 2% Red LS-B , 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 43.75 , 42.86, 44.19 , 46.67, 45.83 และ 45.45 ตามลำดับ

4. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุง โดยการปรับสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบดซ์ พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุงเฉลี่ยเท่ากับ 69.65 และดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุงทั้ง 6 ชนิด คือ 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 66.67 , 67.52, 68.42 , 69.52, 73.33 และ 72.41 ตามลำดับ และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยดุงได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 43.35 และ

ดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุงทั้ง 9 ชนิด คือ 2% Yellow LS-R-01, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange LS-BR, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 59.09, 58.33, 55.22, 40.23 , 38.67, 42.67, 34.85, 27.78 และ 33.33 ตามลำดับ

5. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ชุดเครื่องกรองประดิษฐ์ที่บรรจุถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 373 กรัม พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าสูงสุดที่ปริมาตร 0.06 มิลลิลิตร โดยได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 78.85 ซึ่งสามารถบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าได้เพียง 1.8 ลิตร

6. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง โดยการปรับสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในการนำไปประยุกต์ใช้จริง พบว่า ผงใบผักตบชวาดูดซับสีย้อมได้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 46.31 และดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุงทั้ง 6 ชนิด คือ 2% Red LS-B , 2% Blue LS-3R, 6% Super Black G, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Br.Blue LS-G ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 43.94 , 42.50, 44.44 , 45.37, 51.61 และ 50.00 ตามลำดับ

### ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในครั้งนี้ ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่างเพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ ดังนี้

1. ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพตัวดูดซับผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในการดูดซับสีย้อมผ้าสังเคราะห์ชนิดอื่นหรือสีย้อมชนิดอื่นๆ รวมทั้งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสารแต่ละชนิด
2. การศึกษาตัวดูดซับชนิดอื่นๆที่เป็นวัสดุดูดซับชีวภาพชนิดอื่นๆที่เป็นวัสดุที่หาง่ายในท้องถิ่นและประหยัดมาใช้ในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับและนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดสีย้อมผ้าสังเคราะห์
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มาดูดซับมลสารในน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ เช่น น้ำทิ้งจากอาคารและชุมชน น้ำเสียจากนิคมอุตสาหกรรม และโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2554. คำมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. มาตรฐานคุณภาพน้ำประเทศไทย. แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html). 1 ตุลาคม 2554.
- กิติโรจน์ หวันตาหลา, ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา ขุ้ยจุลเจิม. 2543. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (2): 104-112.
- กรกช ชิวส์คำ. 2547. ประสิทธิภาพของการลดซีไอดี และสี ออกจากน้ำเสียด้วยระบบดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเปลือกมะคาเดเมีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- จิระศักดิ์ แสงพุ่ม, เดชา ฉัตรศิริเวช และวิจิตรา วงวิศาล. 2543. ผลของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาสำหรับการดูดซับไอเบนซิน. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต 4 (1): 48-54.
- จินตนา จุลอุล. 2550. การเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกที่จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เปล่งศักดิ์ ภูขจร. 2546. การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- รัตนา รุจิรวนิช. 2543. การดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน. กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์. 2547. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีและปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้ง  
ย้อมผ้าโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏ  
อุตรดิตถ์.

โสภา กลิ่นจันทร์. 2548. กระบวนการแยกสำหรับเทคโนโลยีชีวภาพ. ศูนย์ผลิตตำราเรียนสถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสีย้อม: ไค  
เรกท์. มอก. 739-2530.

อัจฉราภร ไสละสูต. 2527. คู่มือการย้อมสี. เทคนิค 19 การพิมพ์, กรุงเทพฯ.

อารยา ประดับวงษ์, วรางคณา ตั้งสิทธิสวัสดิ์ และ อุไรวรรณ อินทร์ม่วง. 2549. ประสิทธิภาพ  
การดูดซับสีจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยเปลือกหอยเชอรี่และเปลือกหอยแครง. วารสารวิจัยมข.  
6 (1): 88-99.

Buckley, CA. 1992. Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents.  
**Wat,Sci.Tech.** 25 : 203-209.

Senthikumaar, S., P. Kalaamani, K. Porkodi, P. Varadarajan, R., and Subburaam, V. C.  
2006. Adsorption of dissolved reactive red dye from aqueous phase onto activated  
carbon prepared from agricultural waste. **Bioresource Technology**, (97) : 1618-1612.

Kadirvelu, K., M. Kavipriya, C. Karthika, N. Vennilamaani and S. pattabhi. 2003.  
Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application  
for the removal of dye and metal ions from aqueous solutions. **Bioresource Technology**,  
(87) : 129-132.

Santhy, K. and P. Selvathy. 2006. Removal of Reactive dyes from wastewater by adsorption  
on coir pith activated carbon. **Bioresource Technology**, (97) : 1623-1629.

Uddin, M.T., M.S. Islam and M.Z. Abedin. 2007. **Adsorption of phenol from aqueous solution by water hyacinth ash.** Department of Chemical Engineering and Polymer Science, Bangladesh.





ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบื้องต้นแต่ละสีด้วยผงใบผักตบชวา

ชนิดสี	$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูด ซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
2% Yellow LS-R-01	400	1.45	1.45	1.45	1.45	0.00	0.00
2% Yellow LS-4G	420	1.50	1.50	1.50	1.50	0.00	0.00
2% Orange LS-BR	434	1.52	1.52	1.52	1.52	0.00	0.00
2% Red LS-B	546	0.37	0.38	0.39	0.38	0.01	66.96
2% Blue LS-3R	588	0.33	0.34	0.32	0.33	0.01	52.86
6% Super Black G	594	0.68	0.69	0.68	0.68	0.01	49.38
4% Navy LS-G	616	0.59	0.60	0.61	0.60	0.01	62.96
2% Turquoise H-GN	662	0.28	0.27	0.27	0.27	0.01	65.40
2% Br.Blue LS-G	666	0.35	0.35	0.36	0.35	0.01	54.70

ตารางผนวกที่ 2 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเบื้องต้นแต่ละสีด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ชนิดสี	$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละ การดูด ซับ
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
2% Yellow LS-R-01	400	0.06	0.06	0.07	0.06	0.01	95.63
2% Yellow LS-4G	420	0.05	0.06	0.05	0.05	0.01	94.93
2% Orange LS-BR	434	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	96.97
2% Red LS-B	546	0.04	0.04	0.05	0.04	0.01	95.51
2% Blue LS-3R	588	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	96.41
6% Super Black G	594	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	96.30
4% Navy LS-G	616	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	97.07
2% Turquoise H-GN	662	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	93.55
2% Br.Blue LS-G	666	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	93.22

**ตารางผนวกที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับพีเอช 4

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 4				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.32	0.31	0.30	0.32	0.01	47.22
588	0.77	0.39	0.38	0.38	0.39	0.01	49.78
594	0.79	0.39	0.39	0.37	0.39	0.01	50.63
616	0.83	0.40	0.40	0.38	0.40	0.01	51.81
662	0.43	0.22	0.22	0.21	0.22	0.01	48.84
666	0.38	0.20	0.19	0.19	0.20	0.01	48.25
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							49.42

**ตารางผนวกที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับพีเอช 5

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 5				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.32	0.32	0.30	0.31	0.01	47.78
588	0.77	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	49.78
594	0.79	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	51.05
616	0.83	0.40	0.40	0.39	0.40	0.01	52.21
662	0.43	0.23	0.22	0.21	0.22	0.01	48.84
666	0.40	0.20	0.21	0.21	0.21	0.01	48.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							49.67

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับพีเอช 6

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 6				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.32	0.32	0.30	0.31	0.01	45.56
588	0.77	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	47.62
594	0.79	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	49.79
616	0.83	0.40	0.40	0.39	0.40	0.01	50.60
662	0.44	0.23	0.22	0.21	0.22	0.01	48.48
666	0.41	0.20	0.21	0.21	0.21	0.01	49.59
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							48.61

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับพีเอช 7

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 7				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.44	0.43	0.43	0.43	0.01	26.55
588	0.77	0.56	0.55	0.55	0.55	0.01	28.14
594	0.78	0.54	0.54	0.55	0.54	0.01	30.34
616	0.83	0.55	0.55	0.56	0.55	0.01	33.33
662	0.41	0.27	0.26	0.27	0.27	0.01	34.96
666	0.38	0.26	0.26	0.25	0.26	0.01	32.46
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							30.96

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับพีเอช 8

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 8				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.32	0.32	0.31	0.32	0.01	46.33
588	0.77	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	49.78
594	0.78	0.40	0.40	0.39	0.40	0.01	49.15
616	0.83	0.42	0.41	0.41	0.41	0.01	50.20
662	0.41	0.22	0.21	0.21	0.21	0.01	47.97
666	0.38	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	47.37
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							48.47

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 4

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 4				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.53	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	89.31
420	0.54	0.06	0.07	0.07	0.07	0.01	87.65
434	0.49	0.04	0.06	0.05	0.05	0.01	89.80
546	0.33	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	88.89
588	0.42	0.03	0.05	0.04	0.04	0.01	90.48
594	0.43	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	89.15
616	0.45	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	90.37
662	0.28	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	86.90
666	0.27	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	86.42
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							88.77

**ตารางผนวกที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 5

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 5				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.51	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.20
420	0.52	0.06	0.06	0.05	0.06	0.01	89.10
434	0.51	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.20
546	0.36	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	89.81
588	0.43	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	92.25
594	0.45	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.11
616	0.47	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	92.20
662	0.30	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	87.78
666	0.28	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	86.90
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							89.95

**ตารางผนวกที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 6

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 6				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.51	0.05	0.04	0.05	0.05	0.01	90.85
420	0.52	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.38
434	0.51	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.20
546	0.36	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	90.74
588	0.43	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	90.70
594	0.45	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	89.63
616	0.47	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.49

ตารางผนวกที่ 10 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 6				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
662	0.30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	90.00
666	0.28	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	88.10
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.23

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 7

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 7				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.50	0.05	0.05	0.03	0.04	0.01	91.33
420	0.52	0.04	0.06	0.05	0.05	0.01	90.38
434	0.51	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	91.50
546	0.35	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.43
588	0.43	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.02
594	0.45	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	91.85
616	0.47	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	92.91
662	0.31	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	90.32
666	0.29	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.66
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.38

**ตารางผนวกที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับพีเอช 8

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่พีเอช 8				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.51	0.04	0.06	0.05	0.05	0.01	90.20
420	0.54	0.06	0.06	0.05	0.06	0.01	89.51
434	0.51	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.20
546	0.35	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	89.52
588	0.44	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	91.67
594	0.45	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	91.11
616	0.47	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	92.20
662	0.31	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	90.32
666	0.27	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.89
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.40

**ตารางผนวกที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วยรอบการเขย่า 0 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ ความเร็วยรอบ 0 (นาที)				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.42	0.42	0.41	0.42	0.01	30.00
588	0.77	0.57	0.56	0.56	0.57	0.01	26.41
594	0.79	0.59	0.58	0.58	0.59	0.01	25.74
616	0.83	0.58	0.57	0.57	0.58	0.01	30.52
662	0.43	0.31	0.30	0.30	0.31	0.01	28.68
666	0.38	0.28	0.27	0.27	0.28	0.01	27.19
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							28.09

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วยรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 50 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00	38.98
588	0.77	0.45	0.45	0.45	0.45	0.00	41.56
594	0.78	0.45	0.44	0.44	0.44	0.01	43.16
616	0.83	0.44	0.44	0.44	0.44	0.00	46.99
662	0.41	0.24	0.24	0.24	0.24	0.00	41.46
666	0.38	0.23	0.23	0.23	0.23	0.00	39.47
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							41.94

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วยรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 100 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.30	0.29	0.29	0.29	0.01	50.28
588	0.77	0.40	0.40	0.38	0.39	0.01	48.92
594	0.78	0.40	0.39	0.38	0.39	0.01	50.00
616	0.83	0.40	0.40	0.39	0.40	0.01	52.21
662	0.41	0.21	0.20	0.20	0.20	0.01	50.41
666	0.38	0.20	0.19	0.19	0.19	0.01	49.12
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							50.16

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วยรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 150 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.31	0.30	0.30	0.30	0.01	49.44
588	0.77	0.40	0.39	0.39	0.39	0.01	48.92
594	0.79	0.40	0.40	0.38	0.39	0.01	50.21
616	0.84	0.40	0.40	0.41	0.40	0.01	51.98
662	0.43	0.23	0.22	0.23	0.23	0.01	47.29
666	0.40	0.22	0.21	0.21	0.21	0.01	46.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							49.09

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเร็วยรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 200 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.38	0.36	0.37	0.37	0.01	37.29
588	0.74	0.44	0.44	0.44	0.44	0.00	40.54
594	0.75	0.43	0.43	0.43	0.43	0.00	42.67
616	0.80	0.43	0.42	0.42	0.42	0.01	47.08
662	0.42	0.25	0.24	0.25	0.25	0.01	41.27
666	0.39	0.24	0.24	0.24	0.24	0.00	38.46
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							41.22

**ตารางผนวกที่ 18** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 0 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 0 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.13	0.12	0.15	0.13	0.02	75.76
420	0.54	0.12	0.11	0.14	0.12	0.02	77.16
434	0.50	0.12	0.11	0.14	0.12	0.02	75.33
546	0.37	0.10	0.08	0.10	0.09	0.01	74.77
588	0.45	0.11	0.11	0.13	0.12	0.01	74.07
594	0.47	0.12	0.11	0.13	0.12	0.01	74.47
616	0.47	0.12	0.11	0.14	0.12	0.02	73.76
662	0.26	0.10	0.10	0.11	0.10	0.01	60.26
666	0.25	0.10	0.10	0.11	0.10	0.01	58.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							71.58

**ตารางผนวกที่ 19** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 50 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.73
420	0.54	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	94.44
434	0.50	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	92.67
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.45	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.33

ตารางผนวกที่ 19 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วรอบ 50 (นาทีก)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
594	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
616	0.47	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	95.04
662	0.26	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.46
666	0.25	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	89.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.39

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีส้มจากสารละลายสีส้มมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 100 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วรอบ 100 (นาทีก)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.05	0.04	0.05	0.05	0.01	91.52
420	0.54	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	93.83
434	0.50	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	94.00
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.45	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	91.85
594	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
662	0.26	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.46
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.86

**ตารางผนวกที่ 21** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 150 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	91.03
420	0.52	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.31
434	0.49	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.84
546	0.36	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	92.59
588	0.44	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.18
594	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
616	0.47	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	94.33
662	0.27	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	87.65
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.62

**ตารางผนวกที่ 22** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเร็วยรอบการเขย่า 200 รอบต่อนาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วยรอบ 200 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	89.10
420	0.52	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	91.03
434	0.49	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	90.48
546	0.36	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	90.74
588	0.44	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.18

## ตารางผนวกที่ 22 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเร็วรอบ 200 (นาทีก)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
594	0.47	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	92.20
616	0.47	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	94.33
662	0.27	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	87.65
666	0.25	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	86.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.60

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีส้มจากสารละลายสีส้มมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 15 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 15 (นาทีก)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.59	0.37	0.37	0.38	0.37	0.01	36.72
588	0.81	0.45	0.44	0.44	0.44	0.01	45.27
594	0.79	0.45	0.43	0.44	0.44	0.01	44.30
616	0.84	0.44	0.43	0.43	0.43	0.01	48.41
662	0.43	0.27	0.27	0.28	0.27	0.01	36.43
666	0.40	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	35.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							41.02

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 30 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 30 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.58	0.28	0.30	0.29	0.29	0.01	50.00
588	0.75	0.32	0.35	0.33	0.33	0.02	55.56
594	0.77	0.33	0.35	0.34	0.34	0.01	55.84
616	0.81	0.31	0.34	0.33	0.33	0.02	59.67
662	0.42	0.17	0.19	0.18	0.18	0.01	57.14
666	0.37	0.15	0.17	0.16	0.16	0.01	56.76
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							55.83

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 45 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 45 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.32	0.33	0.33	0.33	0.01	45.56
588	0.78	0.37	0.39	0.38	0.38	0.01	51.28
594	0.82	0.38	0.39	0.38	0.38	0.01	53.25
616	0.85	0.36	0.38	0.37	0.37	0.01	56.47
662	0.44	0.22	0.23	0.23	0.23	0.01	48.48
666	0.41	0.21	0.22	0.21	0.21	0.01	47.97
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							50.50

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 60 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 60 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.32	0.33	0.32	0.32	0.01	46.11
588	0.79	0.38	0.38	0.38	0.38	0.00	51.90
594	0.82	0.37	0.39	0.38	0.38	0.01	53.66
616	0.85	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	56.47
662	0.44	0.23	0.22	0.22	0.22	0.01	49.24
666	0.41	0.22	0.22	0.21	0.22	0.01	47.15
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							50.76

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 75 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 75 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.31	0.32	0.31	0.31	0.01	47.78
588	0.79	0.37	0.36	0.36	0.36	0.01	54.01
594	0.82	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	54.88
616	0.86	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00	58.14
662	0.45	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	51.11
666	0.41	0.21	0.22	0.22	0.22	0.01	47.15
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							52.18

**ตารางผนวกที่ 28** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 90 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 90 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.31	0.31	0.31	0.31	0.00	48.33
588	0.79	0.35	0.34	0.34	0.34	0.01	56.54
594	0.82	0.35	0.33	0.34	0.34	0.01	58.54
616	0.86	0.36	0.32	0.34	0.34	0.02	60.47
662	0.44	0.21	0.20	0.20	0.20	0.01	53.79
666	0.41	0.21	0.19	0.20	0.20	0.01	51.22
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.81

**ตารางผนวกที่ 29** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 105 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 105 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.29	0.33	0.31	0.31	0.02	48.33
588	0.79	0.33	0.37	0.35	0.35	0.02	55.70
594	0.82	0.35	0.35	0.36	0.35	0.01	56.91
616	0.86	0.32	0.36	0.34	0.34	0.02	60.47
662	0.44	0.21	0.20	0.20	0.20	0.01	53.79
666	0.41	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	51.22
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.40

**ตารางผนวกที่ 30** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเขย่า 120 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 120 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.60	0.31	0.29	0.30	0.30	0.01	50.00
588	0.78	0.33	0.35	0.35	0.34	0.01	55.98
594	0.82	0.35	0.35	0.36	0.35	0.01	56.91
616	0.86	0.34	0.34	0.34	0.34	0.00	60.47
662	0.44	0.20	0.20	0.21	0.20	0.01	53.79
666	0.41	0.20	0.19	0.21	0.20	0.01	51.22
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.73

**ตารางผนวกที่ 31** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ระยะเวลาเขย่า 15 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 15 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.06	0.07	0.07	0.07	0.01	87.88
420	0.54	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	91.36
434	0.51	0.06	0.07	0.06	0.06	0.01	87.58
546	0.40	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	90.83
588	0.48	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	89.58
594	0.50	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.00
616	0.52	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.38

ตารางผนวกที่ 31 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 15 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
662	0.28	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	82.14
666	0.27	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	81.48
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							87.92

ตารางผนวกที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 30 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 30 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	92.12
420	0.54	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	95.68
434	0.51	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	91.50
546	0.40	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	91.67
588	0.48	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	93.06
594	0.50	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.00
616	0.52	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	95.51
662	0.28	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	88.10
666	0.27	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	87.65
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.92

**ตารางผนวกที่ 33** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 45 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 45 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.05	0.04	0.05	0.05	0.01	91.52
420	0.54	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	95.06
434	0.51	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	91.50
546	0.40	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	91.67
588	0.48	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.75
594	0.50	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	94.67
616	0.52	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	94.87
662	0.28	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	91.67
666	0.27	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	91.36
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.90

**ตารางผนวกที่ 34** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 60 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 60 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.73
420	0.54	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.30
434	0.51	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	94.12
546	0.40	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.50
588	0.48	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	95.83
594	0.50	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.00

ตารางผนวกที่ 34 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 60 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.52	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.15
662	0.28	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.86
666	0.27	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	96.30
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.75

ตารางผนวกที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 75 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 75 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.59
420	0.54	0.04	0.03	0.04	0.04	0.01	93.21
434	0.51	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.16
546	0.40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	97.50
588	0.49	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	97.28
594	0.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.08
616	0.52	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.15
662	0.28	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.86
666	0.27	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.59
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.49

**ตารางผนวกที่ 36** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 90 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 45 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.59
420	0.54	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	93.21
434	0.51	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.16
546	0.40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	97.50
588	0.49	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	97.96
594	0.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.08
616	0.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	98.08
662	0.28	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	91.67
666	0.27	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.59
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.65

**ตารางผนวกที่ 37** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 105 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 105 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	93.21
420	0.54	0.03	0.03	0.04	0.03	0.01	93.83
434	0.51	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	92.81
546	0.40	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	95.83
588	0.49	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	96.60
594	0.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.08

ตารางผนวกที่ 37 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 105 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	98.08
662	0.28	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	91.67
666	0.27	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	93.83
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.66

ตารางผนวกที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเขย่า 120 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเขย่า 120 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.04	0.04	0.05	0.04	0.01	91.98
420	0.54	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.59
434	0.51	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	92.16
546	0.40	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	96.67
588	0.49	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	97.28
594	0.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	96.08
616	0.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	98.08
662	0.28	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.86
666	0.27	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	93.83
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.61

**ตารางผนวกที่ 39** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 0 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 0 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.54	0.35	0.32	0.35	0.34	0.02	37.04
588	0.76	0.44	0.44	0.42	0.43	0.01	42.98
594	0.75	0.45	0.43	0.43	0.44	0.01	41.78
616	0.79	0.46	0.45	0.44	0.45	0.01	43.04
662	0.43	0.26	0.27	0.28	0.27	0.01	37.21
666	0.38	0.24	0.25	0.24	0.24	0.01	35.96
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							39.67

**ตารางผนวกที่ 40** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.54	0.34	0.35	0.33	0.34	0.01	37.04
588	0.73	0.41	0.40	0.39	0.40	0.01	45.21
594	0.76	0.41	0.42	0.41	0.41	0.01	45.61
616	0.79	0.43	0.41	0.42	0.42	0.01	46.84
662	0.43	0.25	0.26	0.24	0.25	0.01	41.86
666	0.39	0.25	0.21	0.23	0.23	0.02	41.03
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							42.93

ตารางผนวกที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 60 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 60 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.54	0.35	0.33	0.31	0.33	0.02	38.89
588	0.73	0.39	0.38	0.36	0.38	0.02	48.40
594	0.76	0.38	0.39	0.37	0.38	0.01	50.00
616	0.79	0.39	0.39	0.38	0.39	0.01	51.05
662	0.44	0.24	0.27	0.26	0.26	0.02	41.67
666	0.40	0.24	0.23	0.25	0.24	0.01	40.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							45.00

ตารางผนวกที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.54	0.31	0.32	0.30	0.31	0.01	42.59
588	0.73	0.32	0.32	0.34	0.33	0.01	55.25
594	0.76	0.36	0.33	0.34	0.34	0.02	54.82
616	0.79	0.36	0.35	0.33	0.35	0.02	56.12
662	0.44	0.24	0.22	0.25	0.24	0.02	46.21
666	0.40	0.22	0.24	0.21	0.22	0.02	44.17
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							49.86

**ตารางผนวกที่ 43** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 120 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 120 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.55	0.30	0.31	0.30	0.30	0.01	44.85
588	0.74	0.32	0.31	0.33	0.32	0.01	56.76
594	0.77	0.34	0.32	0.34	0.33	0.01	56.71
616	0.80	0.34	0.34	0.33	0.34	0.01	57.92
662	0.42	0.23	0.22	0.22	0.22	0.01	46.83
666	0.40	0.21	0.22	0.22	0.22	0.01	45.83
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							51.48

**ตารางผนวกที่ 44** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 150 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 150 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.56	0.28	0.27	0.27	0.27	0.01	51.19
588	0.74	0.30	0.31	0.30	0.30	0.01	59.01
594	0.78	0.30	0.31	0.31	0.31	0.01	60.68
616	0.80	0.32	0.31	0.30	0.31	0.01	61.25
662	0.42	0.20	0.20	0.19	0.20	0.01	53.17
666	0.39	0.20	0.19	0.19	0.19	0.01	50.43
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							55.96

ตารางผนวกที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 180 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 180 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.55	0.28	0.27	0.27	0.27	0.01	50.30
588	0.72	0.30	0.31	0.31	0.31	0.01	57.41
594	0.75	0.30	0.31	0.32	0.31	0.01	58.67
616	0.79	0.32	0.31	0.30	0.31	0.01	60.76
662	0.42	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	52.38
666	0.39	0.20	0.19	0.20	0.20	0.01	49.57
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.85

ตารางผนวกที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 210 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 210 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.53	0.28	0.27	0.28	0.28	0.01	47.80
588	0.70	0.30	0.30	0.29	0.30	0.01	57.62
594	0.76	0.30	0.31	0.31	0.31	0.01	59.65
616	0.75	0.30	0.31	0.29	0.30	0.01	60.00
662	0.41	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	51.22
666	0.38	0.20	0.19	0.18	0.19	0.01	50.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.38

ตารางผนวกที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 240 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 240 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.53	0.28	0.27	0.27	0.27	0.01	48.43
588	0.71	0.29	0.31	0.29	0.30	0.01	58.22
594	0.74	0.30	0.30	0.31	0.30	0.01	59.01
616	0.77	0.30	0.31	0.30	0.30	0.01	60.61
662	0.39	0.20	0.20	0.20	0.20	0.00	48.72
666	0.37	0.18	0.19	0.18	0.18	0.01	50.45
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.24

ตารางผนวกที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ที่ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 0 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 0 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	91.36
420	0.54	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	91.36
434	0.50	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	91.33
546	0.37	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.59
588	0.42	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	94.44
594	0.45	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	94.81
616	0.48	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	95.83

ตารางผนวกที่ 48 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 0 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
662	0.28	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	91.67
666	0.26	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	91.03
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.94

ตารางผนวกที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เข้าสู่สภาวะสมดุล 30 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	90.74
420	0.54	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	91.36
434	0.49	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	89.80
546	0.35	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	95.24
588	0.43	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.02
594	0.47	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	94.33
616	0.49	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	94.56
662	0.26	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	96.15
666	0.28	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	91.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.99

**ตารางผนวกที่ 50** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 60 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 60 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.54	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	90.12
420	0.54	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	90.12
434	0.50	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01	90.67
546	0.37	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	92.79
588	0.42	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.86
594	0.45	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	94.07
616	0.48	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	94.44
662	0.28	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	90.48
666	0.26	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.46
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.56

**ตารางผนวกที่ 51** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	91.03
420	0.52	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	92.95
434	0.48	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	90.28
546	0.37	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	92.79
588	0.43	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	93.80
594	0.45	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	94.07

## ตารางผนวกที่ 51 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.47	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	94.33
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	89.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							91.98

ตารางผนวกที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 120 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 120 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
420	0.52	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	89.74
434	0.48	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	88.19
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.43	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	91.47
594	0.45	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	91.85
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.28

**ตารางผนวกที่ 53** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 150 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 150 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.06	0.06	0.06	0.060	0.00	88.46
420	0.52	0.05	0.06	0.06	0.057	0.01	89.10
434	0.48	0.05	0.06	0.06	0.057	0.01	88.19
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.030	0.00	91.89
588	0.43	0.03	0.04	0.04	0.037	0.01	91.47
594	0.45	0.04	0.04	0.04	0.040	0.00	91.11
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.030	0.00	93.62
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.030	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.030	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.13

**ตารางผนวกที่ 54** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 180 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 180 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
420	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
434	0.48	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	88.19
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.43	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	91.47
594	0.45	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.11

## ตารางผนวกที่ 54 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 180 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.06

ตารางผนวกที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 210 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 210 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
420	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
434	0.48	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	87.50
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.43	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	90.70
594	0.45	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.11
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							89.89

**ตารางผนวกที่ 56** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 240 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ระยะเวลา				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เข้าสู่สภาวะสมดุล 240 (นาที)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
420	0.52	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	88.46
434	0.48	0.05	0.06	0.06	0.06	0.01	88.19
546	0.37	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	91.89
588	0.43	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	90.70
594	0.45	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	91.11
616	0.47	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.62
662	0.28	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	89.29
666	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							89.97

**ตารางผนวกที่ 57** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 10  
มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 10 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.13	0.11	0.11	0.10	0.11	0.01	15.38
588	0.19	0.10	0.10	0.11	0.10	0.01	47.37
594	0.19	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	52.63

## ตารางผนวกที่ 57 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 10 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.21	0.09	0.09	0.10	0.09	0.01	57.14
662	0.12	0.07	0.07	0.08	0.07	0.01	41.67
666	0.11	0.07	0.07	0.08	0.07	0.01	36.36
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							41.76

**ตารางผนวกที่ 58** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับที่ข้อมจากสารละลายที่ข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายที่ข้อมมาตรฐานผสม 20  
มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 20 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.21	0.13	0.12	0.11	0.12	0.01	42.86
588	0.30	0.13	0.13	0.12	0.13	0.01	57.78
594	0.29	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	62.07
616	0.32	0.12	0.12	0.11	0.12	0.01	63.54
662	0.18	0.08	0.09	0.08	0.08	0.01	53.70
666	0.16	0.08	0.09	0.08	0.08	0.01	47.92
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							54.64

**ตารางผนวกที่ 59** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 30  
มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 30 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.34	0.18	0.17	0.18	0.18	0.01	48.04
588	0.47	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	61.70
594	0.48	0.18	0.17	0.16	0.17	0.01	64.58
616	0.52	0.18	0.17	0.17	0.17	0.01	66.67
662	0.29	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	62.07
666	0.27	0.11	0.11	0.10	0.11	0.01	60.49
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							60.59

**ตารางผนวกที่ 60** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 40  
มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 40 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.44	0.21	0.21	0.21	0.21	0.00	52.27
588	0.63	0.24	0.25	0.25	0.25	0.01	60.85
594	0.63	0.23	0.23	0.24	0.23	0.01	62.96
616	0.67	0.24	0.25	0.24	0.24	0.01	63.68
662	0.36	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	55.56
666	0.33	0.15	0.15	0.16	0.15	0.01	53.54
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							58.14

**ตารางผนวกที่ 61** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวากับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 50  
มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 50 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.55	0.24	0.24	0.25	0.24	0.01	55.76
588	0.71	0.29	0.28	0.28	0.28	0.01	60.09
594	0.72	0.27	0.26	0.26	0.26	0.01	63.43
616	0.76	0.28	0.27	0.28	0.28	0.01	63.60
662	0.42	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00	57.14
666	0.39	0.18	0.19	0.18	0.18	0.01	52.99
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							58.83

**ตารางผนวกที่ 62** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐาน  
ผสม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 10 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	76.67
420	0.71	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	90.91
434	0.72	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	80.00
546	0.76	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	90.48
588	0.42	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	88.89
594	0.39	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	88.89

ตารางผนวกที่ 62 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 10 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
616	0.10	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	93.33
662	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	83.33
666	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	83.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							86.20

ตารางผนวกที่ 63 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 20 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.22	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	86.36
420	0.23	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	85.51
434	0.23	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	85.51
546	0.15	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	91.11
588	0.18	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	88.89
594	0.19	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	91.23
616	0.20	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	93.33
662	0.11	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	87.88
666	0.10	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	90.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							88.87

**ตารางผนวกที่ 64** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 30 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.33	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	90.91
420	0.34	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	88.24
434	0.32	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	87.50
546	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	95.45
588	0.27	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.59
594	0.28	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.86
616	0.30	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	95.56
662	0.18	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	92.59
666	0.16	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	93.75
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.16

**ตารางผนวกที่ 65** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 40 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.18
420	0.44	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.18
434	0.42	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	89.68
546	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	96.67

ตารางผนวกที่ 65 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 40 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
588	0.36	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.44
594	0.37	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.59
616	0.39	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	95.73
662	0.24	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	94.44
666	0.22	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	95.45
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							94.15

ตารางผนวกที่ 66 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับค่าความเข้มข้นของสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ความเข้มข้น 50 (มิลลิกรัม/ลิตร)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.55	0.05	0.05	0.04	0.05	0.01	91.52
420	0.56	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	89.29
434	0.53	0.06	0.05	0.05	0.05	0.01	89.94
546	0.37	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	93.69
588	0.45	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.33
594	0.46	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.48
616	0.49	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	93.20
662	0.29	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	91.95
666	0.27	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.59
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							92.11

ตารางผนวกที่ 67 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 1 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.17	0.16	0.16	0.17	0.01	49.49
588	0.43	0.17	0.17	0.17	0.17	0.00	60.47
594	0.45	0.17	0.17	0.18	0.17	0.01	62.22
616	0.47	0.17	0.16	0.16	0.17	0.01	64.54
662	0.25	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	56.00
666	0.23	0.11	0.11	0.10	0.11	0.01	52.17
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							57.48

ตารางผนวกที่ 68 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 2 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.22	0.21	0.21	0.21	0.01	35.35
588	0.43	0.20	0.19	0.19	0.19	0.01	55.04
594	0.45	0.19	0.18	0.18	0.18	0.01	59.26
616	0.47	0.18	0.18	0.17	0.18	0.01	62.41
662	0.25	0.13	0.14	0.12	0.13	0.01	48.00
666	0.23	0.13	0.12	0.12	0.12	0.01	46.38
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							51.07

**ตารางผนวกที่ 69** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 3 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.28	0.27	0.26	0.27	0.01	18.18
588	0.43	0.25	0.25	0.24	0.25	0.01	42.64
594	0.45	0.24	0.24	0.23	0.24	0.01	47.41
616	0.47	0.25	0.24	0.23	0.24	0.01	48.94
662	0.25	0.17	0.16	0.15	0.16	0.01	36.00
666	0.23	0.18	0.17	0.17	0.17	0.01	24.64
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							36.30

**ตารางผนวกที่ 70** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวา กับปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 4 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.32	0.31	0.32	0.32	0.01	4.04
588	0.43	0.32	0.31	0.30	0.31	0.01	27.91
594	0.45	0.31	0.30	0.30	0.30	0.01	32.59
616	0.47	0.31	0.31	0.30	0.31	0.01	34.75
662	0.25	0.18	0.18	0.17	0.18	0.01	29.33
666	0.23	0.19	0.18	0.19	0.19	0.01	18.84
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							24.58

ตารางผนวกที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 5 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.01	1.01
588	0.43	0.33	0.33	0.34	0.33	0.01	22.48
594	0.45	0.32	0.33	0.33	0.33	0.01	27.41
616	0.47	0.34	0.33	0.33	0.33	0.01	29.08
662	0.25	0.18	0.18	0.19	0.18	0.01	26.67
666	0.23	0.19	0.20	0.19	0.19	0.01	15.94
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							20.43

ตารางผนวกที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยผงใบผักตบชวาที่ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 6 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00
588	0.43	0.34	0.33	0.34	0.34	0.01	21.71
594	0.45	0.34	0.33	0.33	0.33	0.01	25.93
616	0.47	0.34	0.33	0.34	0.34	0.01	28.37
662	0.25	0.21	0.20	0.19	0.20	0.01	20.00
666	0.23	0.20	0.20	0.19	0.20	0.01	14.49
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							18.42

**ตารางผนวกที่ 73** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 1 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.25	0.26	0.25	0.253	0.01	42.42
420	0.45	0.26	0.27	0.26	0.263	0.01	41.48
434	0.41	0.24	0.25	0.25	0.247	0.01	39.84
546	0.31	0.19	0.19	0.20	0.193	0.01	37.63
588	0.38	0.22	0.23	0.22	0.223	0.01	41.23
594	0.39	0.23	0.24	0.23	0.233	0.01	40.17
616	0.41	0.24	0.25	0.24	0.243	0.01	40.65
662	0.25	0.17	0.18	0.17	0.173	0.01	30.67
666	0.24	0.16	0.17	0.16	0.163	0.01	31.94
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							38.45

**ตารางผนวกที่ 74** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมาปะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 2 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.13	0.14	0.13	0.133	0.01	69.70
420	0.45	0.13	0.14	0.13	0.133	0.01	70.37
434	0.41	0.12	0.13	0.13	0.127	0.01	69.11
546	0.31	0.09	0.10	0.10	0.097	0.01	68.82
588	0.38	0.12	0.12	0.12	0.120	0.00	68.42

## ตารางผนวกที่ 74 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 2 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
594	0.39	0.12	0.12	0.13	0.123	0.01	68.38
616	0.41	0.12	0.13	0.12	0.123	0.01	69.92
662	0.25	0.10	0.10	0.10	0.100	0.00	60.00
666	0.24	0.09	0.10	0.10	0.097	0.01	59.72
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							67.16

ตารางผนวกที่ 75 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 3 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.07	0.06	0.07	0.07	0.01	84.85
420	0.45	0.07	0.06	0.06	0.06	0.01	85.93
434	0.41	0.07	0.06	0.06	0.06	0.01	84.55
546	0.31	0.06	0.05	0.05	0.05	0.01	82.80
588	0.38	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	85.96
594	0.38	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	85.96
616	0.41	0.06	0.05	0.05	0.05	0.01	86.99
662	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	80.00
666	0.24	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	79.17
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							84.02

ตารางผนวกที่ 76 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 4 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 4 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.04	0.04	0.05	0.04	0.01	90.15
420	0.45	0.04	0.04	0.05	0.04	0.01	90.37
434	0.41	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	90.24
546	0.31	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	87.10
588	0.38	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.11
594	0.39	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.31
616	0.41	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	94.31
662	0.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	88.00
666	0.24	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	87.50
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							90.23

ตารางผนวกที่ 77 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีเขียวจากสารละลายสีเขียวมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกัมมะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 5 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.18
420	0.45	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.33
434	0.41	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.68
546	0.31	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	95.70
588	0.38	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.74

## ตารางผนวกที่ 77 (ต่อ)

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 5 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
594	0.39	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.87
616	0.41	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	96.75
662	0.25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.00
666	0.24	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	91.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							93.88

ตารางผนวกที่ 78 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมจากสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์กับปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสงที่				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	ปริมาณตัวดูดซับ 6 (กรัม)						
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.44	0.04	0.04	0.03	0.04	0.01	91.67
420	0.45	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	93.33
434	0.41	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	92.68
546	0.31	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	96.77
588	0.38	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.74
594	0.39	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	94.87
616	0.41	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	96.75
662	0.25	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	92.00
666	0.24	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	91.67
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							93.83

**ตารางผนวกที่ 79** การนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบเบคซ์มาดูดซับสีย้อมจากสาร  
ละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยผงใบผักตบชวาทำการทดลอง 7 ซ้ำ

ครั้งที่	$\lambda$ (nm)					
	546	588	594	616	662	666
เริ่มต้น	0.40	0.41	0.41	0.32	0.21	0.23
1	0.17	0.17	0.16	0.16	0.12	0.11
2	0.15	0.16	0.15	0.15	0.10	0.10
3	0.17	0.17	0.17	0.16	0.11	0.11
4	0.16	0.16	0.17	0.16	0.11	0.10
5	0.16	0.16	0.16	0.15	0.11	0.10
6	0.17	0.17	0.16	0.16	0.12	0.11
7	0.16	0.16	0.15	0.16	0.11	0.10
เฉลี่ย	0.16	0.16	0.16	0.16	0.11	0.10
S.D.	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
ร้อยละการดูดซับ	60.00	61.67	59.93	49.11	50.34	51.55
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	55.43					

**ตารางผนวกที่ 80** การนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองแบบเบคซ์มาดูดซับสีย้อมจากสาร  
ละลายสีย้อมมาตรฐานผสมด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ทำการทดลอง 7 ซ้ำ

ครั้งที่	$\lambda$ (nm)								
	400	420	434	546	588	594	616	662	662
เริ่มต้น	0.42	0.43	0.40	0.33	0.38	0.40	0.41	0.23	0.22
1	0.04	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
2	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
3	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
4	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
5	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01

## ตารางผนวกที่ 80 (ต่อ)

ครั้งที่	$\lambda$ (nm)								
	400	420	434	546	588	594	616	662	662
5	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01
6	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
7	0.03	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
S.D.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ร้อยละการดูดซับ	92.52	92.69	91.79	95.24	92.48	94.64	95.12	91.30	91.56
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	93.04								

## ตารางผนวกที่ 81 ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงใบผักตบชวา

ปริมาณ ผงใบผักตบชวา (กรัม)	ไอโซเทอร์มการดูดซับ							
	$C_0$	$C_1$	V (L)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	30	0.382	0.05	1.481	0.675	2.620	0.171	-0.418
2	30	0.865	0.05	0.728	1.373	1.156	-0.138	-0.063
3	30	1.679	0.05	0.472	2.119	0.595	-0.326	0.225
4	30	2.748	0.05	0.341	2.936	0.364	-0.468	0.439
5	30	3.562	0.05	0.264	3.782	0.281	-0.578	0.552
6	30	4.427	0.05	0.213	4.693	0.226	-0.671	0.646

ตารางผนวกที่ 82 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

ปริมาณ ถ่าน (กรัม)	$C_0$	$C_1$	V (L)	q	1/q	1/C	log q	log C
1	40	0.585	0.05	1.971	0.507	1.710	0.295	-0.233
2	40	0.619	0.05	0.985	1.016	1.615	-0.007	-0.208
3	40	0.444	0.05	0.659	1.517	2.250	-0.181	-0.352
4	40	0.360	0.05	0.496	2.018	2.779	-0.305	-0.444
5	40	0.291	0.05	0.397	2.518	3.436	-0.401	-0.536
6	40	0.349	0.05	0.330	3.026	2.864	-0.481	-0.457

ตารางผนวกที่ 83 ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย  
ด้วยผงใบฝักตบชวาโดยทำการทดลองแบบเบตซ์

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสง				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.44	0.15	0.14	0.15	0.15	0.01	66.67
588	0.39	0.13	0.12	0.13	0.13	0.01	67.52
594	0.38	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	68.42
616	0.35	0.11	0.10	0.11	0.11	0.01	69.52
662	0.30	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	73.33
666	0.29	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	72.41
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							69.65

**ตารางผนวกที่ 84** ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยคอง  
ด้วยถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสง				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
400	0.88	0.36	0.36	0.36	0.36	0.00	59.09
420	0.72	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	58.33
434	0.67	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	55.22
546	0.29	0.17	0.17	0.18	0.17	0.01	40.23
588	0.25	0.15	0.15	0.16	0.15	0.01	38.67
594	0.25	0.14	0.14	0.15	0.14	0.01	42.67
616	0.22	0.14	0.14	0.15	0.14	0.01	34.85
662	0.18	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	27.78
666	0.18	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	33.33
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							43.35

**ตารางผนวกที่ 85** ประสิทธิภาพการดูดซับสีในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยคอง  
ด้วยผงใบผักตบชวาโดยการนำผงใบผักตบชวาไปประยุกต์ใช้จริงที่ระยะเวลา  
เข้าสู่ภาวะสมดุล 90 นาที

$\lambda$ (nm)	ค่าการดูดกลืนแสง				ค่าเฉลี่ย	S.D.	ร้อยละการดูดซับ
	เริ่มต้น	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
546	0.44	0.25	0.24	0.25	0.25	0.01	43.94
588	0.40	0.23	0.23	0.23	0.23	0.00	42.50
594	0.39	0.22	0.22	0.21	0.22	0.01	44.44
616	0.36	0.20	0.20	0.19	0.20	0.01	45.37
662	0.31	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	51.61
666	0.30	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	50.00
ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย							46.31

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวบุษยา มากงลาด
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 21 สิงหาคม 2529
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลดอนตูม จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาส่งเสริมและนิเทศศาสตร์เกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่น	นำเสนอผลงานทางวิชาการ ในการประชุมวิชาการ, อุบล วิจัย ครั้งที่ 5 (กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) เรื่อง การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการ พัฒนาद्यตุง ด้วยผงไบโอฟักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าว เชิงพาณิชย์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-