



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

.....วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคลองตุง โดยใช้ตัวดูดซับจาก  
ผักตบชวาและกกกลม

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater

Utilizing Adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb.

นามผู้วิจัย นางสาวอศุภา สุขอึ้งจะสกุล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( .....รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D. .... )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( .....รองศาสตราจารย์กณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. .... )

ประธานสาขาวิชา

( .....ศาสตราจารย์เกษม จันทร์แก้ว, Ph.D. .... )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( .....รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. .... )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน ..... พ.ศ. ....

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอยตุง  
โดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater  
Utilizing Adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb.

โดย

นางสาวอศุภา สุขอัสจะสกุล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2555

อศปภา สุขอัสจะสกุล 2555: การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า

โครงการพัฒนาออยดุง โดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์

สิ่งแวดล้อม วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:

รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D. 132 หน้า

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และกกกลม ในการกำจัดสีจากสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม และน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง สีย้อมที่ทำการศึกษาคือสีย้อมรีแอคทีฟ 9 ชนิด ได้แก่ 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 โดยทำการทดลองแบบแบตช์เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช (4-8) ความเร็วรอบการเขย่า (0-200 รอบ/นาที) ระยะเวลาการเขย่า (15-120 นาที) ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (0-240 นาที) ความเข้มข้นสีย้อม (10-80 มิลลิกรัม/ลิตร) และปริมาณตัวดูดซับ (1-5 กรัม) ผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวามีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมทั้ง 9 ชนิด ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 76.21 (หรือคิดเป็น 0.953 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ) ภายใต้สภาวะที่ พีเอช 4 ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 50 มิลลิกรัม/ลิตร ในขณะที่การใช้ตัวดูดซับจากกกกลมสามารถดูดซับสีย้อมได้เพียง 6 ชนิด (2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G) ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 56.14 (หรือคิดเป็น 0.374 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ) ภายใต้สภาวะที่ พีเอช 7 ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 15 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัม/ลิตร กลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ส่วนตัวดูดซับจากกกกลมสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยดุง ด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและกกกลม เฉลี่ยร้อยละ 56.48 และ 31.95 ตามลำดับ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Akaprapa Sukadjasakul 2012: Dyes Removal from Doi Tung Development Project  
Textile Wastewater Utilizing Adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus*  
Rottb. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental  
Science, College of Environment. Thesis Advisor: Associate Professor  
Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 132 pages.

This research was to study the effectiveness of adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb. in removing dyes from mixed standard dyes solution and textile wastewater from Doi Tung Development Project. Nine reactive dyes were used e.g. 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 and 2% Br.Blue LS-G. The experiment was conducted in order to figure out the optimum treatment in batch experiment. The studied factors were pH (4-8), mixing speed (0-200 rpm), shaking time (15-120 min.), contact time (0-240 min.) concentration of mixed standard dyes solution (10-80 mg/L) and amount of adsorbent (1-5 g). The results demonstrated the average highest adsorption efficiency of dyes in mixed standard solution by adsorbent from Water Hyacinth at 76.21% (or 0.953 mg/g of adsorbent) under the condition pH 4, adsorbent weight 2 g, shaking speed 50 rpm, shaking time 30 min, contact time 90 min and concentration of mixed standard dyes solution 50 mg/L, while adsorbent from *Cyperus corymbosus* Rottb. can remove only six dyes (2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R and 2% Br.Blue LS-G) and gave the average percentage of adsorption at 56.14% (or 0.374 mg/g of adsorbent) under the condition pH 7, adsorbent weight 3 g, shaking speed 50 rpm, shaking time 15 min, contact time 30 min and concentration of mixed standard dyes solution 40 mg/L. The adsorption mechanism of adsorbent from Water Hyacinth was conformed to the Langmuir isotherm and adsorbent from *Cyperus corymbosus* Rottb. was conformed to the Langmuir and Freundlich isotherm. The removal performance of dyes in textile wastewater from Doi Tung Development Project by adsorbent from Water Hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb. were 56.48% and 31.95% average adsorption respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ ประธานกรรมการ  
ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนเสนอแนะแนวทางการทดลองตั้งแต่เริ่มดำเนินงาน  
จนแล้วเสร็จ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ กรรมการร่วมที่กรุณาให้  
คำแนะนำปรึกษาและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่และ  
เครื่องมือทำงานวิจัย ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาโดยสูง ที่สนับสนุนในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้  
ผ่านทางโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมทั้ง  
อนุเคราะห์ยืมผ้า และน้ำที่จากการยืมผ้าที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม สำหรับกำลังใจและความ  
ช่วยเหลือ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ซึ่งเป็นผู้มีพระคุณอย่างสูงสุดและอยู่  
เบื้องหลังความสำเร็จครั้งนี้

อคปภา สุขอัสจะสกุล  
มกราคม 2555

## สารบัญ

|                            | หน้า |
|----------------------------|------|
| สารบัญ                     | (1)  |
| สารบัญตาราง                | (2)  |
| สารบัญภาพ                  | (7)  |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ  | (12) |
| คำนำ                       | 1    |
| วัตถุประสงค์               | 2    |
| การตรวจเอกสาร              | 3    |
| อุปกรณ์และวิธีการ          | 50   |
| อุปกรณ์                    | 50   |
| วิธีการ                    | 53   |
| ผลและวิจารณ์               | 62   |
| สรุปและข้อเสนอแนะ          | 90   |
| สรุป                       | 90   |
| ข้อเสนอแนะ                 | 92   |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง       | 93   |
| ภาคผนวก                    | 96   |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 132  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                            | หน้า |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี                                       | 7    |
| 2        | แสดงค่าที่แอลวีของสาร                                                                      | 14   |
| 3        | ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่างๆ                                                      | 15   |
| 4        | แสดงค่าแอลดี 50 ของสีย้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง                       | 15   |
| 5        | แสดงเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี                                                            | 17   |
| 6        | แสดงวิธีกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีย้อมประเภทต่างๆ                                            | 17   |
| 7        | คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยผักตบชวา                                             | 43   |
| 8        | องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง                                                                  | 43   |
| 9        | ความสามารถในการลดมลสารของผักตบชวา                                                          | 45   |
| 10       | สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง 9 ชนิด                            | 51   |
| 11       | คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตง                                            | 63   |
| 12       | อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา                  | 65   |
| 13       | อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลม                          | 66   |
| 14       | อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา    | 68   |
| 15       | อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลม            | 69   |
| 16       | อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา          | 70   |
| 17       | อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลม                  | 72   |
| 18       | อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา | 73   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ |                                                                                                                                                      | หน้า |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 19       | อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับ<br>สีของตัวดูดซับจากกกกลม                                                                      | 75   |
| 20       | อิทธิพลของความเข้มข้นสีของต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา                                                                       | 76   |
| 21       | อิทธิพลของความเข้มข้นสีของต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากกกกลม                                                                               | 78   |
| 22       | อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาต่อร้อยละ<br>การดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา                                                        | 79   |
| 23       | สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่า<br>สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสีของแต่ละชนิดของ<br>ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา | 80   |
| 24       | อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากกกกลมต่อร้อยละ<br>การดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม                                                                        | 82   |
| 25       | สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่า<br>สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากกกกลม                     | 83   |
| 26       | คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วย<br>ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมโดย<br>การทดลองแบบแบตช์                    | 84   |
| 27       | คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวาโดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง                                       | 88   |
| 28       | คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจาก<br>กกกลมโดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง                                               | 89   |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                                               | หน้า |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1            | อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา                           | 103  |
| 2            | อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม                                   | 104  |
| 3            | อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา             | 105  |
| 4            | อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากกกกลม                     | 106  |
| 5            | อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับ<br>จากลำต้นผักตบชวา                   | 107  |
| 6            | อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับ<br>จากกกกลม                           | 108  |
| 7            | อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา    | 109  |
| 8            | อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของ<br>ของตัวดูดซับจากกกกลม            | 110  |
| 9            | อิทธิพลของความเข้มข้นสีของตัวดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา                         | 111  |
| 10           | อิทธิพลของความเข้มข้นสีของตัวดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากกกกลม                                 | 112  |
| 11           | อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาต่อร้อยละการดูดซับ<br>สีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา | 113  |
| 12           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 6% Super Black G ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา                       | 114  |
| 13           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ของตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา                      | 115  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                               | หน้า |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|------|
| 14           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา        | 116  |
| 15           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ของตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา      | 117  |
| 16           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา        | 118  |
| 17           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 4% Navy LS-G ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา           | 119  |
| 18           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Red LS-B ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา            | 120  |
| 19           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา          | 121  |
| 20           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวา        | 122  |
| 21           | อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากกกกลมต่อร้อยละการดูดซับ<br>สีของตัวดูดซับจากกกกลม | 123  |
| 22           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม                | 124  |
| 23           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม              | 125  |
| 24           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 4% Navy LS-G ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม                   | 126  |
| 25           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Red LS-B ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม                    | 127  |
| 26           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม                  | 128  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                | หน้า |
|--------------|----------------------------------------------------------------|------|
| 27           | ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ของตัวดูดซับจาก<br>กกกลม | 129  |
| 28           | มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม<br>อุตสาหกรรม   | 130  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                                                                              | หน้า |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ                                                                                     | 20   |
| 2      | แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว                                                                             | 21   |
| 3      | แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดการเหนี่ยวนำ                                                                                               | 22   |
| 4      | แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว                                                                                                                | 22   |
| 5      | การดูดซับของตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น                                                             | 24   |
| 6      | ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ                                                                                                          | 24   |
| 7      | การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ                                                                                               | 28   |
| 8      | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน                                                                                                                | 31   |
| 9      | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง                                                                                                                | 32   |
| 10     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช                                                                                                  | 33   |
| 11     | ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช                                                                                               | 34   |
| 12     | กลไกการดูดซับของตัวถูกละลายของตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกละลายถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ | 34   |
| 13     | ตัวถูกละลายปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ $q_m$                          | 35   |
| 14     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์                                                                                                   | 36   |
| 15     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท                                                                                                      | 37   |
| 16     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท                                                                                                         | 38   |
| 17     | โครงสร้างของเซลลูโลส                                                                                                                         | 40   |
| 18     | ตัวอย่างส่วนประกอบของสี (Direct Yellow 4)                                                                                                    | 41   |
| 19     | การทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง                                                                                                                | 60   |
| 20     | ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา                                                                                                                    | 62   |
| 21     | ตัวดูดซับจากกกกลม                                                                                                                            | 63   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                  | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 22     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับค่าพีเอช                  | 65   |
| 23     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับค่าพีเอช                          | 66   |
| 24     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับความเร็วรอบการเขย่า       | 67   |
| 25     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับความเร็วรอบการเขย่า               | 68   |
| 26     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับระยะเวลาเขย่า             | 70   |
| 27     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับระยะเวลาเขย่า                     | 71   |
| 28     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล | 73   |
| 29     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล         | 74   |
| 30     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับความเข้มข้นสียอม          | 76   |
| 31     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับความเข้มข้นสียอม                  | 77   |
| 32     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้น<br>ผักตบชวากับตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา | 79   |
| 33     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก<br>กกกลมกับตัวดูดซับจากกกกลม                 | 81   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่            |                                                                                                                                        | หน้า |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 34                | เปรียบเทียบสีของน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ | 84   |
| 35                | ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา โดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง                 | 86   |
| 36                | ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากกกกลม โดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง                         | 87   |
| <b>ภาพผนวกที่</b> |                                                                                                                                        |      |
| 1                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 6% Super Black G ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร                     | 98   |
| 2                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Turquoise H-GN ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร                    | 98   |
| 3                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Yellow LS-4G ที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร                      | 99   |
| 4                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Yellow LS-R-01 ที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร                    | 99   |
| 5                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Orange LS-BR ที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร                      | 100  |
| 6                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 4% Navy LS-G ที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร                         | 100  |
| 7                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Red LS-B ที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร                          | 101  |
| 8                 | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Blue LS-3R ที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร                        | 101  |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ |                                                                                                                   | หน้า |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 9          | กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Br.Blue LS-G ที่ความยาวคลื่น 662 นาโนเมตร | 102  |
| 10         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 6% Super Black G    | 114  |
| 11         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN   | 115  |
| 12         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G     | 116  |
| 13         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01   | 117  |
| 14         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR     | 118  |
| 15         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 4% Navy LS-G        | 119  |
| 16         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Red LS-B         | 120  |
| 17         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R       | 121  |
| 18         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก ลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G     | 122  |
| 19         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก กกกกลมในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G            | 124  |
| 20         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก กกกกลมในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01          | 125  |
| 21         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก กกกกลมในการดูดซับสี 4% Navy LS-G               | 126  |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพผนวกที่ |                                                                                                         | หน้า |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 22         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ข้าว) และฟรุณดิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก<br>กกกลมในการดูดซับสี 2% Red LS-B     | 127  |
| 23         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ข้าว) และฟรุณดิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก<br>กกกลมในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R   | 128  |
| 24         | ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ข้าว) และฟรุณดิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจาก<br>กกกลมในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G | 129  |

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|              |   |                                                                           |
|--------------|---|---------------------------------------------------------------------------|
| BOD (บีโอดี) | = | Biochemical Oxygen Demand (ความต้องการออกซิเจนของน้ำทิ้งโดยวิธีทางชีวภาพ) |
| COD (ซีโอดี) | = | Chemical Oxygen Demand (ความต้องการออกซิเจนของน้ำทิ้งโดยวิธีทางเคมี)      |
| pH (พีเอช)   | = | ค่าความเป็นกรด-เบส                                                        |
| TDS          | = | Total Dissolved Solids (ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ)                        |
| TS           | = | Total solids (ของแข็งทั้งหมด)                                             |
| TSS          | = | Total suspended solids (ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด)                            |

การกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง  
โดยใช้ตัวดูดซับจากผักตบชวาและกกกลม

Dyes Removal from Doi Tung Development Project Textile Wastewater  
Utilizing Adsorbent from Water Hyacinth and  
*Cyperus corymbosus* Rottb.

คำนำ

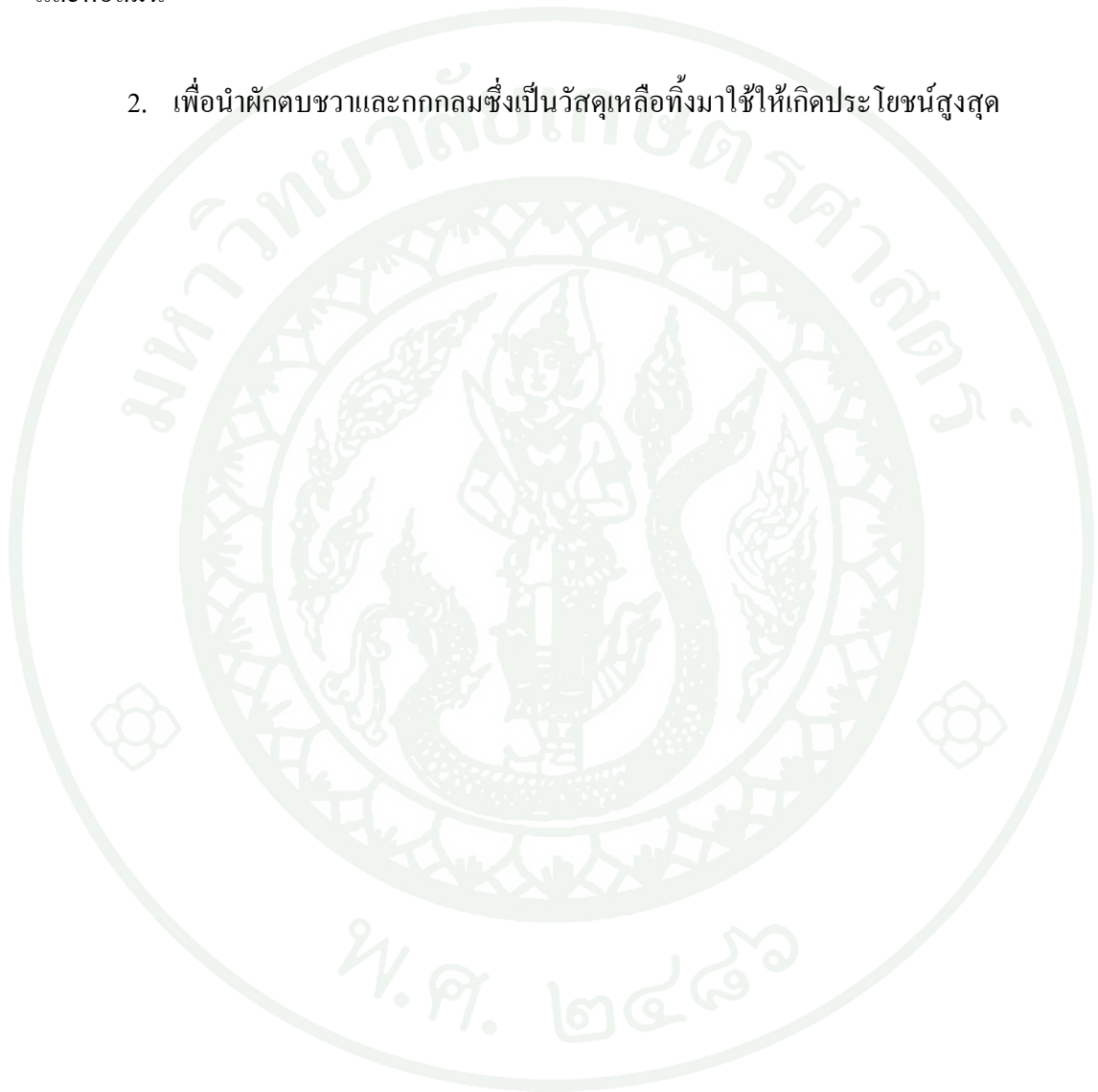
อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยเริ่มมีมาประมาณ 50 ปีที่แล้ว และได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว จนเป็นอุตสาหกรรมส่งออกที่สำคัญของประเทศ กระบวนการในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประกอบด้วย การผลิตเส้นใย การปั่นด้าย การทอผ้า และการฟอกย้อม ซึ่งการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้น้ำมากที่สุด ซึ่งน้ำเสียที่ออกมาจะมี COD และ BOD สูง รวมทั้งมีสีย้อมซึ่งก่อให้เกิดความน่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็น โดยสีย้อมจะมีผลต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำ และบดบังไม่ให้แสงอาทิตย์ส่องถึงได้น้ำ ทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบนิเวศน์เสียสมดุล

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้ามีหลายวิธี เช่น การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biodegradation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) เป็นต้น ซึ่งแม้ว่าจะสามารถทำได้หลายวิธี แต่ก็ยังคงมีปัญหาในเรื่องค่าใช้จ่ายที่สูง วิธีบำบัดด้วยกระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งมีข้อดีคือ ลงทุนน้อย ใช้สถานที่น้อย ออกแบบ ควบคุมดูแลง่าย และไม่มีสารพิษ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ การวิจัยและพัฒนาหาสารดูดซับสีย้อมใหม่ๆ ที่เหมาะสมและมีราคาถูกเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพราะนอกจากเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งไปบำบัดน้ำเสียแล้ว ยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง

ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการใช้วัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพมาเป็นตัวดูดซับ ในที่นี้เลือกใช้ผักตบชวาและกกกลม เนื่องจากเป็นพืชที่หาได้ทั่วไป และมีเปอร์เซ็นต์เซลลูโลสค่อนข้างสูง ซึ่งประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ คือ การนำผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางน้ำ และกกกลมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้พืชจากโครงการแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและกกกลมในการกำจัดสีข้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานข้อมผ้า โครงการพัฒนาคลอง ด้วยวิธีแบบเบตซ์ และคอลัมน์
2. เพื่อนำผักตบชวาและกกกลมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด



## การตรวจเอกสาร

### 1. สีย้อมผ้า

สีย้อมผ้ามีมากมายหลายชนิด การนำสีย้อมผ้ามาใช้ให้ได้ผลดีขึ้นอยู่กับการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เมื่อ โมเลกุลของสีย้อมผ้ามีหมู่ อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกัน ในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้เกิดการดูดติดกับเส้นใยได้ก็คือ (Abrahart, 1997)

- 1) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)
- 2) แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's Forces)
- 3) แรงไอออนิก (Ionic Forces)
- 4) พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมผ้ากับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกันไป แรงดึงดูดทางเคมีที่ทำให้เกิดการยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์ นอกจากอิทธิพลของแรงทั้ง 4 แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีย้อมผ้าก็มีผลต่อการยึดติด หรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีขนาดเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีย้อมผ้าดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมผ้ามีลักษณะแบนและมีความกว้างหรือความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีย้อมผ้ามีความคงทนสูงมากขึ้น

#### 1.1 การจำแนกสีย้อม

สีที่ใช้ในการกระบวนการฟอกย้อม สามารถจำแนกได้หลายวิธี ดังนี้

##### 1.1.1 จำแนกตามวิธีการใช้งาน

#### 1.1.1.1 สีย้อมตรง (Direct Dyes)

สีย้อมตรงเป็นสีที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรงให้ซึมเข้าไปภายในเซลลูโลส สามารถย้อมผ้าได้ทันทีโดยไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดเหมือนสีตัวอื่นๆ จึงเรียกว่า สีย้อมตรง หรือ สีย้อมโดยตรง

#### 1.1.1.2 สีย้อมแอคทีฟ (Reactive Dyes)

สีย้อมแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนเมื่อนำไปย้อมที่ pH เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันโดยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) กลายเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีคุณสมบัติละลายน้ำและดูดซับสีในน้ำ ทำให้สีเข้าไปอยู่ในเส้นใย เมื่อเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะยึดติดเส้นใย

#### 1.1.1.3 สีย้อมเบสิก (Basic Dyes)

สีย้อมเบสิกนั้นเป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic Base) สามารถละลายน้ำได้ มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนบางครั้งเรียกว่า สีย้อมแคทไอออนิก (Cationic Dyes) สีย้อมประเภทนี้มี ความคงทนต่ำสามารถใช้ย้อมใยอะคริลิกได้ นิยมใช้กันในประเทศแถบตะวันออก ที่นิยม ความสดใสของสีมากกว่าความคงทนของสี

#### 1.1.1.4 สีย้อมกรด (Acid Dyes)

สีย้อมกรด หรือสีกรดเกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ มีโครงสร้างเป็นแอนไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี สีในกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรด สีย้อมดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บรักษาจึงต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีดูดความชื้นเข้าไปจะทำให้เสื่อมสภาพเร็ว ตัวสีประเภทนี้จะดูดซับไฮโดรเจนโดยตรง จึงนิยมใช้ในการย้อมพวกขนสัตว์และไหม

#### 1.1.1.5 สีมอร์แดน (Mordant Dyes)

สีมอร์แดน หรือ สีโครม เป็นสีที่มีโครงสร้างเหมือนกันกับสีแอสิด เพียงแต่จะสามารถเชื่อมโยงกับโครเมียมเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนทที่ถาวรขึ้น สารประกอบโคออร์ดิเนทใหม่นี้จะดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า จึงทำให้มีความคงทนต่อแสงและน้ำเพิ่มขึ้น สีมอร์แดนมีคุณสมบัติในการย้อมเหมือนกับสีแอสิด แต่ใช้เป็นสีแอสิดไม่ได้ เพราะว่าถ้ายังไม่ได้ให้ตัวสีทำปฏิกิริยากับโครเมียม สีจะไม่คงทนต่อค่า

#### 1.1.1.6 สีวัต (Vat Dyes)

สีวัตได้ชื่อมาจากการที่ตัวมันเองไม่ละลายน้ำ ต้องอาศัยรีดิวซ์ซึ่งเอเจนต์ช่วยในการละลายจึงสามารถย้อมติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้ โครงสร้างของสีประเภทนี้แตกต่างกันมาก สารประเภทเชิงซ้อนของสีทุกตัวจะต้องมีหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl, C=O) อย่างน้อยหนึ่งหมู่รวมอยู่ด้วยเสมอ

#### 1.1.1.7 สีซัลเฟอร์ (Sulfer Dyes)

สีซัลเฟอร์ หรือ สีกำมะถัน เตรียมได้จากการหลอมละลายกำมะถันหรือโซเดียมซัลไฟด์กับกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรเจน สีชนิดนี้ย้อมง่าย มีราคาถูก และมีความคงทนต่อน้ำดี

#### 1.1.1.8 สีดิสเพิร์ส (Disperse Dyes)

สีประเภทนี้ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตต ซึ่งเป็นเส้นใยที่ดูดซับน้ำได้น้อย ต่อมาเมื่อมีการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับเส้นใยอาซิเตตออกมา จึงได้ใช้สีชนิดนี้ในการย้อมเส้นใยสังเคราะห์ด้วย สีชนิดนี้ไม่ละลายน้ำแต่เป็นละอองละเอียดละลายอยู่ในน้ำ

### 1.1.2 จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

สีย้อมที่จำหน่ายตามท้องตลาดในปัจจุบันมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงสร้างหลักๆ อยู่มากกว่า 30 ชนิด แต่ที่ใช้งานกันมากจริงๆ มีอยู่ไม่ถึง 10 ชนิด ซึ่งโครงสร้างที่สำคัญได้แก่

#### 1.1.2.1 สีย้อมอะโซ (Azo Dyes)

เป็นสีย้อมที่มีกลุ่มอะโซ ( $N=N$ ) อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีย้อมกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่และมีความสำคัญมากที่สุด โดยครอบคลุมถึงร้อยละ 50 ของสีย้อมที่ใช้ทั้งหมด คุณสมบัติที่สำคัญของสีย้อมกลุ่มนี้ คือ มีสีให้เลือกครบทุกโทนสีแต่โดยทั่วไปจะมีความสำคัญโดยเฉพาะในช่วงของสีเหลือง แสด แดง น้ำตาล และดำ มีกรรมวิธีการสังเคราะห์ค่อนข้างง่าย มีความสว่างสดใสและความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี และราคาไม่แพง

#### 1.1.2.2 สีย้อมแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes)

เป็นสีย้อมที่มีโครงสร้างของแอนทราควิโนนเป็นโครงสร้างหลักอยู่ในโมเลกุล และส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้โดยอาศัยแอนทราควิโนนเป็นสารเริ่มต้น สีย้อมกลุ่มนี้มีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากสีอะโซ โดยครอบคลุมประมาณร้อยละ 25 ของสีย้อมทั้งหมดสีที่มีความสำคัญ คือ สีม่วง ฟ้า เขียว และแดงสด เป็นสีที่มีความสว่างสดใส และมีความคงทนต่อแสงอยู่ในเกณฑ์ดี แต่ความเข้มของสีน้อยกว่าสีอะโซ และยังมีราคาแพงอีกด้วย

#### 1.1.2.3 สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulphur Dyes)

เป็นสีย้อมที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของโมเลกุล สีกลุ่มนี้เป็นสีที่มีปริมาณการใช้มากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากเป็นสีที่มีราคาถูกจึงนิยมใช้ย้อมสีทึบๆ ที่ต้องการความเข้มสูง เช่น สีดำ น้ำตาล และน้ำเงิน สีกลุ่มนี้มีให้เลือกไม่มากนัก ส่วนมากจะเป็นสีทึบไม่สดใส

#### 1.1.2.4 สีย้อมอินดิโกอยด์ (Indigoid Dyes)

เป็นสีที่มีโครงสร้างของอินดิโกติน (Indigotin) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของสีอินดิโกอยู่ในโมเลกุล

#### 1.1.3 จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

โดยทั่วไปสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม นั้น ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เส้นใยประเภทเซลลูโลส สีย้อมที่เหมาะสมกับการย้อมไหม ขนสัตว์ ฝ้าย และเรยอน (Rayon) ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมาได้ สีคัสเพิร์สเหมาะสำหรับเส้นใยประเภทอะซิเตด (Acetate) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) และไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้าย หรือขนสัตว์ ตารางที่ 1 แสดงประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

ตารางที่ 1 ประเภทของสีย้อมโดยจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี

| เส้นใย       | ประเภทของสี                            |
|--------------|----------------------------------------|
| ฝ้าย         | Direct, Sulphur, Azo, Vat, Reactive    |
| ลินิน        | Direct, Sulphur, Azo, Vat, Reactive    |
| ขนสัตว์      | Acid, Metal-complex, Mordant, Reactive |
| ไหม          | Acid, Direct, Reactive, Basic          |
| เรยอน        | Direct, Reactive                       |
| อะซิเตด      | Disperse                               |
| ไนลอน        | Acid, Modified basic, Metal-complex    |
| โพลีเอสเตอร์ | Disperse                               |
| อะคริลิก     | Modified basic, Modified acids         |

ที่มา: นิรนาม (2537)

#### 1.1.4 จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สีชนิดละลายน้ำ และสีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

##### 1.1.4.1 สีชนิดที่ละลายน้ำได้

- (1) สีแอซิด
- (2) สีเบสิก
- (3) สีไคเรกท์
- (4) สีรีแอคทีฟ

##### 1.1.4.2 สีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

- (1) สีอะโซ
- (2) สีดิสเพิร์ส
- (3) สีแว็ต
- (4) สีพิกเมนต์
- (5) สีซัลเฟอร์
- (6) สีเมทัลคอมเพลกซ์

## 2. หลักการย้อมผ้า

กระบวนการย้อมผ้าโดยทั่วไปมักจะนำสีย้อมมาทำให้อยู่ในรูปของสารละลายหรือสารคิสเพิร์สชัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำมาย้อมเส้นใยที่ต้องการ ตามด้วยกระบวนการทำให้สีย้อมติดแน่นกับเส้นใยเพื่อให้มีความคงทนต่อการซักด้วยน้ำยาต่างๆ

การย้อมสีโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยวิธีการ ดังต่อไปนี้

- (1) การทำให้เกิดการแพร่กระจายหรือซึมผ่านบนพื้นผิวของเส้นใย
- (2) การดูดซึมสีย้อมของเส้นใย
- (3) การซึมผ่านของโมเลกุลสีย้อมผ่านชั้นกั้นทางจลนศาสตร์ เข้าไปสู่ภายในเส้นใย
- (4) การดูดซับ
- (5) การถ่ายสีด้วยแรงทางเชิงกลโดยการอัด
- (6) การกักเก็บเชิงกล
- (7) การสร้างพันธะทางเคมีกับอนุมูลของเส้นใย
- (8) การละลายในเส้นใย เช่น การละลายของสีย้อมชนิดคิสเพิร์สที่เป็นของแข็งในเส้นใยโพลีเอสเตอร์
- (9) ปฏิกริยาเคมีบนเส้นใยโดยปกติแล้ว ขั้นตอนที่สีย้อมซึมผ่านเส้นใยจะเป็นขั้นตอนที่ช้าและมีผลต่ออัตราการย้อมสีมากที่สุด

### 2.1 ตัวแปรที่สำคัญในการย้อมสี

### 2.1.1 ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับการย้อมเส้นใยประเภทโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ฝ้าย และเรยอน ส่วนใหญ่จะไม่สามารถย้อมเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นมาได้ สีย้อมประเภท คิสเพิร์ส ก็เหมาะสำหรับเส้นใยประเภทอะซิเตด หรือ โพลีเอสเตอร์ และเช่นเดียวกันไม่เหมาะที่จะนำมาย้อมฝ้ายหรือขนสัตว์

### 2.1.2 การใช้สารช่วยอื่นๆ

สืบเนื่องจากระบบย้อมสี ความสม่ำเสมอของสีขึ้นกับ pH ของน้ำย้อมหรือความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ การใช้สารเพิ่มความสม่ำเสมอใช้ได้กับการย้อมเส้นใยหลายระบบ สารเคมีที่เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน จะถูกนำมาใช้ในการควบคุมปริมาณการใช้ ออกซิเจนในกระบวนการย้อม สารเคมีที่ใช้สำหรับการขยายตัวจะใช้กับเส้นใย โพลีเอสเตอร์ เพื่อที่จะช่วยให้เส้นใยดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้น

สารช่วยย้อมแบ่งออกเป็น 7 ประเภท

- (1) กรดใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีน และไนลอน เมื่อใช้ย้อมสีแอซิด
- (2) ด่างใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีอะโซ แร็ด และกำมะถัน
- (3) เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมแอซิดและการย้อมเส้นใยเซลลูโลส
- (4) สารช่วยให้สีสม่ำเสมอใช้กับสีแรด
- (5) สารนำ (Carrier) ใช้เมื่อย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- (6) สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
- (7) สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิด เพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปใน

เส้นใย

### 2.1.3 อุณหภูมิในการย้อมสี

ในแต่ละระบบการย้อมสีก็จะมีลักษณะแตกต่างเฉพาะแบบกันออกไป การย้อมที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยให้การย้อมสีติดมากขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้สีย้อมกระจายหรือซึมผ่านได้ดีขึ้น

### 2.1.4 น้ำย้อม/พื้นผิวสัมผัส

ลักษณะและอัตราการหมุนเวียนของของเหลว เช่น ในเครื่อง Jet เครื่อง Beam หรือ Package จะทำหน้าที่ควบคุมความสม่ำเสมอของสีย้อมให้คงที่

### 2.1.5 วิธีการต่างๆ และเทคนิคในการย้อมสี

วิธีการและเทคนิคบางอย่างที่ทำให้สีย้อมติดแน่นบนเส้นใยอย่างถาวร แต่ละวิธีจะมีลักษณะเฉพาะของตัวเอง เช่น Mordanting, Vatting และ After-Treatments เป็นต้น

### 2.1.6 อัตราส่วนของเหลว

อัตราส่วนของเหลวที่ใช้ในขณะย้อมสี มีผลกระทบอย่างมากต่อการใช้สีทุกชนิด อัตราส่วนของเหลวถูกกำหนดโดยชนิดของเครื่องที่ใช้ การใช้อัตราส่วนของเหลวในอัตราที่ต่ำจะทำให้ปริมาณการใช้สีรีแอคทีฟเป็นไปอย่างประหยัด ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในอ่างย้อม

## 3. น้ำเสียและมลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

### 3.1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

หากคิดปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตสิ่งทอแล้ว จะพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วในการผลิตน้ำหนัก 1 ปอนด์ จะใช้น้ำในกระบวนการ 20 แกลลอน หรือ ผ้า 1 กิโลกรัม จะใช้น้ำ 167 ลิตร ส่วนปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นคำนวณในแง่ของการใช้น้ำแต่ละกระบวนการและการผลิตภัณฑ์สิ่งทอ นอกจากปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการแล้ว ยังมีการใช้สารเคมีต่างๆ มากมาย เช่น สีย้อม สีพิมพ์

เกลือ สารช่วยข้อม/พิมพ์ เป็นต้น ส่วนที่เหลืออยู่จากกระบวนการผลิตก็จะกลายเป็นมลพิษในน้ำ ซึ่งต้องทำการบำบัดต่อไป

### 3.2 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

น้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อมมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้

3.2.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกข้อม พิมพ์ และ ตกแต่งเสร็จ น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการ จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- (1) น้ำที่ใช้ในการฟอกข้อม น้ำในส่วนนี้จะมีค่าความเข้มข้นของสีสูง
- (2) น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกข้อม โดยน้ำในส่วนนี้จะมีค่าความเข้มข้นของสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

3.2.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ในกระบวนการฟอกข้อมจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำที่ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำ จะได้ น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำข้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำข้อมและถูกรวมเป็นน้ำเสีย

3.2.3 น้ำหล่อเย็น ในกระบวนการข้อมบางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำข้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น และส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

3.2.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน

### 3.3 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อม

น้ำเสียจากโรงงานฟอกข้อมจะมีลักษณะ ดังต่อไปนี้

3.3.1 มีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่า BOD และ COD สูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง รวมถึงไขมัน และตัวทำละลายต่างๆ

3.3.2 มีความเป็นด่างสูง สารที่ทำให้น้ำมีความเป็นด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

3.3.3 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ (Dissolved Solid) สูง ปริมาณของของแข็งที่ละลายน้ำมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ

3.3.4 มีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า

3.3.5 มีโลหะหนักเจือปน โลหะหนักนี้จะมาจากสีที่ใช้ในการย้อมผ้า โดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะพวกทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี

3.3.6 มีปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในปริมาณมาก

### 3.4 ความเป็นพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (นันทยา, 2537)

สารเคมีและสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมียู่มากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีความเป็นพิษและทำให้เกิดมลพิษที่แตกต่างกันไป ในช่วงที่ผ่านมาได้มีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติความเป็นพิษ มลพิษของสีย้อม และสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไว้มากมาย ทำให้ทราบสมบัติความเป็นพิษของสารที่ใช้

#### 3.4.1 การตรวจวัดความเป็นพิษของสาร

ความเป็นพิษของสาร คือ อันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับมนุษย์ หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ เมื่อสัมผัสกับสารนั้น โดยมนุษย์จะได้รับอันตรายจากสารพิษ 3 ทาง คือ

(1) โดยการสูดดมเข้าไปทางจมูก ในกรณีที่สารนั้นเป็นก๊าซหรือสารระเหย

(2) โดยการสัมผัสทางผิวหนัง

(3) โดยการบริโภค

โดยปกติการตรวจวัดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น 3 ทางข้างต้น นิยมใช้หนูเป็นสัตว์ทดลอง และได้มีการกำหนดหน่วยวัดที่นิยมใช้กันมากมีดังนี้

### 3.4.2 ค่าทีแอลวี (TLV)

ค่าทีแอลวี ย่อมาจาก Threshold Limit Value หมายถึงสารที่อาจเกิดจากการสูดดมเข้าไปทางจมูก และมีความสำคัญโดยเฉพาะกับสารที่ระเหย หรือเป็นแก๊สในบรรยากาศปกติ สารที่มีค่าทีแอลวีต่ำจะมีความเป็นพิษสูง ตัวอย่างค่าทีแอลวีของสารเคมีบางตัว แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าทีแอลวีของสาร

| ตัวอย่างสาร      | ค่าทีแอลวี (ส่วนในล้านส่วน) |
|------------------|-----------------------------|
| คาร์บอนมอนอกไซด์ | 50                          |
| แอมโมเนีย        | 25                          |
| เบนซีน           | 10                          |
| ฟอร์มาลดีไฮด์    | 2                           |
| กรดซัลฟูริก      | 1                           |
| คลอรีน           | 1                           |

ที่มา: นันทยา (2537)

### 3.4.3 ค่าแอลดี 50 (LD<sub>50</sub>)

ค่าแอลดี 50 ย่อมาจาก Lethal Dose หมายถึง ปริมาณสารที่ให้กับหนูทดลองแล้ว ทำให้หนูที่ถูกทดลองตายไป 50% ของจำนวนหนูทดลองที่ใช้ทั้งหมด หน่วยวัดนี้สามารถใช้ประเมินความเป็นพิษของสาร หากมีการบริโภคเข้าไป สารที่มีค่าแอลดี 50 ต่ำจะแสดงความเป็นพิษสูง

ตารางที่ 3 ความเป็นพิษของสารที่ค่าแอลดี 50 ต่างๆ

| ระดับ<br>ความเป็นพิษ | ความเป็นพิษ     | ค่าแอลดี 50<br>(มก./กก.) | ปริมาณที่จะเป็น<br>อันตราย/คน |
|----------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1                    | ต่ำมาก          | >15,000                  | > 1,000 กรัม                  |
| 2                    | ต่ำ             | 5,000 - 1,500            | 350 - 1,000 กรัม              |
| 3                    | ปานกลาง         | 1,000 - 1,500            | 35 - 350 กรัม                 |
| 4                    | สูง             | 300 - 1,000              | 3.5 - 35 กรัม                 |
| 5                    | สูงมาก          | 50 - 300                 | 0.35 - 3.5 กรัม               |
| 6                    | สูงมากเป็นพิเศษ | > 250                    | 0.35 กรัม                     |

ที่มา: นันทยา (2537)

#### 3.4.4 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารเคมีที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่ได้มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศ ไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมและพิมพ์ผ้ามีอันตราย ตายหรือเจ็บป่วยสูงกว่าอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทางดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างค่าแอลดี 50 ของสีย้อมแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 แสดงค่าแอลดี 50 ของสีย้อมเปรียบเทียบกับไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษร้ายแรง

| สารตัวอย่าง  | ค่าแอลดี 50 (มก. /กก.) |
|--------------|------------------------|
| สีย้อม < 1%  | >5,000                 |
| สีย้อม < 10% | 2,000 - 5,000          |
| สีย้อม < 82% | >250                   |
| ไซยาไนด์     | 15                     |

ที่มา: นันทยา (2537)

### 3.5 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม มีดังนี้

3.5.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ (Toxic to Stream Life) น้ำเสียจากน้ำย้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบอะนีนีน เป็นต้น

3.5.2 การลดของออกซิเจนในแหล่งน้ำ (Oxygen Depletion in Stream Water) น้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภท

3.5.3 ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง (Physical Impairment of Stream Condition) น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้สภาพลำน้ำไม่น่าดู นอกจากนี้สีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น

## 4. การกำจัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น สิ่งเจือปนในน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมเนื่องจากการย้อมผ้า นั้น ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมี ซึ่งส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตและถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ แม้จะมีการโต้เถียงว่าสีย้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่ก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ดังนั้นน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนจะถูกปล่อยออกนอกโรงงานจะต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่างๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อนวิธีการต่างๆ ในการกำจัดสีในน้ำทิ้งที่ใช้อยู่ ในปัจจุบันมี 5 ประเภทหลัก ดังตารางที่ 5 และสีแต่ละประเภทก็มีวิธีการกำจัดที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 6 วิธีการกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีย้อมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 5 แสดงเทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดสี

| Process                                                | Color Removal | Capacity | Speed  | Cost                 | Treatment                              |
|--------------------------------------------------------|---------------|----------|--------|----------------------|----------------------------------------|
| 1. Chemical Coagulation                                | Good          | Large    | Good   | Large                | Solid Removal<br>Nitrification         |
| 2. Activated Charcoal                                  | Very Good     | Small    | Slow   | High                 | Regeneration                           |
| 3. Ozone Treatment                                     | Good          | Large    | Medium | High                 | By Product                             |
| 4. Membran Technology                                  | Good          | Large    | Fast   | High                 | Dyestuff of<br>Dyes in<br>wastewater   |
| 5. New Technology (Electrolysis/ Inorganic Adsorption) | Good          | Large    | Fast   | Medium<br>Or<br>Fast | Adsorption of<br>Dyes in<br>Wastewater |

ที่มา: นิรนาม (2536)

ตารางที่ 6 แสดงวิธีกำจัดสีในน้ำทิ้งสำหรับสีย้อมประเภทต่างๆ (นันทยา, 2537)

| Dye Type | Solu-Bility | Coag-ulation<br>Alum | Acti-vated<br>Carbon | Bio-logical | Physico-chemical<br>Biological | Ozone | Sludge<br>Adsorp-Tion |
|----------|-------------|----------------------|----------------------|-------------|--------------------------------|-------|-----------------------|
| Acid     | √           | ×                    | √                    | ×           | √                              | √     | ×                     |
| Basic    | √           | ×                    | √√                   | √           | √                              | √     | √                     |
| Direct   | √           | -                    |                      | -           | √                              |       | √                     |
| Reactive | √           | ×                    | √                    | ×           | √                              | √√    | ×                     |
| Vat      | ×           | √                    | ×                    | ×           | √                              | √     | -                     |
| Sulphur  | ×           | √                    | ×                    | ×           | √                              | √     | -                     |
| Disperse | ×           | √                    | ×                    | ×           | √                              | √     | ×                     |

√√ = ให้ผลดีมาก    √ = ให้ผลดี    × = ใช้ไม่ได้

## 5. กระบวนการดูดซับ

(นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำทิ้ง การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่เข้าสู่สถานะสมดุลภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการเข้าสู่สถานะสมดุลกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ (โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับหรือระหว่างหน้าเข้าสู่สถานะสมดุล (Interface) กัน เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็งและพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับนี้มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้าน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

## 5.1 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในกระบวนการดูดซับ

### 5.1.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

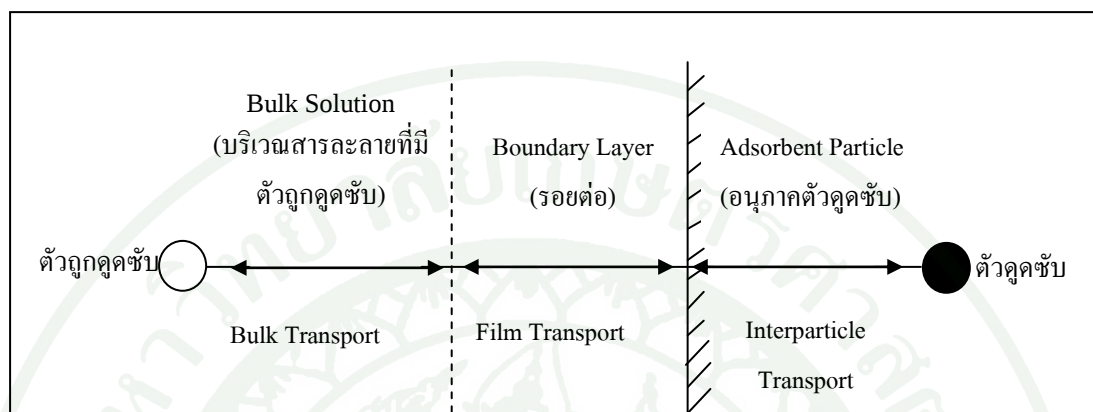
- 1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ
- 2) การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
- 3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

### 5.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

- 1) การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวเข้าสู่สภาวะสมดุลน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ
- 2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในชั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

## 5.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

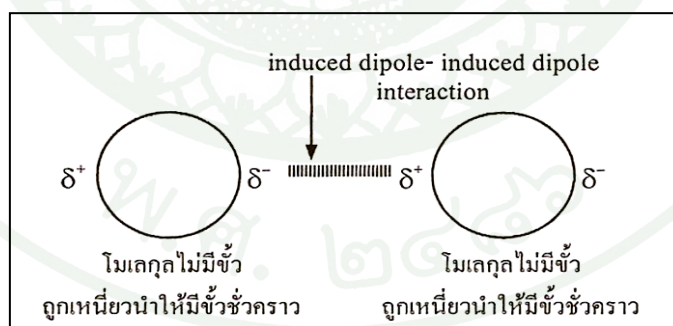
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (Physical Force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (Chemical Force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

### 5.2.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภทดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่ง เรียกว่า แรงลอนดอน (London Force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (Induced Dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้น จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

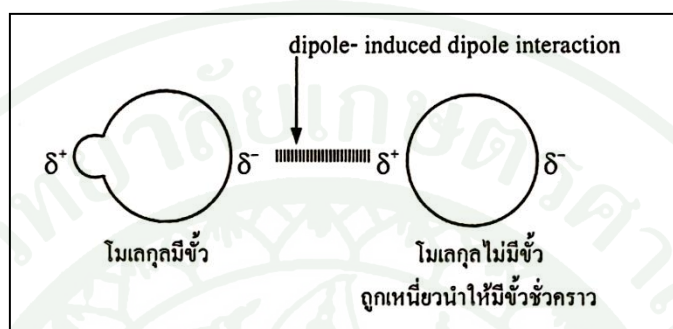
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่าถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อนอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

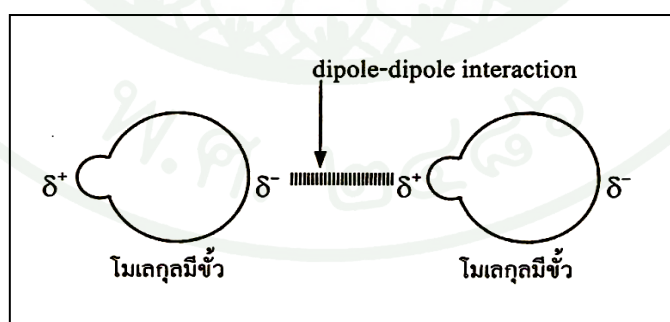
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Dipole-Induced Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Attraction) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจน กับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะมีสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจะเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ  $\text{Cl-Cl}$  ในโมเลกุลของคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01 – 0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้น การดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือเกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (Desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างถูกดูดซับและตัวดูดซับ

### 5.2.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันโดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

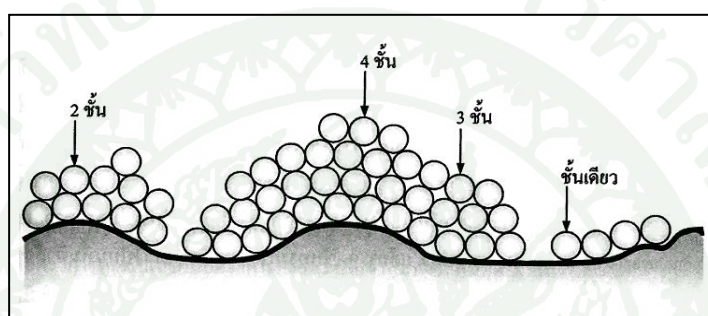
การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible Process) จึงไม่เกิดการคาย

## 5.3 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

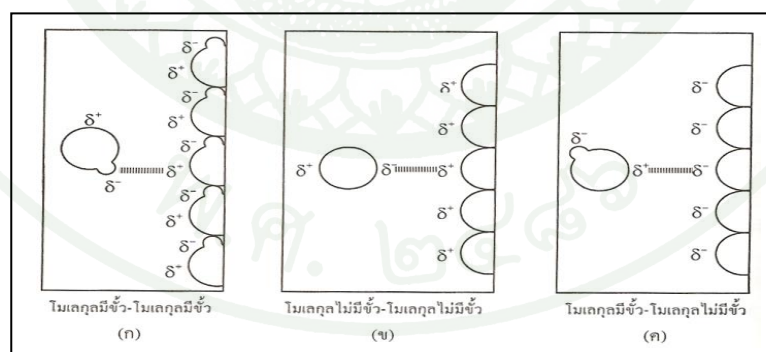
5.3.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption or Physical Adsorption or Van Der Waals Adsorption)

เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวถูกละล จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่นแรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกละลและตัวถูกละล โดยที่โมเลกุลของตัวถูกละลเกาะอยู่บนผิวตัวถูกละลในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกละลจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 5 การดูดซับของตัวถูกละลบนพื้นผิวตัวถูกละลแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 6 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

## ภาพที่ 6 (ต่อ)

หมายเหตุ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

(ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

(ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้วและ โมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

### 5.3.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียวและเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ ประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ

## 5.4 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีจำกัด

2) ถ่านแกมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

3) สารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

4) วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลื้อย เปลือกกุ้ง (นำมาทำเป็นไคโตซาน) กากกาแฟที่ใช้แล้ว กากชาที่ใช้แล้ว กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ ถ่านจากการเผาต้นพุทธรักษา ต้นรูปฤๅษี ช้างข้าวโพด ต้นยางพารา ต้นกกกล่ม และเถาเถาวัลย์ เป็นต้น

5) สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรียยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

## 5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1) อัตราการเขย่า เพื่อให้มีการดูดติดผิวอาจขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านฟิล์ม หรือการแพร่เข้าสู่โพรง ถ้าอัตราการเขย่าต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในตรงกันข้าม อัตราการเขย่าสูง จะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดติดผิวได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิว

2) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ สารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวได้มากกว่าสารดูดติดผิวที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูด

ติดผิว เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

3) ขนาดและลักษณะของสารดูดติดผิว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของสารดูดติดผิว เช่น คาร์บอน การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างสารดูดติดผิวและสารดูดติดผิวจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดติดผิว นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

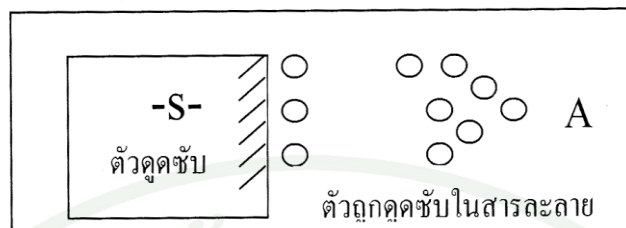
4) ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดติดผิว ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดติดผิวเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดติดผิวในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวตัวดูดติดผิวจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะ สามารถดูดติดผิวได้ดี

5) พิเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดติดผิวด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของสารดูดติดผิวได้ดี

6) อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลงที่อุณหภูมิสูงและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เพราะการดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบกระบวนการคายความร้อน

7) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

## 5.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

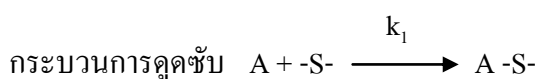
เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น Co ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ ภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น Co โมลต่อลิตรในสารละลาย

S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

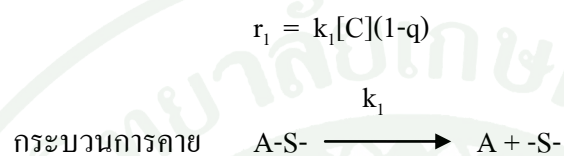
q เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



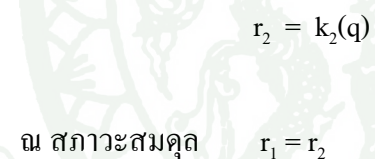
$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลายให้เท่ากับ  $C$  และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ



$r_2$  แทนอัตราการคายซับ ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย 1



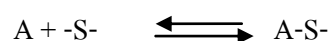
$$r_2 = k_2(q)$$

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

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

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

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล

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

$q$  = เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ  
หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมลต่อกิโลกรัม ( $\text{mol.kg}^{-1}$ )  
หรือ โมลต่อกรัม ( $\text{mol.g}^{-1}$ )

$W$  = เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กรัม หรือกิโลกรัม

$V$  = เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร  
( $\text{cm}^3$ ) หรือลูกบาศก์เดซิเมตร ( $\text{dm}^3$ )

$C$  = เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความ  
เข้มข้น เช่น โมลต่อลิตร

$q$  อาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

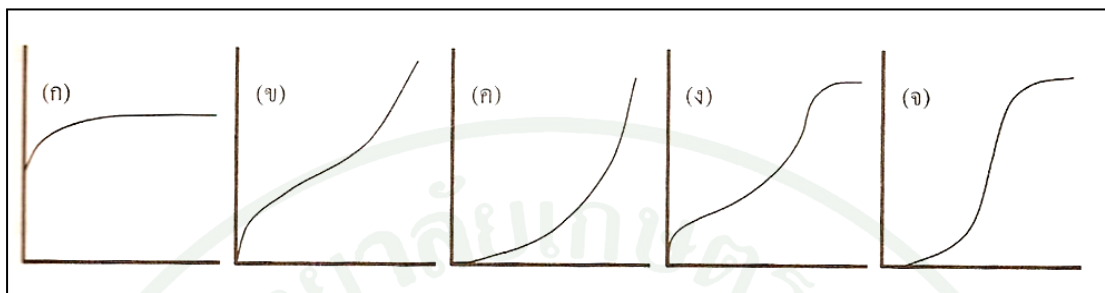
ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \dots\dots\dots(3)$$

## 5.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงอิทธิพลปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว  
ตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ( $C$ )  
ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550) อ้างโดย Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

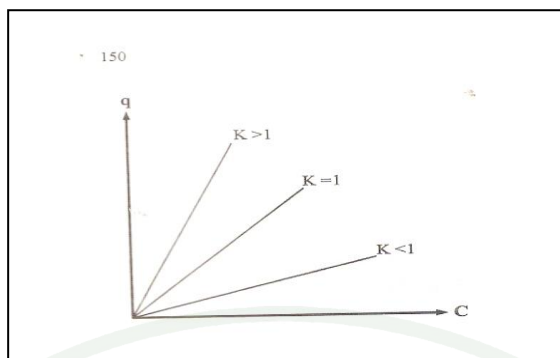
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ในที่นี่จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

5.7.1 สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear Equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และค่า  $C$  ตามสมการ

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

จะได้  $q = KC$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแรงแบบแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

$K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

5.7.2 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finalay Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

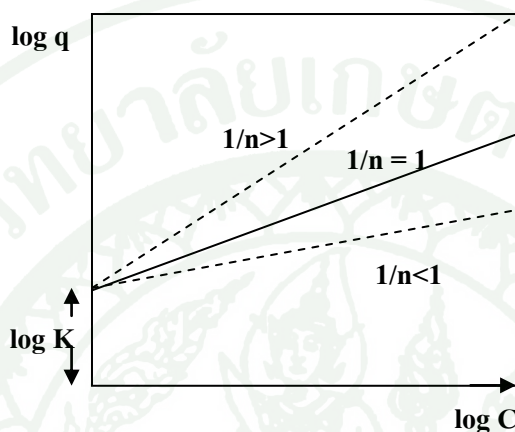
$$q = KC^{1/n} \dots\dots\dots(4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง  $K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป  $n$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

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



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช

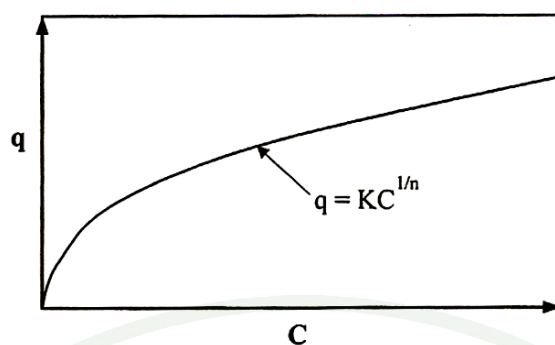
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

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

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

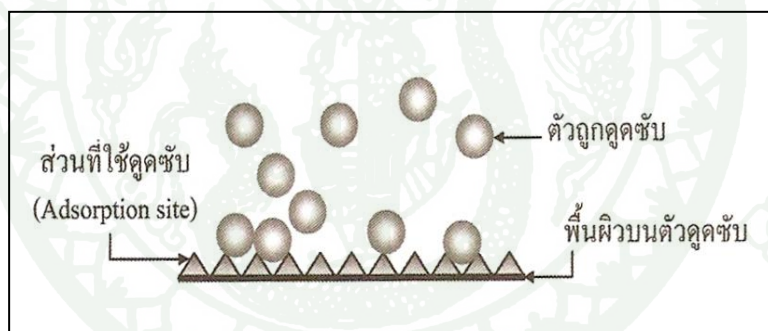
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (4) ดังภาพที่ 10 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

5.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932

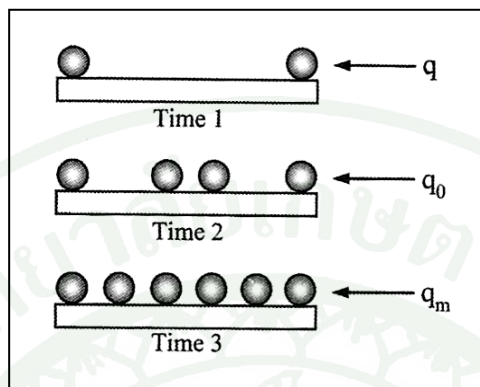


ภาพที่ 12 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ

พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ  $q_m$

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ดังนั้น สมการที่ (1) จึงมีรูปแบบดังนี้

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

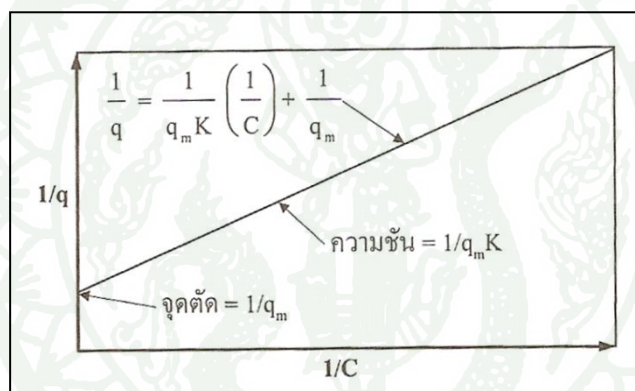
$q_m$  คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

5.7.4 สมการการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่าน ในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (multi-layer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

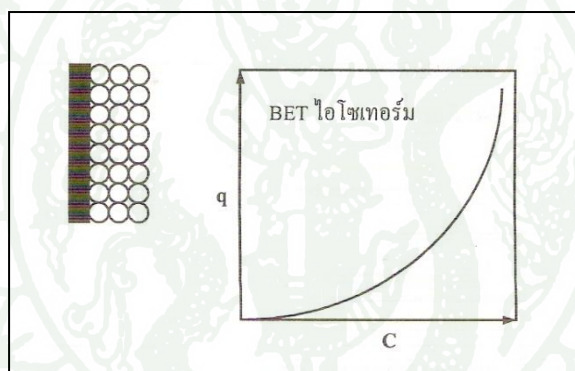
3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m K C}{(C_0 - C)[1 + (K-1)C/C_0]} \dots\dots\dots(8)$$

กราฟที่เขียนระหว่าง  $q$  กับ  $C$  เป็นดังนี้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

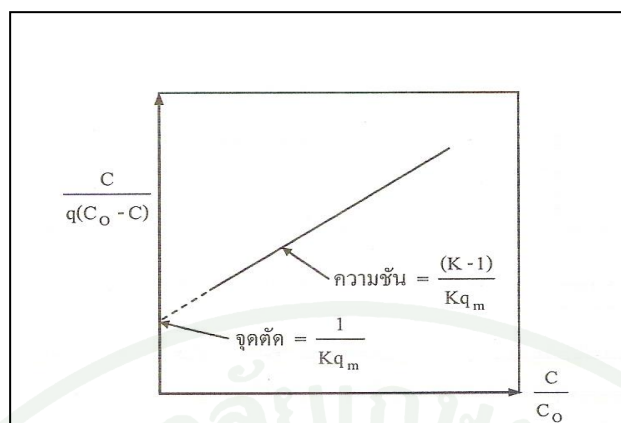
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{(K-1)}{q_m K} \left( \frac{C}{C_0} \right) \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $\frac{C}{q(C_0 - C)}$  กับค่า  $\frac{C}{C_0}$  จะได้กราฟเส้นตรง

มีความชันเท่ากับ  $\frac{(K-1)}{Kq_m}$  และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

จากที่กล่าวมาทั้งหมด พอสรุปได้ว่า สมดุลการดูดซับเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ ที่สภาวะสมดุลอิทธิพลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับจะอธิบายด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งจะบอกด้วยอัตราส่วนปริมาณของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง

## 6. สารดูดซับ

Kroschwitz (1990) สารดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมักเป็นของแข็งที่มีพื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก โดยที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ของรูพรุนในอนุภาค สารดูดซับแบ่งเป็นหลายประเภท ดังนี้

### 6.1 สารอนินทรีย์

เป็นสารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์ อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากอย่างไรก็ตามอาจมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก เช่น ดินเหนียวต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดุก และ แอคติเวทเตดซิลิกา เป็นต้น

## 6.2 ถ่านกัมมันต์

เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตร/กรัม โดยอาจจัดถ่านกัมมันต์ให้อยู่ในจำพวกสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้

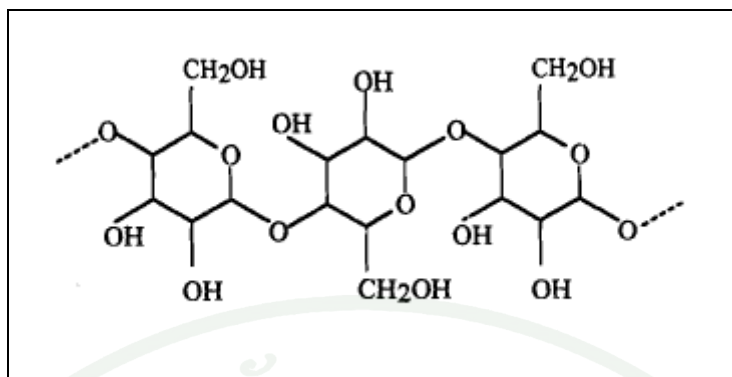
## 6.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์

ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมา เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ (มักเรียกว่า Macroporous Resin) สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์) แต่อย่างไรก็ตามเรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือสามารถรีเจนเนอเรตได้ง่ายกว่ามาก และรีเจนเนอเรนต์มักเป็นสารราคาถูก เช่น เกลือแกง

## 7. เซลลูโลส

### 7.1 ลักษณะทั่วไปของเซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_6)_n$  เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยพบร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แทนนิน ไบมัน สารที่ทำให้เกิดสีเป็นต้น เซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล ถึง 3 หมู่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสจึงมีมากและโครงสร้างของเซลลูโลสยังจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงมาก อุณหภูมิการหลอมตัวจึงสูงมาก มักจะเกิดการสลายตัวก่อนถึงอุณหภูมิหลอมตัว และมีความสามารถในการละลายต่ำเซลลูโลสธรรมชาติจะมีน้ำหนักรวมโมเลกุลเฉลี่ยต่างกัน การกระจายน้ำหนักรวมโมเลกุลของเซลลูโลสมีความสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพ ส่วนที่มีน้ำหนักรวมโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพไม่ดีในทางอุตสาหกรรมจะหาน้ำหนักรวมโมเลกุล โดยประมาณได้โดยการวัดความหนืด



ภาพที่ 17 โครงสร้างของเซลลูโลส

## 7.2 สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

7.2.1 การละลาย เซลลูโลสไม่ละลายน้ำแต่จะสลายในกรดเข้มข้น เช่น กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เป็นต้น โดยเซลลูโลสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดที่อุณหภูมิห้อง แต่จะหยุดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำเซลลูโลสบวมตัวในสารละลายเกลือเข้มข้นบางชนิด เช่น สารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) บางครั้งทำให้เซลลูโลส มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถละลายได้

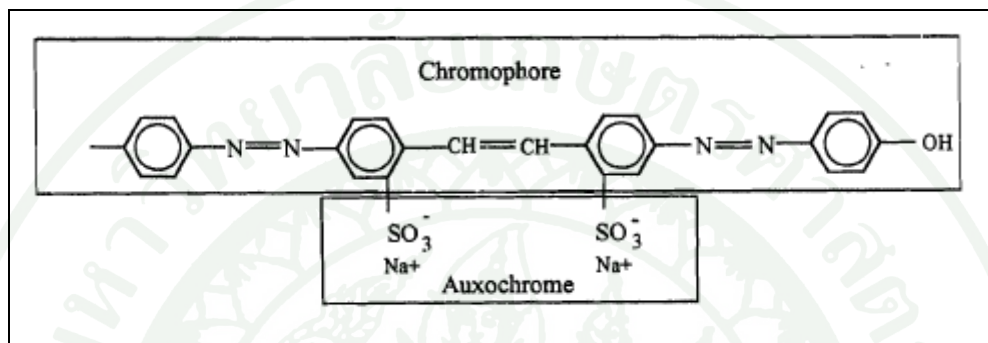
7.2.2 ความหนืด เป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลส โดยถ้าเราเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลส ความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น

7.2.3 การดูดซับความชื้น เซลลูโลสส่วนใหญ่จะมีการดูดซับหรือคายไอน้ำหรือของเหลวอื่น ๆ ในบรรยากาศรอบตัวของมันจนกระทั่งถึงจุดสมดุล โดยสมดุลของความชื้นของเซลลูโลสจะแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศนั้น ปริมาณความชื้นของเซลลูโลสมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพบางประการ เช่น เกิดความชื้นสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

7.2.4 ค่าความหนาแน่นของเซลลูโลส เซลลูโลสเป็นเส้นใยเดี่ยวจะไม่มีค่าความหนาแน่นที่แน่นอน ค่าความหนาแน่นจะแปรเปลี่ยนไปตามแหล่งที่มาหรืออาจเปลี่ยนไปเนื่องจากการปรับปรุงทางเคมี

### 7.3 กลไกการดูดซับสีของเซลลูโลส (Joseph, M.L. 1986)

โครงสร้างของสีแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ Chromophore ซึ่งเป็นส่วนของตัวสี และ Auxochrome ซึ่งเป็นส่วนที่มีประจุ มีหน้าที่ในการเข้าทำปฏิกิริยาขิดเกาะกับเส้นใยต่างๆ ดังภาพ



ภาพที่ 18 ตัวอย่างส่วนประกอบของสี (Direct Yellow 4)

การย้อมจะเกิดขึ้นเมื่อประจุของสีและเส้นใยต่างๆ ถ้าสีมีประจุเดียวกันกับเส้นใยจะไม่เกิดการย้อม เพราะประจุที่เหมือนกันของสีและเส้นใยจะผลักกันทำให้การย้อมจะไม่ติดสี เซลลูโลส ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีประจุลบจึงสามารถย้อมติดสีที่มีประจุบวกได้ดี แต่ถ้าต้องการให้สามารถย้อมติดสีที่มีประจุลบ ทำได้โดยการย้อมที่ pH ต่ำๆ

### 7.4 ประโยชน์ของเซลลูโลส

เซลลูโลส มีความสำคัญทางด้านอุตสาหกรรมมาก เช่น ใช้ทำเครื่องนุ่งห่ม (จากฝ้าย และลินิน) ทำกระดาษ ทำพลาสติก ฯลฯ เนื่องจากเซลลูโลสทำจากวัตถุดิบที่หาได้ง่าย ทำให้ผลผลิตราคาถูก กระบวนการผลิตเซลลูโลส ทำได้โดยการนำไม้ไปบดและกลั่นด้วยไอน้ำ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์บางอย่างที่เหลือส่วนใหญ่เป็นลิกนิน ซึ่งสามารถกำจัดออกโดยวิธีทางเคมีผลที่ได้เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์เซลลูโลสไนเตรด (Cellulose nitrate) ได้มาจากการทำไนเตรชัน มีสมบัติคล้ายพลาสติกใช้ทำฟิล์มถ่ายภาพ ทำของเด็กเล่น แต่มีข้อเสียที่ติดไฟง่ายและเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์

## 8. ผักตบชวา

### 8.1 ลักษณะทั่วไป

ผักตบชวา (Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Soloms) เป็นพืชน้ำซึ่งจัดเป็นพืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในวงศ์ Pontederiaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ พบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2367 โดย Karl Von Matius และมีการขยายพันธุ์ไปประเทศในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยมีการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปี พ.ศ. 2444 เป็นวัชพืชที่ร้ายแรงในแหล่งน้ำทั่วไป ก่อให้เกิดปัญหาตามมาในด้านการกำจัดรวมถึงประเทศไทยด้วย

### 8.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชน้ำล้มลุก ประกอบด้วยลำต้นที่มีหัวราก (Rhizomatous system) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 เซนติเมตร และยาวประมาณ 30 เซนติเมตร ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลมพองออก ภายในมีเนื้อพองคล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องพยุงให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10-90 เซนติเมตร มีไหลซึ่งเกิดตามข้อใบแล้วเจริญเป็นต้นอ่อนที่ปลายไหล ถ้าต้นตื้นก็จะหยั่งรากลงดิน และมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอก

ผักตบชวาจัดเป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (Vegetative propagation) และแบบใช้เพศ (sexual reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่า ทุกระยะเวลา 62 วัน หรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้น เป็น 6 แสนต้น ภายในเวลา 8 เดือน สำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (self pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น

### 8.3 แหล่งที่พบ

ผักตบชวาสามารถอยู่ได้ทุกสภาพน้ำ ทั้งในน้ำสกปรกและน้ำสะอาด เจริญเติบโตได้ดีที่ พีเอช 4-10 และอุณหภูมิของน้ำไม่สูงกว่า 34 °C และในดินพีชจะมีน้ำเฉลี่ยประมาณร้อยละ 95 ประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 89 และในก้านใบร้อยละ 96 (เปล่งศักดิ์, 2546) ซึ่งในปัจจุบันพบว่ามีการแพร่กระจายของผักตบชวาอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่างๆ ในหลายจังหวัดทั่วประเทศ

#### 8.4 คุณสมบัติของเส้นใยผักตบชวา

โครงสร้างลำต้นผักตบชวาส่วนใหญ่มีความพรุนคล้ายฟองน้ำ ดังนั้นผักตบชวาจึงมีความสามารถในการดูดความชื้นในอากาศได้ดีและดูดซึมน้ำได้สูง (ดังตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทางกายภาพและกลศาสตร์ของเส้นใยผักตบชวา

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

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

#### 8.5 องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กิโลกรัม หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กิโลกรัม คิดเป็นกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า ผักตบชวา ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุต่างๆ (แสดงดังตาราง 8)

ตารางที่ 8 องค์ประกอบของผักตบชวาแห้ง

| 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            |

## ตารางที่ 8 (ต่อ)

ที่มา: จิระศักดิ์ และคณะ (2543)

### 8.6 การกำจัดผักตบชวา

เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่โตเร็วจึงก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ต่อแหล่งน้ำ ปัจจุบันจึงมีการดำเนินการควบคุมได้ 3 วิธีการหลักคือ

1) การใช้สารเคมี สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด เช่น dalapon diquat และ paraquat เป็นต้น เป็นวิธีที่ให้ผลรวดเร็วแต่ก่อให้เกิดปัญหาทางมลภาวะ โดยสารเคมีสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำ ตลอดจนการนำไปใช้ด้านอื่นๆ

2) การใช้วิธีกล โดยการใช้แรงงานคน หรือเครื่องจักรกล วิธีนี้มีปัญหาคือสิ้นเปลืองแรงงานและเสียเวลามาก เหมาะสำหรับการใช้ในพื้นที่แคบๆ เท่านั้น

3) การใช้วิธีชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรีย รา ไวรัส และแมลง เป็นต้น แม้ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จถึงขั้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังต้องคำนึงถึงปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้วย

### 8.7 การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวา

การบำบัดน้ำทิ้งด้วยผักตบชวาเป็นวิธีที่อาศัยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

#### 1) ทำหน้าที่กรอง

ผักตบชวาที่ขึ้นหนาแน่นเปรียบได้กับการบรรจุวัสดุพูนในกรวยกรองน้ำที่ไหลผ่านผักตบชวอย่างช้าๆ ทำให้ของแข็งแขวนลอยต่างๆ ที่ปนอยู่ในน้ำถูกสกัดกั้น และระบบรากผักตบชวาที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด

## 2) คู่มือการไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

สารอาหารที่พืชต้องการ ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ผักตบชวามีความต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเช่นเดียวกัน และการกินอาหารของผักตบชวาจะใช้รากดูดสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำลำเลียงไปยังใบ เพื่อการสังเคราะห์แสง ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำที่จัดเป็นมลสารที่ต้องกำจัดให้หมดไป การดูดกินอาหารในน้ำของผักตบชวาจึงเป็นการลดมลพิษดังกล่าวให้น้อยลง

อย่างไรก็ตามไนโตรเจนในน้ำที่ส่วนมากจะอยู่ในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารอินทรีย์ไนโตรเจน (organic-N) แอมโมเนียมไนโตรเจน ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) และไนเตรตไนโตรเจน ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) ซึ่งผักตบชวาสามารถดูดสารอินทรีย์ไนโตรเจนได้สูงกว่าไนโตรเจนรูปอื่น คือประมาณร้อยละ 95 ในขณะที่มลสารไนเตรตไนโตรเจน และแอมโมเนียมไนโตรเจนจะลดลงประมาณร้อยละ 80 และ 77 ตามลำดับ แต่การใช้ผักตบชวาบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงจะส่งผลให้ผักตบชวาเจริญเร็วขึ้นและปกคลุมพื้นที่ผิวน้ำมากขึ้น จึงควรมีการดูแลระบบเก็บต้นที่เจริญเต็มที่ขึ้นจากน้ำอย่างสม่ำเสมอ ไม่เช่นนั้นเมื่อผักตบชวาทายจะเน่าอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำเสียมีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นอีก (จักริน และธรรมบุญ, 2543)

## 3) การลดมลสารอื่น

นอกจากไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้วผักตบชวาสามารถลดมลสารอื่นๆ ได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ความสามารถในการลดมลสารของผักตบชวา

| มลสาร      | ปริมาณการลดมลสาร (กรัม/ตารางเมตร/วัน) |
|------------|---------------------------------------|
| คาร์บอน    | 28.0                                  |
| โพแทสเซียม | 2.0                                   |
| แคลเซียม   | 1.0                                   |
| แมกนีเซียม | 0.2                                   |
| โซเดียม    | 2.0                                   |

#### 4) ลดมลสารโดยจุลินทรีย์ที่ผักตบชวา

แบคทีเรียที่เกาะอยู่ที่รากของผักตบชวาชชนิดหนึ่งคือ *Azospirillum* spp. จัดเป็นแบคทีเรียแกรมลบชนิดต้องการออกซิเจน และมีคุณสมบัติพิเศษสามารถตรึงไนโตรเจนคุณสมบัติดังกล่าวมีส่วนในการลดมลสารไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น

#### 5) การดูดโลหะหนัก

มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของผักตบชวาในการดึงโลหะหนักจากน้ำทิ้งปรากฏว่า ผักตบชวาสามารถกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว นิกเกิล เงิน โคบอลต์ สตรอนเตียม และฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ยังดูดสารพิษ เช่น ยาฆ่าแมลงได้อีกด้วย (จักริน และธรรมบุญ, 2543)

### 9. กกกลม

#### 9.1 ลักษณะทั่วไป

กกกลม หรือกกจันทบูร มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cyperus corymbosus* Rottb. ชื่อสามัญคือ Sedge จัดอยู่ในวงศ์ CYPERACEAE ส่วนใหญ่พบขึ้นได้โดยทั่วไปตามที่ชุ่มชื้นและและหนองบึง ตลอดจนดินเลนตามชายทะเล กกเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีอายุได้หลายปี

#### 9.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ลำต้นใต้ดิน มีลักษณะเป็นแงสั้นๆ หรือเหง้า คล้ายเหง้าขิงสีน้ำตาลดำ เรียกว่า rhizome ลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็กสีน้ำตาล ซึ่งมีความยาวตามชนิดของกก เรียกว่า stolon บางครั้งลำต้นส่วนนี้จะบวมโตขึ้นเป็นที่สะสมอาหารแต่ขยายพันธุ์ไม่ได้ ลำต้นที่เป็นก้านยาว สีเขียว ชูขึ้นไปในอากาศ เรียกว่า arial stem บริเวณปลายสุดเป็นจุดที่ให้กำเนิดดอก ด้านหน้าตัดขวางของลำต้นส่วนนี้จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมกลม หรือเกือบกลม เช่น กกลังคามีรูปร่างกลม กกสามเหลี่ยมใหญ่มีรูปร่างสามเหลี่ยม เป็นต้น ใบลักษณะเป็นแผ่นเล็กๆ มีรูปร่างต่างๆ กัน และมีจำนวนใบเพียงเล็กน้อยอยู่ติดกับปลายกาบหุ้มใบ (leaf sheath) ซึ่งห่อหุ้มส่วนของลำต้นสีเขียวอยู่ ดอกของกกมีทั้งดอกสมบูรณ์เพศ และ

ไม่สมบูรณ์เพศ แต่ส่วนใหญ่เป็นดอกสมบูรณ์เพศ เกสรตัวผู้มีตั้งแต่ 1 ถึง 6 อัน โดยมากจะมี 3 อัน เกสรตัวเมียมี 1 อัน ยอดเกสรตัวเมียแยกออกเป็น 2 ถึง 3 แฉก

กกกกลมมีลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆ กับดอกเท่านั้นที่เป็นสามเหลี่ยมลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1 ถึง 2 เมตร ดอกมีขนาดเล็กเป็นฝอยอยู่รวมกันเป็นช่อดอก เมื่อยังอ่อนมีสีเขียวอ่อนพออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ใบประดับของช่อดอกเป็นแผ่นใบยาวเรียวสั้นกว่าความยาวของช่อดอก เป็นกนกที่ปลุกกันมานานทางภาคตะวันออก แถบจังหวัดจันทบุรี ตราด และระยอง แต่ปลุกกันมากที่จังหวัดจันทบุรี (สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2535)

### 9.3 การบำบัดน้ำทิ้งด้วยกกกกลม

ในปัจจุบันกกเป็นพืชที่ได้มีการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในลักษณะของพื้นที่ชุ่มชื้น และ เช่น ใช้ในโครงการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติ ตามแนวพระราชดำริ หนองหาร จังหวัดสกลนคร ร่วมกับพืชชนิดอื่นๆ ลักษณะ (2539) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกกกกลมเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ และในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน ได้ใช้ต้นอ้อ หรือต้นกกในการบำบัดน้ำเสียชุมชน และอุตสาหกรรม (สุจินต์, 2539) และ Buddhawong (1996) ทดลองใช้กกกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่จังหวัดสกลนคร จากการใช้กกกกลมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวพบว่าสามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี

## 10. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก้องเกียรติ (2543) ศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของผ้าชนิดแอซิกและเบสิกของสาลีธรรมชาติและสาลีที่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีให้อยู่ในรูปไซยาโนเอทิลเลต โดยนำสาลีไปทำปฏิกิริยา Cyanoethylation กับ Acrylonitrile ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CN}$ ) ในสถานะเบส เป็นการเติมหมู่  $\beta$ -Cyanoethyl ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CN}$ ) เข้าที่ตำแหน่งรีแอกทีฟไฮโดรเจนของเซลลูโลส (สาลี) โดยสามารถยืนยันโครงสร้างของหมู่  $\beta$ -Cyanoethyl จากความสามารถในการละลายในโพลิดีน และ IR Spectrum ของหมู่ไนไทรล์ ( $\text{C}\equiv\text{N}$ ) เมื่อศึกษาความสามารถ ความเร็ว และผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับสีของผ้า พบว่าทั้งสาลีธรรมชาติและสาลีในรูปไซยาโนเอทิลเลตสามารถดูดซับสีแอซิกทั้ง 2 สี (Telon Brown และ Skyblue B) ได้ดีเมื่อ pH ต่ำ และสีเบสิก Methylene Blue จะถูกดูดซับได้ดีเมื่อ pH สูง แต่ Auramine O ถูกดูดซับได้ดีที่ pH ประมาณ 5.5 สาลีธรรมชาติดูดซับสีของผ้าทั้ง 2

ชนิดได้เร็วกว่าสำลีในรูปไซยาโนเอทิลเลต และสีเบตติกถูกดูดซับได้เร็วกว่าสีแอตติก โดยเรียงลำดับความเร็วในการถูกดูดซับดังนี้ Auramine O > Methylene Blue > Skyblue B > Telon Brown

จินตนา (2550) ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาในการกำจัดสีย้อมไคเรกท์จากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ โดยใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีเพื่อปรับสภาพตัวดูดซับซึ่งตัวดูดซับที่ได้มีลักษณะเป็นผลและถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15% 20% 25% และตัวดูดซับที่ไม่ปรับสภาพ ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่า พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาการปั่นกววน เวลาการสัมผัส และความเข้มข้นสีย้อมไคเรกท์โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับเป็นไปตามกลไกสมการการดูดซับของฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผงตัวดูดซับจากผักตบชวาสามารถกำจัดสีย้อมไคเรกท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วินัย (2546) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงผักตบชวา (WH) เพื่อบำบัดสีย้อมผ้าชนิดไคเรกท์ 4 สี (Black 22, Blue 98, Blue 168 และ Red 23) และชนิดแอตติก (Blue 25) และ เบตติก (Blue 9) อย่างละ 1 สี ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด (AC) พบว่า ในช่วง 30 นาทีแรกโมเลกุลสีจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งปฏิกิริยาผันกลับอันดับหนึ่ง สามารถอธิบายการดูดซับระหว่าง AC และสีย้อมได้ดีกว่า ในขณะที่ปฏิกิริยาผันในช่วง 5 ถึง 9 และ 3 ถึง 11 ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีของ WH และ AC ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NaCl เป็น 5,000 มก/ล ความสามารถของทั้ง WH และ AC ในการดูดซับสี Black 22, Blue 168 และ Red 23 เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 12% WH สามารถดูดซับสีย้อมทุกสีได้ดีกว่า AC และลำดับความสามารถในการดูดซับสีของทั้ง WH และ AC เหมือนกัน จากสมการ Langmuir ลำดับความสามารถในการดูดซับสีของ WH คือ Blue 9 > Black 22 ~ Blue 168 > Red 23 > Blue 98 > Blue 25 ปฏิกิริยาการดูดซับสีระหว่าง WH-Blue 9 และ WH-Blue 25 เป็นชนิดคายความร้อน และดูดความร้อนตามลำดับ ในการบำบัดสี Blue 9, Blue 98 และ Blue 25 โดยใช้คอลัมน์ชั้นตรึง WH พบว่าการดูดซับสี Blue 9, Blue 25 และ Blue 98 เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำสีลดลง และความยาวของชั้น WH เพิ่มขึ้น สมการ Bed Depth Service Time สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการบำบัดและความยาวของชั้น WH ได้ดี

เปล่งศักดิ์ (2546) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดสีย้อมผ้าชนิดละลายน้ำด้วยเรซินผักตบชวาที่ปรับสภาพ การทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินที่เหมือนกันในทางการค้า 3 ชนิด ได้แก่ สีเอสิด สีไคเรกท์ และสีรีแอคทีฟ และใช้เรซินแบบต่างๆ ที่ปรับสภาพจาก

ผักตบชวาในรูปวัสดุบำบัดสีทั้งหมด ได้แก่ เรซินแบบกรดแก่ เรซินแบบด่างแก่ และเรซินแบบกรดอ่อน การบำบัดสีด้วยเรซินผักตบชวาศึกษาโดยใช้เทคนิคทางสเปกโตรโฟโตเมตริก พบว่า เรซินผักตบชวาแบบกรดแก่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์โทนสีน้ำเงินทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ร้อยละ 98.78, 96.70 และ 46.35 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ซีไอดี สารแขวนลอย และปริมาณสารละลายน้ำทั้งหมดของน้ำเสียข้อมผ้า มีค่าร้อยละ 52.66, 38.46, 54.28 และ 79.67 ตามลำดับ ค่าพีเอชหลังการบำบัดมีค่าลดลงจาก 7.1 เป็น 3.6 หลังการบำบัด ซึ่งคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินผักตบชวาแบบกรดแก่ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พบว่าคุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกพารามิเตอร์ ยกเว้น ค่าพีเอช ดังนั้นจึงต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วยสารละลายด่างหรือปูนขาวก่อนปล่อยทิ้งต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องยูวี วิซิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (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 ชุดการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง
- 1.9 เครื่องปั่นละเอียด
- 1.10 เครื่องแก้วต่างๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (ที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด)

## 2. สารเคมี

2.1 สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 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 และแต่ละชนิดมีค่าความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้มากที่สุดที่ความยาวคลื่น ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สีย้อม (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง 9 ชนิด

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

2.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)

2.3 สารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl)

### 3. วัสดุดูดซับ

3.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

3.2 ตัวดูดซับจากกกกล่ม

### 4. น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง ก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ



## วิธีการ

### 1. การเตรียมตัวดูดซับ

#### 1.1 วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

นำส่วนของลำต้นผักตบชวามาล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตากแดดให้แห้ง ต้มด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 15 นาที ตากแดดให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นจนละเอียด และร่อนด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดที่เท่ากัน

#### 1.2 วิธีการเตรียมตัวดูดซับจากกกกลม

นำต้นกกกลมมาล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตากแดดให้แห้ง ต้มด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 15 นาที ตากแดดให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปั่นด้วยเครื่องปั่นจนละเอียด และร่อนด้วยตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดที่เท่ากัน

### 2. การเตรียมสารละลาย

#### 2.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อม 9 ชนิด แต่ละชนิด เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ชั่งสีย้อมมาตรฐาน 9 ชนิด ชนิดละ 100 มิลลิกรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ชนิดละขวด เติมน้ำกลั่นจนครบปริมาตร 1 ลิตร

#### 2.2 สารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม

นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมแต่ละชนิด ที่ได้จากข้อ 2.1 ชนิดละ 1 ลิตร ผสมเข้าด้วยกัน

### 3. การวิเคราะห์ค่าดูดกลืนแสงของสีย้อมแต่ละชนิดในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม

นำสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม ที่ได้จากข้อ 2.2 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่แต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ดังตารางที่ 10

#### 4. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมโดยวิธีแบบแบดซ์

##### 4.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกลมเบื้องต้น

###### 4.1.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่เตรียมขึ้นจากข้อ 1.1 ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เขย่าด้วยความเร็วรอบ 100 รอบ/นาทิจ เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

###### 4.1.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลมที่เตรียมขึ้นจากข้อ 1.2 ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.1.1

##### 4.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช

###### 4.2.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ลงในขวดรูปชมพู่ 4 ใบ เติมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม (จากข้อ 2.2) ที่มีการปรับพีเอชเป็น 4, 5, 6 (พีเอชของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ไม่ปรับพีเอช) และ 8 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แต่ละใบ ตามลำดับ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

###### 4.2.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 4 ใบ และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.2.1

#### 4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการเขย่า

##### 4.3.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 5 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 0, 50, 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

##### 4.3.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 5 ใบ จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.3.1

#### 4.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเขย่า

##### 4.4.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.1 เขย่าเป็นระยะเวลา 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่าน

กระดาศกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

#### 4.4.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ชั่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.2 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1

#### 4.5 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล

##### 4.5.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ชั่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 9 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.1 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.1 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที กรองผ่านกระดาศกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

##### 4.5.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ชั่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 9 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.2 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.2 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.5.1

#### 4.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อม

##### 4.6.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 เติมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.1 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.1 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.1 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

##### 4.6.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ต่อสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 เติมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ 8 ใบ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.2 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.2 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.2 จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 4.6.1

#### 4.7 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 7 ซ้ำ

##### 4.7.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1 ลงในขวดรูปชมพู่ 7 ใบ เติมสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมเข้มข้นเท่ากับในข้อ 4.6.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้

จากการทดลองในข้อ 4.3.1 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.1 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.1 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

#### 4.7.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 ลงในขวดรูปชมพู่ 7 ใบ เติมน้ำละลายสีข้อมมาตรฐานผสมเข้มข้นเท่ากับในข้อ 4.6.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชแต่ละใบให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.2 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.2 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.2 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม

4.8 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกลมที่เหมาะสม และไอโซเทอร์มในการดูดซับสีข้อม โดยทำการทดลองแบบเบดซ์

#### 4.8.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ซึ่งตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ 5 ใบ ต่อดำเนินการละลายสีข้อมมาตรฐานผสมเข้มข้นเท่ากับที่ได้จากการทดลองข้อ 4.6.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.1 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.1 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.1 จากนั้นตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.1 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

#### 4.8.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ซึ่งตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ 5 ใบ ต่อดำเนินการละลายสีข้อมมาตรฐานผสมเข้มข้นเท่ากับที่ได้จากการทดลองข้อ 4.6.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2.2 นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.3.2 เก็บตัวอย่างตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.4.2 จากนั้นตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างตามเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.5.2 กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

## 5. ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า ของโครงการพัฒนาอยตุง

5.1 นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ พีเอช สี ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (TDS) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ของแข็งทั้งหมด (TS) น้ำมันและไขมัน บีโอดี และซีโอดี

### 5.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อม

เตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปีเตอร์สารละลายมาตรฐานสีย้อมแต่ละชนิด ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรแต่ละขวดให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานสีย้อม ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

นำสารละลายสีย้อมมาตรฐานทั้ง 9 ชนิด ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของแต่ละสีดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 10 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกน X) กับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม (แกน Y) จะได้กราฟมาตรฐานสีย้อมทั้ง 9 ชนิด

## 6. ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า หลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกลม โดยการทดลองแบบเบตซ์

ทำการทดลองโดยการนำตัวอย่างที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ ในข้อที่ 4.6.1 และ 4.6.2 ตามลำดับ มาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ เช่นเดียวกับข้อที่ 5.1

## 7. ศึกษาประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้งานจริงในการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกลม ในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า

### 7.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง ปริมาตร 10 ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ทดลองได้จากข้อ 4.2.1 บรรจุตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถุงตาข่าย จากนั้นใช้ใบพัดปั่นกวน ดังแสดงในรูปที่ 19 นานเท่ากับระยะเวลาเขย่าที่ทดลองได้จากข้อ 4.4.1 ตั้งทิ้งไว้นานเท่ากับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ทดลองได้จากข้อ 4.5.1 แล้วเก็บน้ำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสี โดยการนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 594, 662, 420, 400, 434, 616, 546, 588 และ 666 นาโนเมตร และคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา



ภาพที่ 19 การทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

### 7.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ทำการทดลองโดยใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง ปริมาตร 10 ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับพีเอชที่ทดลองได้จากข้อ 4.2.2 บรรจุตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถุงตาข่าย จากนั้นใช้ใบพัดปั่นกวนนานเท่ากับระยะเวลาเขย่าที่ทดลองได้จากข้อ 4.4.2 ตั้งทิ้งไว้นานเท่ากับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ทดลองได้จากข้อ 4.5.2 แล้วเก็บน้ำตัวอย่างมา

วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อม โดยการนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 594, 662, 420, 400, 434, 616, 546, 588 และ 666 นาโนเมตร และคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลม

#### **8. ศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม โดยการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง**

ทำการทดลองโดยการนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานจริง หลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกลม มาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นเดียวกับข้อที่ 5.1

#### **9. สถานที่ทำการทดลอง**

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

#### **10. ระยะเวลาในการทดลอง**

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาทดลอง 10 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2553 ถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2554

## ผลและวิจารณ์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าของโครงการพัฒนาออยตุง โดยการใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมเป็นสารดูดซับ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการทำการทดลองแบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ความเร็วรอบการเขย่า ระยะเวลาเขย่า ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล ความเข้มข้นสีข้อม ปริมาณตัวดูดซับและวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับ และส่วนที่สองเป็นการทดลองการดูดซับแบบประยุคต์ใช้งานจริงโดยบรรจุตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมลงในถุงตาข่าย ซึ่งทั้งสองส่วนได้ผลการทดลองดังนี้

### 1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

#### 1.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาที่ผ่านการล้างทำความสะอาด หั่น ตากแดด ต้ม อบไล่ความชื้น ปั่นละเอียด และร่อนเพื่อให้ได้ขนาดเท่ากัน ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

#### 1.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

ตัวดูดซับจากกกกลมที่ผ่านการล้างทำความสะอาด หั่น ตากแดด ต้ม อบไล่ความชื้น ปั่นละเอียด และร่อนเพื่อให้ได้ขนาดเท่ากัน ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ตัวดูดซับจากกกกลม

## 2. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า ของโครงการพัฒนาद्यตุง

น้ำทิ้งที่ทำการศึกษา เป็นน้ำทิ้งที่เก็บในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาद्यตุง

| พารามิเตอร์                       | น้ำทิ้งจาก<br>โรงงานย้อมผ้า | ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง<br>โรงงานอุตสาหกรรม<br>และนิคมอุตสาหกรรม |
|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| พีเอช                             | 9.74                        | 5.5-9.0                                                    |
| TS (มิลลิกรัมต่อลิตร)             | 7,600                       | ไม่ได้กำหนด                                                |
| TSS (มิลลิกรัมต่อลิตร)            | 7,032                       | ไม่เกิน 50 (มิลลิกรัมต่อลิตร)                              |
| น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร) | 45.94                       | ไม่เกิน 5.0 (มิลลิกรัมต่อลิตร)                             |
| ค่าบีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)      | 53.10                       | ไม่เกิน 20 (มิลลิกรัมต่อลิตร)                              |
| ค่าซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)      | 128                         | ไม่เกิน 120 (มิลลิกรัมต่อลิตร)                             |

ตารางที่ 11 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง (ต่อ)

| พารามิเตอร์                           | น้ำทิ้งจาก<br>โรงงานย้อมผ้า | ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง<br>โรงงานอุตสาหกรรม<br>และนิคมอุตสาหกรรม |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|
| สี 6% Super Black G (มิลลิลิตร/ลิตร)  | 86.22                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Turquoise H-GN (มิลลิลิตร/ลิตร) | 66.76                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Yellow LS-4G (มิลลิลิตร/ลิตร)   | 61.76                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Yellow LS-R-01 (มิลลิลิตร/ลิตร) | 30.00                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Orange LS-BR (มิลลิลิตร/ลิตร)   | 28.00                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 4% Navy LS-G (มิลลิลิตร/ลิตร)      | 24.54                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Red LS-B (มิลลิลิตร/ลิตร)       | 31.25                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Blue LS-3R (มิลลิลิตร/ลิตร)     | 33.16                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |
| สี 2% Br.Blue LS-G (มิลลิลิตร/ลิตร)   | 31.50                       | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                      |

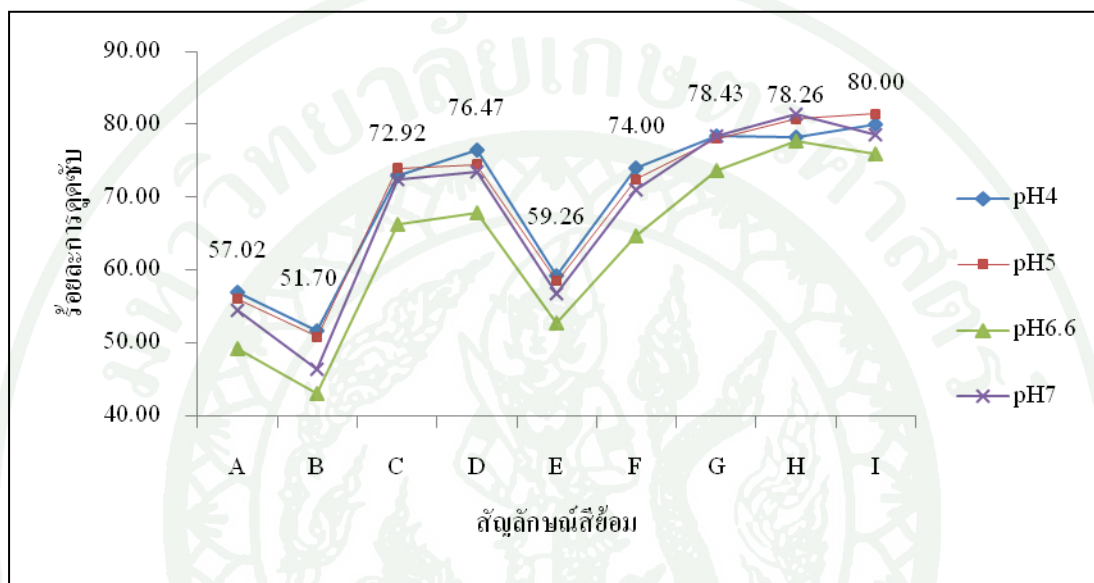
### 3. ผลของพีเอชของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมต่อการดูดซับสีย้อม

#### 3.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 4.2.1 นำสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมมาปรับค่าพีเอช ซึ่งพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ทำการศึกษาทั้งหมด 4 ค่า ได้แก่ 4, 5, 6, 6 (พีเอช 6.6 เป็นพีเอชของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ไม่มีการปรับพีเอช) และ 8 ใช้ปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา 2 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสม 50 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และใช้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที มีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมดีที่สุดที่พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 4 โดยแต่ละสีมีค่าร้อยละการดูดซับดังนี้ สี 6% Super Black G 57.02%, 2% Turquoise H-GN 51.70%, 2% Yellow LS-4G 72.92%, 2% Yellow LS-R-01 76.47%, 2% Orange LS-BR 59.26%, 4% Navy LS-G 74.00%, 2% Red LS-B 78.43%, 2% Blue LS-3R 78.26% และ 2% Br.Blue LS-G 80.00% คิดเป็นร้อยละเฉลี่ยเท่ากับ 69.78 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมจะมีค่าลดลง แต่ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอีกที่พีเอช 8 ซึ่ง

ประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นนั้นเมื่อเทียบกับ พีเอช 4 ก็พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับที่ต่ำกว่า ดังนั้นพีเอชที่ให้ร้อยละการดูดซับสูงที่สุดคือ พีเอช 4 ดังภาพที่ 22 และตารางที่ 12 สีย้อมทุกชนิดมีแนวโน้มของร้อยละการดูดซับที่พีเอชต่างๆ ที่ทำการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันและใกล้เคียงกัน พีเอชที่ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยที่ดีที่สุดคือ พีเอช 4 อาจเป็นเพราะในสถานะที่เป็นกรดทำให้ โครงสร้างของสีมีประจุบวก สามารถยึดเหนี่ยวกับเซลล์ลูโลสซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลโควาเลนต์ได้ดี



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา กับค่าพีเอช

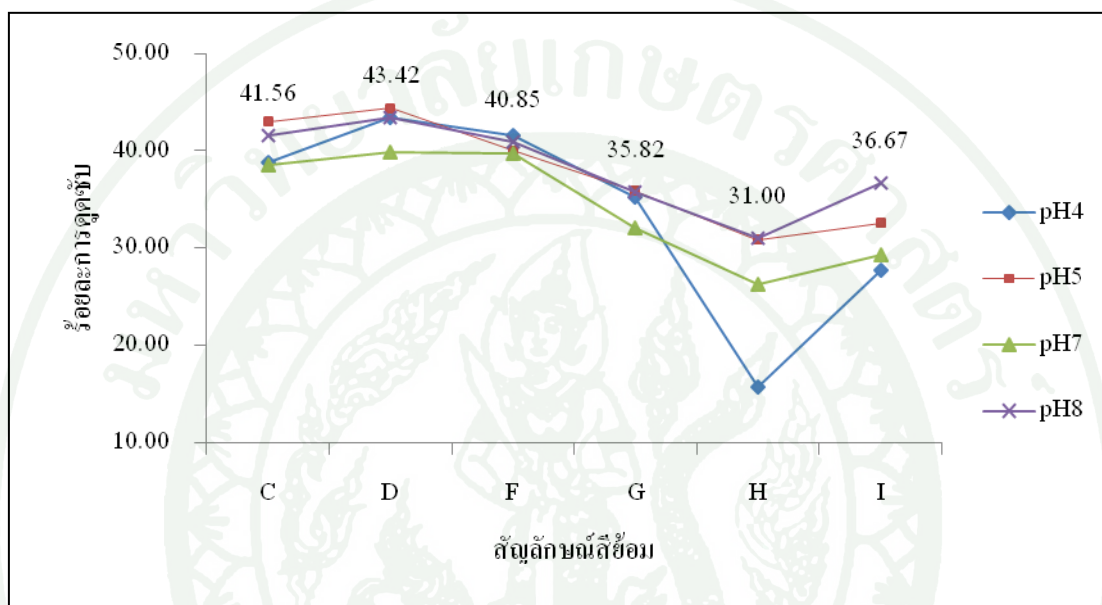
ตารางที่ 12 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ค่าพีเอช | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |
|----------|---------------------------------------------------------|
| 4        | 69.78                                                   |
| 5        | 69.62                                                   |
| 6.6      | 63.47                                                   |
| 8        | 68.11                                                   |

### 3.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 4.2.2 ใช้ปริมาณตัวดูดซับจากกกกลม 3 กรัม ต่อสารละลาย มาตรฐานสีย้อมผสม 50 มิลลิลิตร จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารละลาย

สีข้อมมาตรฐานผสมที่พีเอช 7 (พีเอชของสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมที่ไม่มีการปรับพีเอช) โดยแต่ละสีมีค่าร้อยละการดูดซับ ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 41.56%, 2% Yellow LS-R-01 43.42%, 4% Navy LS-G 40.85%, 2% Red LS-B 35.82%, 2% Blue LS-3R 31.00% และ 2% Br.Blue LS-G 36.67% คิดเป็นร้อยละเฉลี่ยเท่ากับ 38.22 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมจะมีค่าลดลง ดังภาพที่ 23 และตารางที่ 13



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลมกับค่าพีเอช

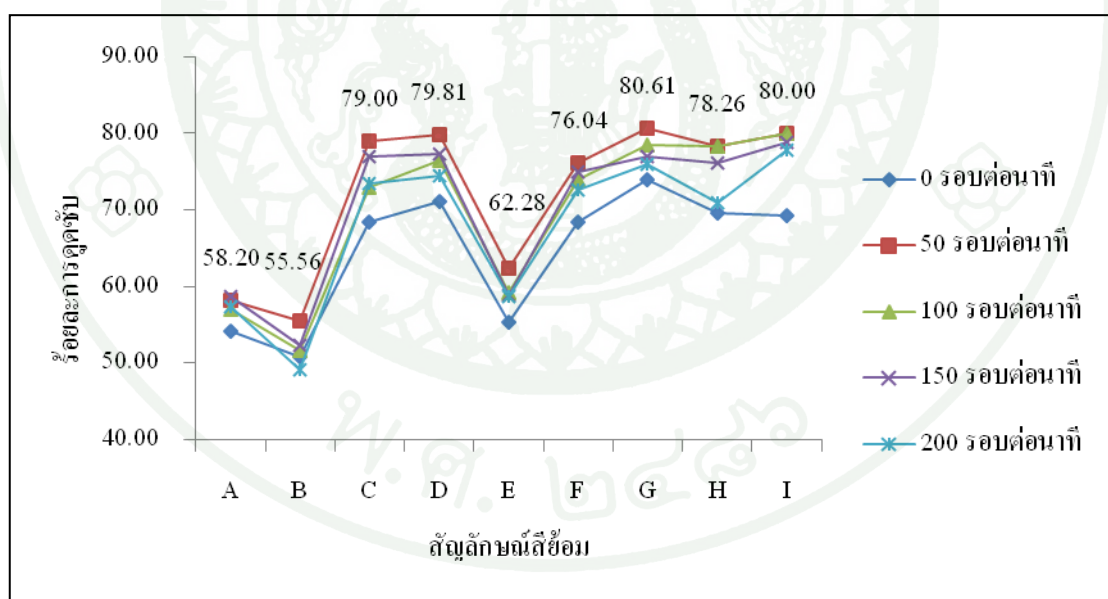
ตารางที่ 13 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลม

| ค่าพีเอช | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลม |
|----------|-------------------------------------------------|
| 4        | 33.74                                           |
| 5        | 37.77                                           |
| 7        | 38.22                                           |
| 8        | 34.26                                           |

#### 4. ผลของความเร็วยรอบการเขย่าต่อการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสม

##### 4.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 4.3.1 แปรผันความเร็วรอบการเขย่าเป็น 0, 50, 100, 150, 200 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุเคลือบสีของมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบการเขย่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงความเร็วรอบการเขย่าที่ 50 รอบต่อนาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีของดีที่สุด ดังนี้ สี 6% Super Black G 58.20%, 2% Turquoise H-GN 55.56%, 2% Yellow LS-4G 79.00%, 2% Yellow LS-R-01 79.81%, 2% Orange LS-BR 62.28%, 4% Navy LS-G 76.0%, 2% Red LS-B 80.61%, 2% Blue LS-3R 78.26% และ 2% Br.Blue LS-G 80.00% ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 72.20 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุจะมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าเมื่อความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มของน้ำลดลง และทำให้โมเลกุลของสีสามารถเคลื่อนเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วขึ้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถถูกดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวตัวดูดซับได้อีก จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง (นิพนธ์และคณิตา, 2550) ความเร็วรอบการเขย่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีของวัสดุเคลือบสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา คือ ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 24 และตารางที่ 14



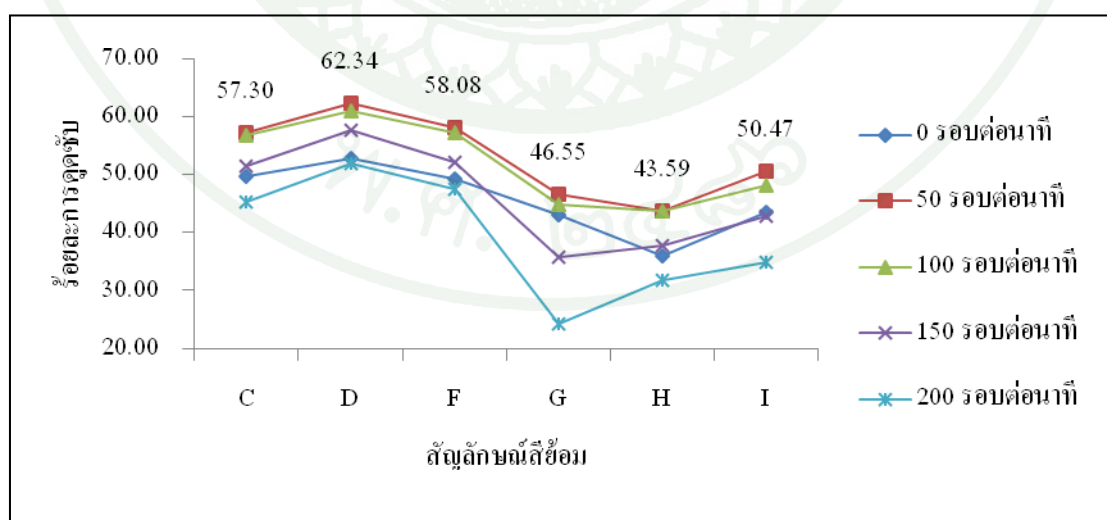
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวากับความเร็วรอบการเขย่า

ตารางที่ 14 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยของการดูดซับสีของตัวดูดซับจาก  
ลำต้นผักตบชวา

| ความเร็วรอบการเขย่า (รอบต่อนาที) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 0                                | 64.54                                               |
| 50                               | 72.20                                               |
| 100                              | 69.78                                               |
| 150                              | 70.13                                               |
| 200                              | 67.80                                               |

#### 4.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 4.3.2 แปรผันความเร็วรอบการเขย่าเป็น 0, 50, 100, 150, 200 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของตัวดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบการเขย่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา จนกระทั่งถึงความเร็วรอบการเขย่าที่ 50 รอบต่อนาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับดีที่สุด ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 57.30%, 2% Yellow LS-R-01 62.34%, 4% Navy LS-G 58.08%, 2% Red LS-B 46.55%, 2% Blue LS-3R 43.59% และ 2% Br.Blue LS-G 50.47% ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 53.05 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีของตัวดูดซับจะมีค่าลดลง ความเร็วรอบการเขย่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม คือ ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 25 และตารางที่ 15 ซึ่งอธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลมกับความเร็วรอบการเขย่า

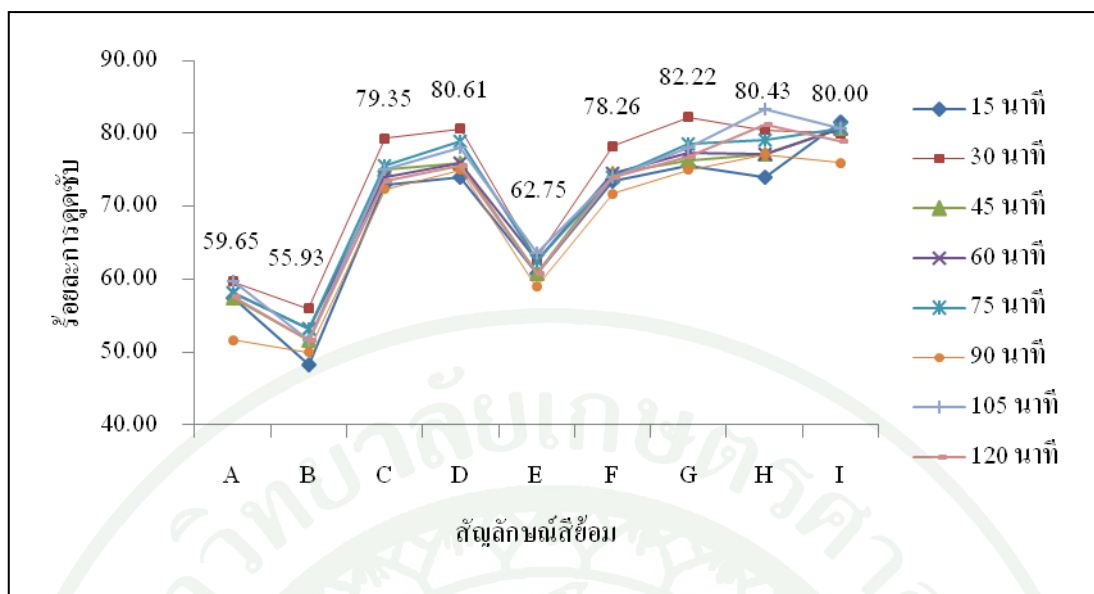
**ตารางที่ 15** อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ความเร็วรอบการเขย่า (รอบต่อนาที) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม |
|----------------------------------|---------------------------------------------|
| 0                                | 45.71                                       |
| 50                               | 53.05                                       |
| 100                              | 51.91                                       |
| 150                              | 46.21                                       |
| 200                              | 39.24                                       |

## 5. ผลของระยะเวลาเขย่าต่อการดูดซับสีของในสารละลายสีของมาตรฐานผสม

### 5.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 4.4.1 ทำการแปรผันระยะเวลาเขย่าเป็น 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ได้ผลการทดลองดังนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของแต่ละชนิดในสารละลายสีของมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาเขย่าเพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาเขย่าที่ 30 นาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีของดีที่สุด ดังนี้ สี 6% Super Black G 59.65%, 2% Turquoise H-GN 55.93%, 2% Yellow LS-4G 79.35%, 2% Yellow LS-R-01 80.6%, 2% Orange LS-BR 62.75%, 4% Navy LS-G 78.26%, 2% Red LS-B 82.22%, 2% Blue LS-3R 80.43% และ 2% Br.Blue LS-G 80.00% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 73.24 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสีของจะมีค่าลดลง โดยระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา คือ ระยะเวลาเขย่าที่ 30 นาที ดังภาพที่ 26 และตารางที่ 16



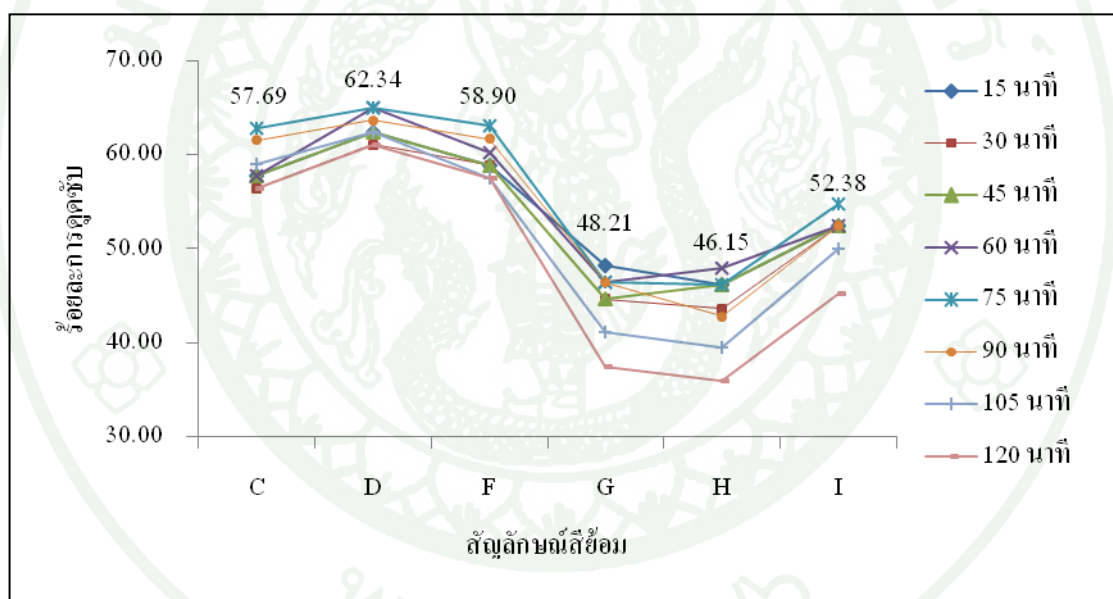
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา กับระยะเวลาแช่

ตารางที่ 16 อิทธิพลของระยะเวลาแช่ต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ระยะเวลาแช่ (นาที) | ร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |
|--------------------|---------------------------------------------------|
| 15                 | 68.64                                             |
| 30                 | 73.24                                             |
| 45                 | 69.91                                             |
| 60                 | 70.38                                             |
| 75                 | 71.19                                             |
| 90                 | 67.53                                             |
| 105                | 71.56                                             |
| 120                | 69.97                                             |

## 5.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 4.4.2 ทำการแปรผันระยะเวลาเขย่าเป็น 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเขย่าเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาเขย่าที่ 75 นาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีข้อมดีที่สุด 56.35 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมมีค่าใกล้เคียงระยะเวลาเขย่าที่ 15 นาที ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซับแต่ละสี ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 57.69%, 2% Yellow LS-R-01 62.34%, 4% Navy LS-G 58.90%, 2% Red LS-B 48.21%, 2% Blue LS-3R 46.15% และ 2% Br.Blue LS-G 52.38% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 54.28 จึงเลือกใช้ระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลม คือ ระยะเวลาเขย่าที่ 15 นาที ดังภาพที่ 27 และตารางที่ 17



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีข้อมของตัวดูดซับจากกกกลมกับระยะเวลาเขย่า

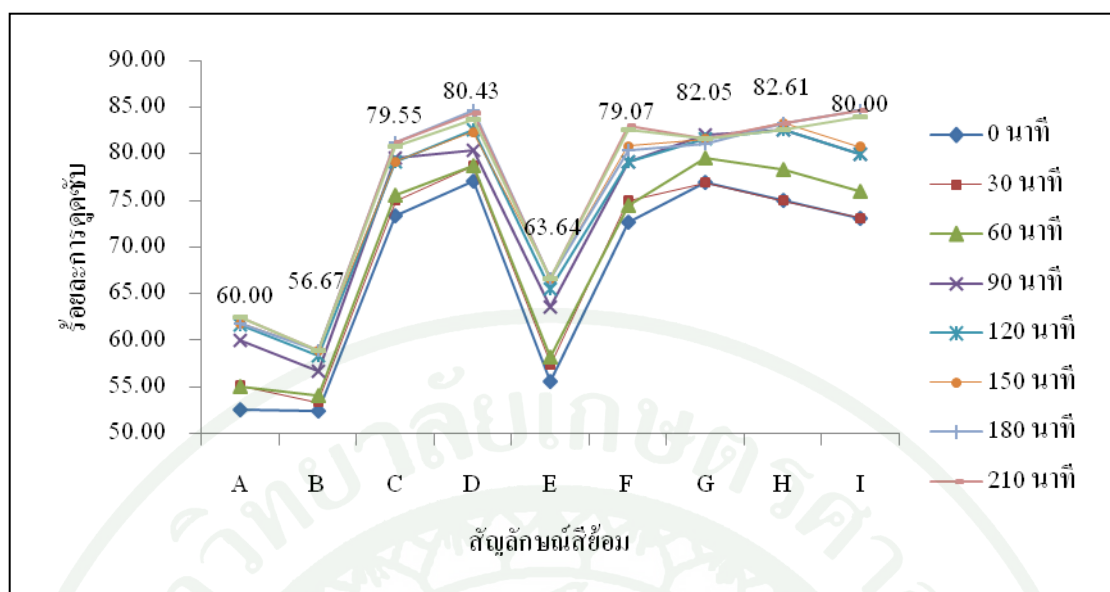
ตารางที่ 17 อิทธิพลของระยะเวลาแช่ต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ระยะเวลาแช่ (นาทีก) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม |
|---------------------|---------------------------------------------|
| 15                  | 54.28                                       |
| 30                  | 52.83                                       |
| 45                  | 53.68                                       |
| 60                  | 54.94                                       |
| 75                  | 56.35                                       |
| 90                  | 54.74                                       |
| 105                 | 51.57                                       |
| 120                 | 48.94                                       |

## 6. ผลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อการดูดซับสีของในสารละลายสีของมาตรฐานผสม

### 6.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อ 4.5.1 ทำการแปรผันระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็น 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีของในสารละลายสีของมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่สามารถดูดซับสีได้ดีที่สุด คือ 210 นาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีได้ดีที่สุด 76.24 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับสีของมีค่าใกล้เคียงระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 90 นาที ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซับแต่ละสี ดังนี้ สี 6% Super Black G 60.00%, 2% Turquoise H-GN 56.67%, 2% Yellow LS-4G 79.55%, 2% Yellow LS-R-01 80.43%, 2% Orange LS-BR 63.64%, 4% Navy LS-G 79.07%, 2% Red LS-B 82.05 %, 2% Blue LS-3R 82.61% และ 2% Br.Blue LS-G 80.00% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 73.78 จึงเลือกใช้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดลองการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา คือ ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 90 นาที ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 18 อธิบายได้ว่า ในระยะเวลาเริ่มต้นพื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่มาก ทำให้อัตราการดูดซับมีมากขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับลดลงและเกิดการคายซับ (desorption) (Uddin et al. 2007)



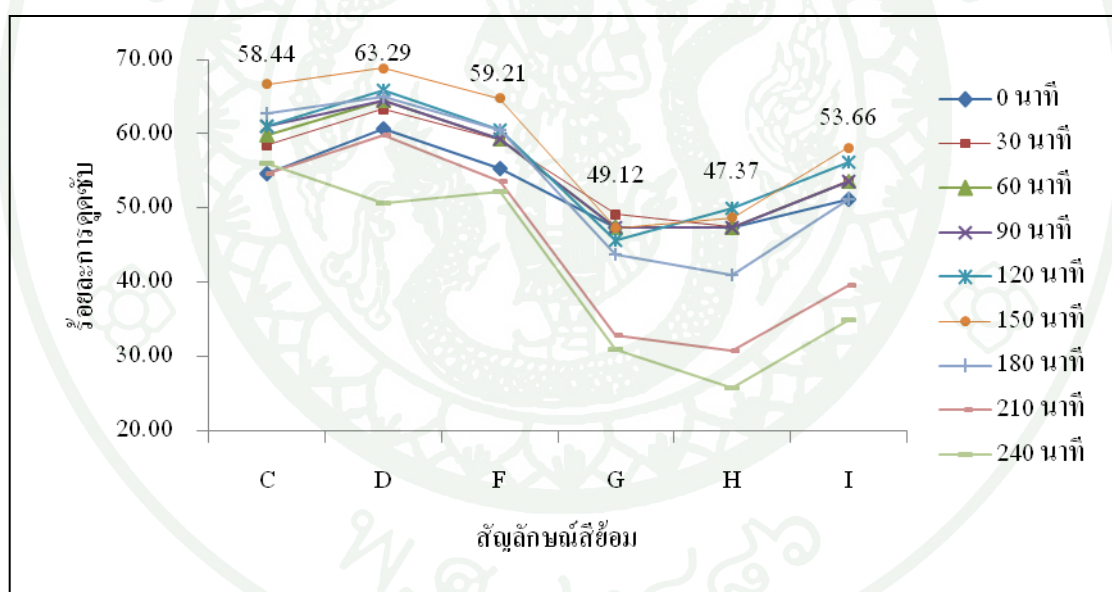
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีส้มของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา กับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

ตารางที่ 18 อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีส้มของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (นาที) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีส้มของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 0                                | 67.63                                                  |
| 30                               | 68.85                                                  |
| 60                               | 69.97                                                  |
| 90                               | 73.78                                                  |
| 120                              | 74.49                                                  |
| 150                              | 75.05                                                  |
| 180                              | 75.86                                                  |
| 210                              | 76.24                                                  |
| 240                              | 75.64                                                  |

## 6.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อ 4.5.2 ทำการแปรผันระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็น 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที ได้ผลการทดลองดังนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด คือ 150 นาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมคี่ที่สุด 59.07 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมมีค่าใกล้เคียงระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 30 นาที ซึ่งมีค่าร้อยละการดูดซับแต่ละสี ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 58.44%, 2% Yellow LS-R-01 63.29%, 4% Navy LS-G 59.21%, 2% Red LS-B 49.12%, 2% Blue LS-3R 47.37% และ 2% Br.Blue LS-G 53.66% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 55.18 จึงเลือกใช้ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลม คือ ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 30 นาที ดังภาพที่ 29 และตารางที่ 19



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลมกับระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล

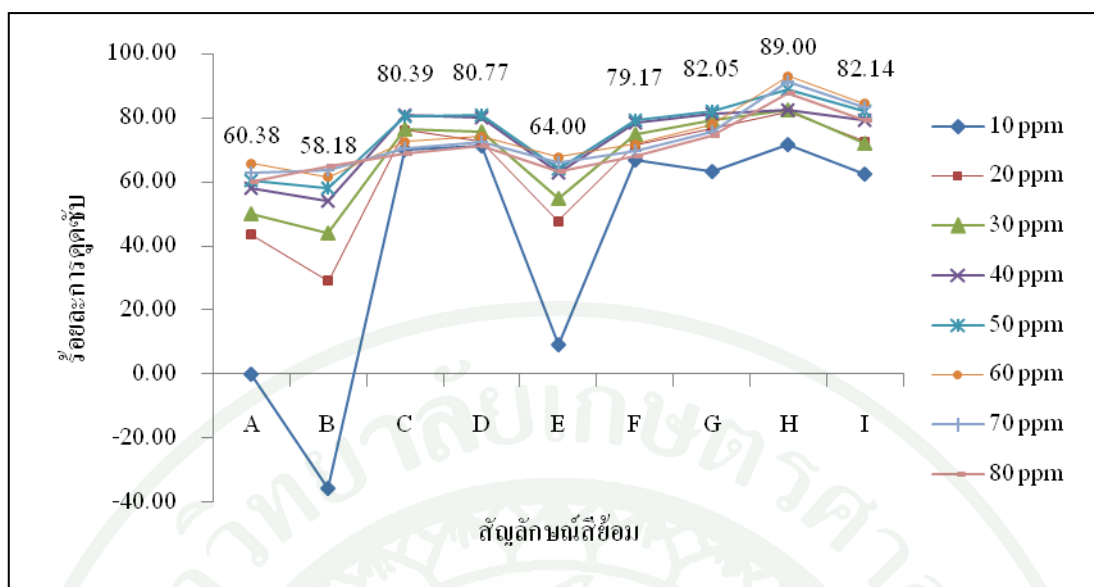
**ตารางที่ 19** อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (นาท) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม |
|---------------------------------|---------------------------------------------|
| 0                               | 52.76                                       |
| 30                              | 55.18                                       |
| 60                              | 55.32                                       |
| 90                              | 55.54                                       |
| 120                             | 56.52                                       |
| 150                             | 59.07                                       |
| 180                             | 54.00                                       |
| 210                             | 45.16                                       |
| 240                             | 41.70                                       |

## 7. ผลของความเข้มข้นสีต่อการดูดซับสีของสารละลายสีมาตรฐานผสม

### 7.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อ 4.6.1 ทำการแปรผันความเข้มข้นสีเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีของสารละลายสีมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นสีที่สามารถดูดซับได้สูงสุด คือ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีที่ดีที่สุด ดังนี้ สี 6% Super Black G 60.38%, 2% Turquoise H-GN 58.18%, 2% Yellow LS-4G 80.95%, 2% Yellow LS-R-01 80.21%, 2% Orange LS-BR 62.79%, 4% Navy LS-G 78.57%, 2% Red LS-B 81.25%, 2% Blue LS-3R 82.61% และ 2% Br.Blue LS-G 79.17% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 75.12 ความเข้มข้นสีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา คือ ความเข้มข้นสีที่ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 30 และตารางที่ 20 อธิบายได้ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีจำกัด จึงทำให้เมื่อเพิ่มความเข้มข้น ร้อยละการดูดซับอาจคงที่หรือลดลง เนื่องจากเกิดการคายซับ



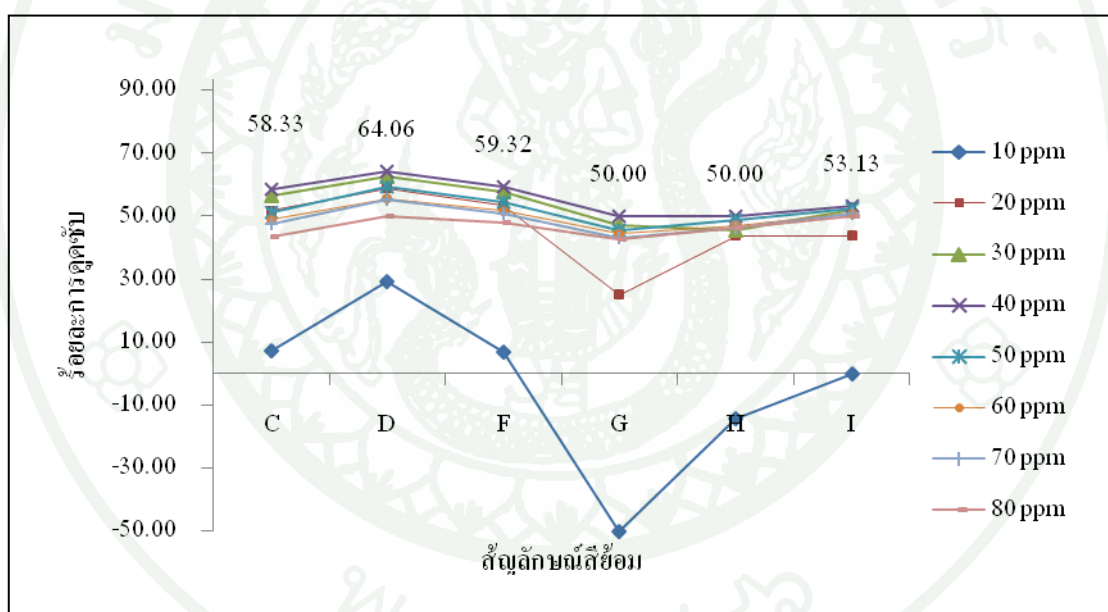
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวากับความเข้มข้นสีของ

ตารางที่ 20 อิทธิพลของความเข้มข้นสีของร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ความเข้มข้นสีของ (มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| 10                                | 42.09                                         |
| 20                                | 63.49                                         |
| 30                                | 67.73                                         |
| 40                                | 73.08                                         |
| 50                                | 75.12                                         |
| 60                                | 74.27                                         |
| 70                                | 72.74                                         |
| 80                                | 70.81                                         |

## 7.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อ 4.6.2 ทำการแปรผันความเข้มข้นสีย้อมเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ เมื่อความเข้มข้นสีย้อมเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นสีย้อมที่สามารถดูดซับได้สูงสุด คือ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ค่าร้อยละการดูดซับสีย้อมดีที่สุด ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 58.33%, 2% Yellow LS-R-01 64.06%, 4% Navy LS-G 59.32%, 2% Red LS-B 50.00%, 2% Blue LS-3R 50.00% และ 2% Br.Blue LS-G 53.13% คิดเป็นร้อยละการดูดซับเฉลี่ย 55.81 ความเข้มข้นสีย้อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลม คือ ความเข้มข้นสีย้อมที่ 40 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 31 และตารางที่ 21 เหตุผลอธิบายได้เช่นเดียวกับการดูดซับของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลมกับระยะเวลาเข้าสู่ภาวะสมดุล

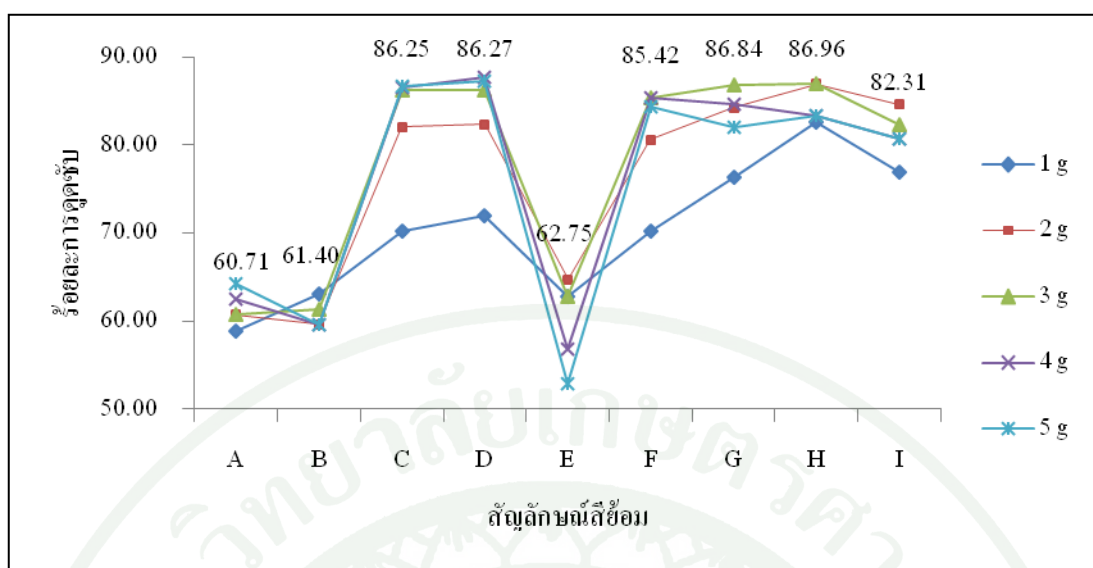
**ตารางที่ 21** อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ความเข้มข้นสีย้อม (มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม |
|------------------------------------|---------------------------------------------|
| 10                                 | -3.51                                       |
| 20                                 | 46.04                                       |
| 30                                 | 53.55                                       |
| 40                                 | 55.81                                       |
| 50                                 | 52.00                                       |
| 60                                 | 49.72                                       |
| 70                                 | 49.05                                       |
| 80                                 | 46.73                                       |

## 8. ผลของปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม

### 8.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 4.8.1 ใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ปรับพีเอชเท่ากับ 4 ปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 90 นาที ความเข้มข้นสีย้อม 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 ml ได้ผลการทดลองดังนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา 3 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมโดยให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 77.66 คิดเป็น 0.647 mg/g ของตัวดูดซับ และปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา 2 กรัม ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 76.21 คิดเป็น 0.953 mg/g ของตัวดูดซับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาปริมาณ 2 กรัม และแต่ละสีของสีย้อมให้ร้อยละการดูดซับ ดังนี้ สี 6% Super Black G 60.71%, 2% Turquoise H-GN 59.65%, 2% Yellow LS-4G 82.08%, 2% Yellow LS-R-01 82.35%, 2% Orange LS-BR 64.71%, 4% Navy LS-G 80.63%, 2% Red LS-B 84.21%, 2% Blue LS-3R 86.96% และ 2% Br.Blue LS-G 84.62% ดังภาพที่ 32 และตารางที่ 22



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา กับปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

ตารางที่ 22 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ปริมาณตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา<br>(กรัม) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับ<br>จากลำต้นผักตบชวา |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1                                         | 70.34                                                   |
| 2                                         | 76.21                                                   |
| 3                                         | 77.66                                                   |
| 4                                         | 76.37                                                   |
| 5                                         | 75.71                                                   |

การดูดซับสี 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 ในสารละลายสีของมาตรฐานผสมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีของแลงเมียร์มีค่ามากกว่าฟรุนดลิช แสดงว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาเป็นไปตามการดูดซับของแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า ซึ่งกลไก

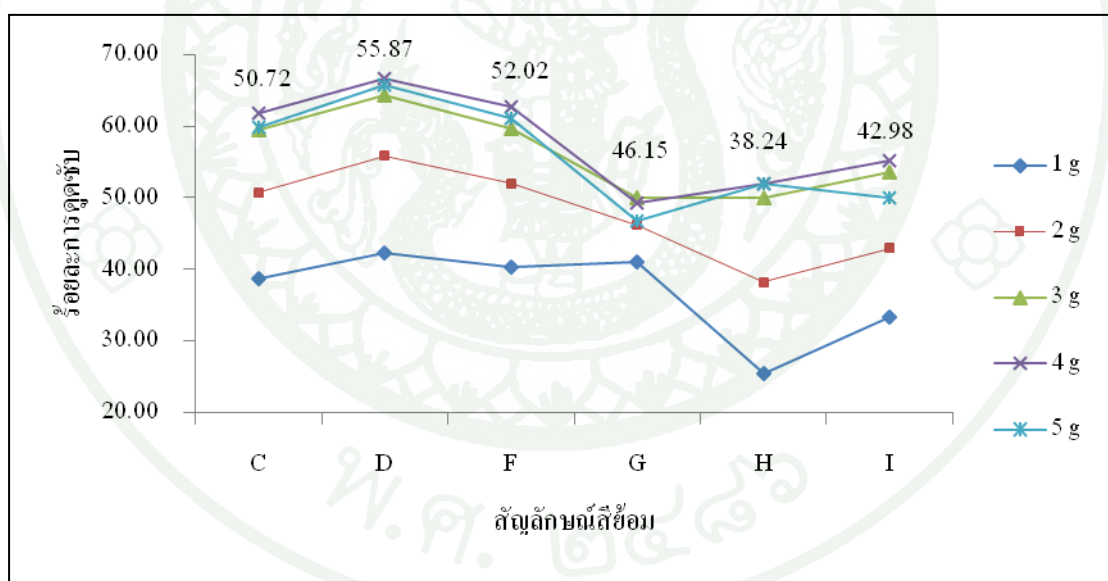
ของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ不会再มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

|           | ชนิดสีย้อม        | สมการไอโซเทอร์ม         | $R^2$  |
|-----------|-------------------|-------------------------|--------|
| แลงเมียร์ | 6% Super Black G  | $y = 0.6107x + 0.0966$  | 0.9987 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1611x + 0.2535$ | 0.9402 |
| แลงเมียร์ | 2% Turquoise H-GN | $y = 0.6782x - 0.0414$  | 0.9995 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1749x + 0.2898$ | 0.9428 |
| แลงเมียร์ | 2% Yellow LS-4G   | $y = 0.4419x + 0.1051$  | 0.9993 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.151x + 0.3467$  | 0.9672 |
| แลงเมียร์ | 2% Yellow LS-R-01 | $y = 0.4375x + 0.0964$  | 0.9985 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1518x + 0.3564$ | 0.9667 |
| แลงเมียร์ | 2% Orange LS-BR   | $y = 0.7858x - 0.2817$  | 0.9893 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1903x + 0.3298$ | 0.9763 |
| แลงเมียร์ | 4% Navy LS-G      | $y = 0.4559x + 0.0778$  | 0.9975 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1536x + 0.3517$ | 0.9719 |
| แลงเมียร์ | 2% Red LS-B       | $y = 0.4767x + 0.0066$  | 0.9967 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1634x + 0.39$   | 0.9710 |
| แลงเมียร์ | 2% Blue LS-3R     | $y = 0.4831x - 0.0285$  | 0.9986 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.171x + 0.4225$  | 0.9617 |
| แลงเมียร์ | 2% Br.Blue LS-G   | $y = 0.4949x - 0.0028$  | 0.9990 |
| ฟรุนดลิช  |                   | $y = -0.1677x + 0.3922$ | 0.9610 |

## 7.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 4.8.2 ใช้สารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมที่ปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 ใช้ตัวดูดซับจากกกกลม 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม นำไปแช่ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที ความเข้มข้นสีย้อม 40 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 50 ml ได้ผลการทดลองดังนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณตัวดูดซับจากกกกลมเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณตัวดูดซับจากกกกลม 4 กรัม ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 57.95 คิดเป็น 0.289 mg/g ของตัวดูดซับ และปริมาณตัวดูดซับจากกกกลม 3 กรัม ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 56.14 คิดเป็น 0.374 mg/g ของตัวดูดซับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่า ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวดูดซับจากกกกลมปริมาณ 3 กรัม และแต่ละสีของสีย้อมให้ร้อยละการดูดซับ ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 50.72%, 2% Yellow LS-R-01 55.87%, 4% Navy LS-G 52.02%, 2% Red LS-B 46.15%, 2% Blue LS-3R 38.24% และ 2% Br.Blue LS-G 42.98% ดังภาพที่ 42 และตารางที่ 24



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลมและปริมาณตัวดูดซับจากกกกลม

ตารางที่ 24 อิทธิพลของตัวดูดซับจากกกกลมต่อร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ปริมาณตัวดูดซับจากกกกลม<br>(กรัม) | ร้อยละเฉลี่ยการดูดซับสีของ<br>ตัวดูดซับจากกกกลม |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1                                 | 36.86                                           |
| 2                                 | 47.66                                           |
| 3                                 | 56.14                                           |
| 4                                 | 57.95                                           |
| 5                                 | 56.90                                           |

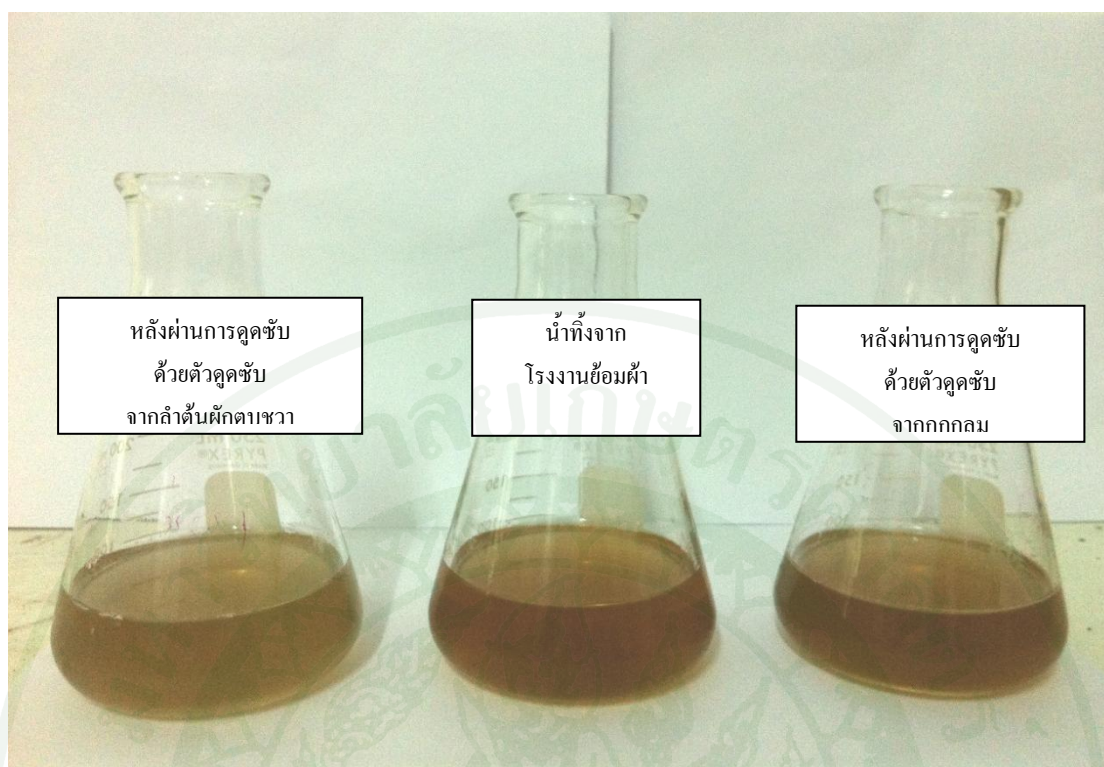
การดูดซับสี 2% Yellow LS-4G, 2% Yellow LS-R-01, 4% Navy LS-G, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R และ 2% Br.Blue LS-G ในสารละลายสีข้อมมาตรฐานผสมของตัวดูดซับจากกกกลมเมื่อนำมาเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีข้อมของแลงเมียร์และฟรุนดลิชมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากกกกลมเป็นไปตามการดูดซับของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน ซึ่งกลไกของแลงเมียร์คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ส่วนกลไกของฟรุนดลิชคือ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแสงเมียร์และฟรุณดิช และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดของตัวดูดซับจากกกกลม

|           | ชนิดสีย้อม        | สมการไอโซเทอร์ม         | $R^2$  |
|-----------|-------------------|-------------------------|--------|
| แสงเมียร์ | 2% Yellow LS-4G   | $y = 0.7096x + 0.5092$  | 0.9882 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.1247x - 0.0128$ | 0.9846 |
| แสงเมียร์ | 2% Yellow LS-R-01 | $y = 0.6433x + 0.4843$  | 0.9952 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.1239x + 0.0229$ | 0.9868 |
| แสงเมียร์ | 4% Navy LS-G      | $y = 0.7081x + 0.4846$  | 0.9947 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.1276x + 0.0022$ | 0.9779 |
| แสงเมียร์ | 2% Red LS-B       | $y = 1.0191x + 0.1073$  | 0.9886 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.1548x + 0.0161$ | 0.9783 |
| แสงเมียร์ | 2% Blue LS-3R     | $y = 0.5884x + 1.3412$  | 0.9913 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.0864x + 0.2161$ | 0.9720 |
| แสงเมียร์ | 2% Br.Blue LS-G   | $y = 0.782x + 0.6652$   | 0.9825 |
| ฟรุณดิช   |                   | $y = -0.1206x - 0.0842$ | 0.9708 |

#### 8. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ทั้งก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมโดยการทดลองแบบเบตซ์

ทำการทดลองโดยการนำน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ที่เก็บในวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2554 มาวิเคราะห์คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม ด้วยสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองแบบเบตซ์ มาวิเคราะห์คุณภาพน้ำและความเข้มข้นของสีย้อมโดยเทียบจากกราฟมาตรฐานสีย้อมที่เตรียมได้จากข้อ 5.2 ในภาพผนวกที่ 1-9 ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 34 และตารางที่ 26



ภาพที่ 34 เปรียบเทียบสีของน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมทำการทดลองแบบเบตซ์

ตารางที่ 26 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมโดยการทดลองแบบเบตซ์

| พารามิเตอร์          | น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า       |        |           |                       |           |
|----------------------|-------------------------------|--------|-----------|-----------------------|-----------|
|                      | ตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา |        |           | ตัวดูดซับจาก<br>กกกลม |           |
|                      | ก่อน                          | หลัง   | ร้อยละ    | หลัง                  | ร้อยละ    |
|                      | ดูดซับ                        | ดูดซับ | การดูดซับ | ดูดซับ                | การดูดซับ |
| พีเอช                | 9.74                          | 4.00   | -         | 7.00                  | -         |
| ความขุ่น (NTU)       | 68.87                         | 101.80 | -         | 129.67                | -         |
| TSS (มิลลิกรัม/ลิตร) | 7,032                         | 4,420  | 37.14     | 4,108                 | 41.58     |
| TS (มิลลิกรัม/ลิตร)  | 7,600                         | 5,256  | 30.84     | 4,760                 | 37.37     |

**ตารางที่ 26** คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าคอตตง ก่อนและหลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจาก  
ลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมโดยการทดลองแบบเบตซ์ (ต่อ)

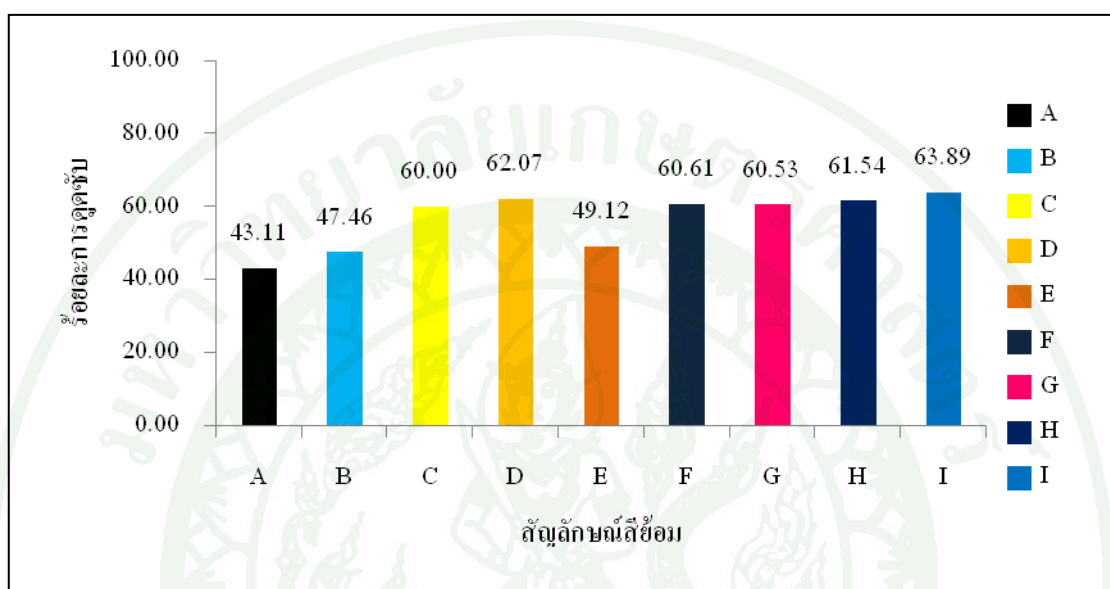
| พารามิเตอร์                           | น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า |                |                     |                |                     |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
|                                       | ตัวดูดซับจาก            |                |                     | ตัวดูดซับจาก   |                     |
|                                       | ลำต้นผักตบชวา           |                |                     | กกกลม          |                     |
|                                       | ก่อน<br>ดูดซับ          | หลัง<br>ดูดซับ | ร้อยละ<br>การดูดซับ | หลัง<br>ดูดซับ | ร้อยละ<br>การดูดซับ |
| น้ำมันและไขมัน<br>(มิลลิกรัม/ลิตร)    | 45.94                   | 36.83          | 19.83               | 9.92           | 78.41               |
| ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)            | 128                     | 96             | 25.00               | 96             | 25.00               |
| สี 6% Super Black G (มิลลิกรัม/ลิตร)  | 86.22                   | 47.63          | 44.76               | 86.22          | -                   |
| สี 2% Turquoise H-GN (มิลลิกรัม/ลิตร) | 66.76                   | 34.19          | 48.78               | 66.76          | -                   |
| สี 2% Yellow LS-4G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 61.76                   | 15.44          | 75.00               | 45.46          | 26.39               |
| สี 2% Yellow LS-R-01 (มิลลิกรัม/ลิตร) | 30.00                   | 6.92           | 76.92               | 20.83          | 30.56               |
| สี 2% Orange LS-BR (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 28.00                   | 13.25          | 52.69               | 28.00          | -                   |
| สี 4% Navy LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)      | 24.54                   | 7.55           | 69.23               | 18.25          | 25.64               |
| สี 2% Red LS-B (มิลลิกรัม/ลิตร)       | 31.25                   | 10.41          | 66.67               | 19.72          | 36.90               |
| สี 2% Blue LS-3R (มิลลิกรัม/ลิตร)     | 33.16                   | 6.63           | 80.00               | 18.95          | 42.86               |
| สี 2% Br.Blue LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 31.50                   | 6.30           | 80.00               | 17.10          | 42.86               |

จากการทดลองพบว่าน้ำทิ้งจากการย้อมผ้าหลังผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้น  
ผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม สามารถบำบัดสีย้อมได้แล้วยังสามารถบำบัด ของแข็งแขวนลอย  
ทั้งหมด (TSS) ของแข็งทั้งหมด (TS) น้ำมันและไขมัน และซีไอดี ได้อีกด้วย

## 9. ผลการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาคอตตง ด้วยตัวดูดซับจากลำต้น ผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลมโดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

### 9.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อ 6.1 ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง ปริมาตร 10 ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4 บรรจุตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา ปริมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถุงตาข่าย จากนั้นใช้ใบพัดปั่นกวนนาน 30 นาที ตั้งทิ้งไว้นาน 90 นาที แล้วเก็บน้ำตัวอย่างหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 35

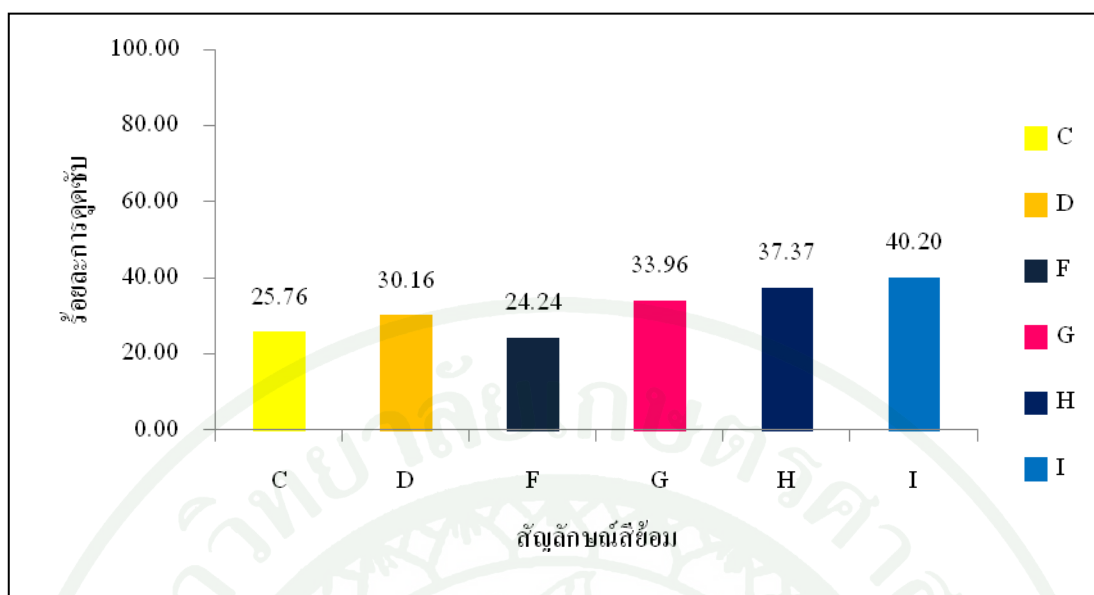


ภาพที่ 35 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา โดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาจะมีค่าการดูดซับสีย้อมแต่ละสี ดังนี้ สี 6% Super Black G 43.11%, 2% Turquoise H-GN 47.46%, 2% Yellow LS-4G 60.00%, 2% Yellow LS-R-01 62.07%, 2% Orange LS-BR 49.12%, 4% Navy LS-G 60.61%, 2% Red LS-B 60.53%, 2% Blue LS-3R 61.54% และ 2% Br.Blue LS-G 63.89% และคิดเป็นเฉลี่ยร้อยละ 56.48

## 9.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อ 6.2 ใช้น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง ปริมาตร 10 ลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7 บรรจุตัวดูดซับจากกกกลม ปริมาณ 200 กรัม ใส่ลงในถุงตาข่าย จากนั้นใช้ใบพัดปั่นกวนนาน 15 นาที ตั้งทิ้งไว้นาน 30 นาที แล้วเก็บน้ำตัวอย่างหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 36



**ภาพที่ 36** ประสิทธิภาพการติดสีของผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากกกกลม โดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการติดสีของผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากกกกลมจะมีค่าการติดสีของผ้าแต่ละสี ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 25.76%, 2% Yellow LS-R-01 30.16%, 4% Navy LS-G 24.24%, 2% Red LS-B 33.96%, 2% Blue LS-3R 37.37% และ 2% Br.Blue LS-G 40.20% และคิดเป็นเฉลี่ยร้อยละ 31.95

## 10. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

### ตัวดูดซับจากกกกลมโดยการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

#### 10.1 ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

จากการทดลองในข้อที่ 7 โดยการนำน้ำตัวอย่างที่ประยุกต์ใช้งานจริง มาวิเคราะห์ค่าดัชนีต่างๆ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 27

ตารางที่ 27 คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาโดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

| พารามิเตอร์                           | น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า   |            |                 |
|---------------------------------------|---------------------------|------------|-----------------|
|                                       | ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา |            |                 |
|                                       | ก่อนดูดซับ                | หลังดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ |
| พีเอช                                 | 9.74                      | 4          | -               |
| ความขุ่น (NTU)                        | 68.87                     | 226        | -               |
| TSS (มิลลิกรัม/ลิตร)                  | 7,032                     | 6,704      | 4.66            |
| TS (มิลลิกรัม/ลิตร)                   | 7,600                     | 7,328      | 3.58            |
| น้ำมันและไขมัน (มิลลิกรัม/ลิตร)       | 45.94                     | 27.29      | 40.60           |
| ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)            | 128                       | 96         | 25              |
| สี 6% Super Black G (มิลลิกรัม/ลิตร)  | 86.22                     | 49.05      | 43.11           |
| สี 2% Turquoise H-GN (มิลลิกรัม/ลิตร) | 66.76                     | 35.07      | 47.46           |
| สี 2% Yellow LS-4G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 61.76                     | 24.07      | 60.00           |
| สี 2% Yellow LS-R-01 (มิลลิกรัม/ลิตร) | 30.00                     | 11.38      | 62.07           |
| สี 2% Orange LS-BR (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 28.00                     | 14.25      | 49.12           |
| สี 4% Navy LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)      | 24.54                     | 9.67       | 60.61           |
| สี 2% Red LS-B (มิลลิกรัม/ลิตร)       | 31.25                     | 12.33      | 60.53           |
| สี 2% Blue LS-3R (มิลลิกรัม/ลิตร)     | 33.16                     | 12.75      | 61.54           |
| สี 2% Br.Blue LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 31.50                     | 11.37      | 63.89           |

จากการทดลองการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาแบบประยุกต์ใช้งานจริงพบว่า ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ของแข็งทั้งหมด (TS) น้ำมันและไขมัน และซีไอดี มีค่าลดลง เปรียบเทียบการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริงหรือการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งที่ปริมาณมากขึ้นจะมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าการทดลองแบบเบตซ์ อาจเนื่องมาจากการนำตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาใส่ในถุงตาข่าย ทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสัมผัสกันยาก กระบวนการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

## 10.2 ตัวดูดซับจากกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 7 โดยการนำน้ำตัวอย่างที่ประยุกต์ใช้งานจริง มาวิเคราะห์ค่าดัชนีต่างๆ ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 28

**ตารางที่ 28** คุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้าหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากกกกลม โดยทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง

| พารามิเตอร์                           | น้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า |            |                 |
|---------------------------------------|-------------------------|------------|-----------------|
|                                       | ตัวดูดซับจากกกกลม       |            |                 |
|                                       | ก่อนดูดซับ              | หลังดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ |
| พีเอช                                 | 9.74                    | 7          | -               |
| ความขุ่น (NTU)                        | 68.87                   | 140        | -               |
| TSS (มิลลิกรัม/ลิตร)                  | 7,032                   | 6,441      | 8.40            |
| TS (มิลลิกรัม/ลิตร)                   | 7,600                   | 6,990      | 8.03            |
| น้ำมันและไขมัน<br>(มิลลิกรัม/ลิตร)    | 45.94                   | 25.54      | 45.06           |
| ค่าซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)            | 128                     | 64         | 50              |
| สี 2% Yellow LS-4G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 61.76                   | 45.85      | 25.76           |
| สี 2% Yellow LS-R-01 (มิลลิกรัม/ลิตร) | 30.00                   | 20.95      | 30.16           |
| สี 4% Navy LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)      | 24.54                   | 18.59      | 24.24           |
| สี 2% Red LS-B (มิลลิกรัม/ลิตร)       | 31.25                   | 20.64      | 33.96           |
| สี 2% Blue LS-3R (มิลลิกรัม/ลิตร)     | 33.16                   | 20.77      | 37.37           |
| สี 2% Br.Blue LS-G (มิลลิกรัม/ลิตร)   | 31.50                   | 18.84      | 40.20           |

จากการทดลองการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกลมแบบประยุกต์ใช้งานจริงพบว่า ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) ของแข็งทั้งหมด (TS) น้ำมันและไขมัน และซีโอดี มีค่าลดลง เช่นเดียวกับการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริงของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา การบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งที่ปริมาณมากขึ้น จะมีประสิทธิภาพการบำบัดต่ำกว่าการทดลองแบบเบดซ์ อาจเนื่องมาจากการนำตัวดูดซับจากกกกลมใส่ในถุงตาข่าย ทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับสัมผัสกันยาก กระบวนการดูดซับจึงเกิดได้ไม่ดี

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมในสารละลายมาตรฐานสีย้อมผสมและน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาดอยตุง ด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาและตัวดูดซับจากกกกลม โดยทำการทดลองแบบแบตช์และทำการทดลองแบบประยุกต์ใช้งานจริง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา คือ พีเอช 4 ปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 50 มิลลิกรัม/ลิตร ที่สภาวะดังกล่าวให้ผลร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 76.21 (คิดเป็น 0.953 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ) โดยแต่ละสีย้อมมีร้อยละการดูดซับ ดังนี้ สี 6% Super Black G 60.71%, 2% Turquoise H-GN 59.65%, 2% Yellow LS-4G 82.08%, 2% Yellow LS-R-01 82.35%, 2% Orange LS-BR 64.71%, 4% Navy LS-G 80.63%, 2% Red LS-B 84.21%, 2% Blue LS-3R 86.96% และ 2% Br.Blue LS-G 84.62%

ในขณะที่การใช้ตัวดูดซับจากกกกลมสามารถดูดซับสีย้อมได้ 6 ชนิด ดังนี้ สี 2% Yellow LS-4G 50.72%, 2% Yellow LS-R-01 55.87%, 4% Navy LS-G 52.02%, 2% Red LS-B 46.15%, 2% Blue LS-3R 38.24% และ 2% Br.Blue LS-G 42.98% ให้ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 56.14 (คิดเป็น 0.374 มิลลิกรัม/กรัมของตัวดูดซับ) ภายใต้สภาวะที่ พีเอช 7 ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัม ความเร็วรอบการเขย่า 50 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 15 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาตรฐานผสม 40 มิลลิกรัม/ลิตร

การดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีย้อมของแลงเมียร์มีค่ามากกว่าฟรุนดลิช แสดงว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาเป็นไปตามการดูดซับของแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า

ขณะที่ตัวดูดซับจากกกกลม สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับสีย้อมของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิชมีค่าใกล้เคียง

กัน แสดงว่ากลไกการดูดซับของตัวดูดซับจากกกกลมเป็นไปตามการดูดซับของทั้งแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ใกล้เคียงกัน

เมื่อทดลองบำบัดสีข้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยสูง ด้วยวิธีแบบแบตช์ พบว่า ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา สามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 66.00 และสามารถบำบัดมลสารอื่น ได้ดังนี้ TSS ลดลง 37.14%, TS ลดลง 30.84%, น้ำมันและไขมัน ลดลง 19.83% และ ค่าซีไอดี ลดลง 25.00%

ส่วนตัวดูดซับจากกกกลม สามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 34.20 สามารถบำบัดมลสารอื่น ได้ดังนี้ TSS ลดลง 41.58%, TS ลดลง 37.37%, น้ำมันและไขมัน ลดลง 78.41% และ ค่าซีไอดี ลดลง 25.00%

และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานจริงโดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา สามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 56.48 สามารถบำบัดมลสารอื่น ได้ดังนี้ TSS ลดลง 4.66%, TS ลดลง 3.58%, น้ำมันและไขมัน ลดลง 40.60% และ ค่าซีไอดี ลดลง 25.00%

ส่วนตัวดูดซับจากกกกลม สามารถบำบัดสีข้อมได้เฉลี่ยร้อยละ 31.95 สามารถบำบัดมลสารอื่น ได้ดังนี้ TSS ลดลง 8.40%, TS ลดลง 8.03%, น้ำมันและไขมัน ลดลง 45.06% และ ค่าซีไอดี ลดลง 50.00%

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสีของผักตบชวามีค่ามาก จึงควรมีการศึกษาการนำผักตบชวามาปลูกในแหล่งน้ำที่โรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาออยตุง ปล่อยทิ้ง ก่อนออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อเป็นบำบัดสีย้อมขั้นต้น อีกทั้งเมื่อผักตบชวาเจริญเติบโตเต็มที่ ทางโครงการพัฒนาออยตุง ก็สามารถนำผักตบชวามาเพิ่มมูลค่าให้เป็นผลิตภัณฑ์จักสานสำหรับตกแต่งบ้าน เป็นของใช้ หรือเครื่องประดับได้อีกด้วย

2. การบำบัดสีย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา และตัวดูดซับจากกกกกลม ในการทดลองครั้งนี้ มีข้อเสียในส่วนของคุณภาพน้ำเรื่องความขุ่นของน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของตัวดูดซับจากแบบผง เป็นการคัดขนาดของตัวดูดซับโดยการตัดเป็นท่อน หรือศึกษาขนาดอนุภาคที่เหมาะสม ที่สามารถจะลดข้อเสียเรื่องความขุ่นของน้ำลงได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ก้องเกียรติ์ เจริญธีรวงศ์. 2543. การปรับปรุงโครงสร้างของเซลลูโลสธรรมชาติด้วยวิธีเคมีเพื่อใช้บำบัดสีในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- โกวิทย์ คะลา. 2539. การเตรียมเยื่อแผ่นเซลลูโลสอะซิเตดสำหรับใช้งานด้านออสโมซิสผันกลับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิตรรา ดอกบัว. 2551. การศึกษาประสิทธิภาพเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและขานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์.
- จิระศักดิ์ แสงพุ่ม, เดชา นัตรศิริเวช และ วิจิตรา จงวิศาล. 2543. ผลของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับจากผักตบชวาสำหรับการดูดซับไอเบนซิน. วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยรังสิต 4(1): 48-54.
- จักริน ไหมศรี และ ธรรมนุญ เจริญสิทธิ์. 2543. การบำบัดตะกั่วไอออนจากน้ำทิ้งโรงงานแบตเตอรี่โดยใช้ผงผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธณิ เพ็ชรเสนา. 2524. การศึกษาอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ได้จากไมยราพยักษ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิตยา สมพิทักษ์. 2530. การใช้แผ่นเซลลูโลสในเตรตเป็นตัวบันทึกปริมาณเรดอนและเรดอนตัวลูกภายในอาคารบ้านเรือนที่บ้านคอยเต่า อำเภอคอยเต่า จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นรินาม. 2536. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วารสาร TTIS Textile Digest 8 ธันวาคม 2536: 20-21.

นิรนาม. 2537. อุตสาหกรรมย้อมผ้า. วารสาร TTIS Textile Digest 17 ก.ย. 2537: 13-16.

นันทยา ยานูเมศ. 2537. ความเป็นพิษและมลพิษของสีย้อมและสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. วารสารคัลเลอร์เวย์ 1(6): 27-41.

ปริศนา รักบำรุง. 2550. คุณลักษณะของเยื่อประกอบที่เตรียมจากเซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียและไลโดซานเพื่อกรองระดับอัลตราและนาโน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

เปล่งศักดิ์ ภูจักร. 2546. การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

พรพิมล นัตรปัญญานนท์. 2545. การศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารละลายสีย้อมผ้าด้วยโอโซนภายใต้ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วินัย สมบูรณ์. 2546. การดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยผงผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุรณี ทองสถิตย์. 2550. การเตรียมเยื่อแผ่นสังเคราะห์เซลลูโลสอะซิเตตที่ผสมแร่ดินมอนต์โมริล โลไนต์และการประยุกต์ใช้ในกระบวนการแยกสาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุมิตรา ภูมิสะอาด. 2523. การแยกเซลลูโลสจากพืชบางชนิดและการสังเคราะห์อนุพันธ์ของเซลลูโลส. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Abrahart, E.N. 1997. **Dyes and their Intermediates**. 2<sup>nd</sup> ed. Edward Arnold, Inc., London.

Joseph, M.L. 1986. **Introductory Textile Science**. McGraw-Hill, Inc., New York.

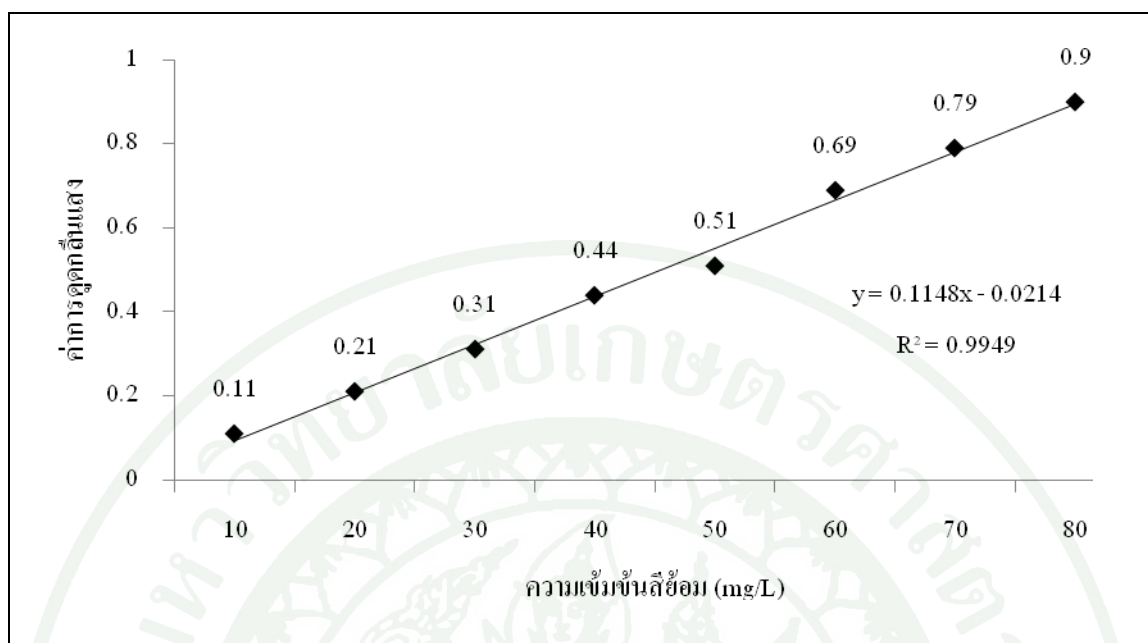
Kroschwitz, J.I. 1990. **Polymers: Fiber and Textiles**. John Wiley & Sons, Inc.,  
New York.

Sundstrom, D.W. and H.B. Klei, 1979. **Wastewater Treatment**. Prentice-Hall, Inc.,  
New Jersey.

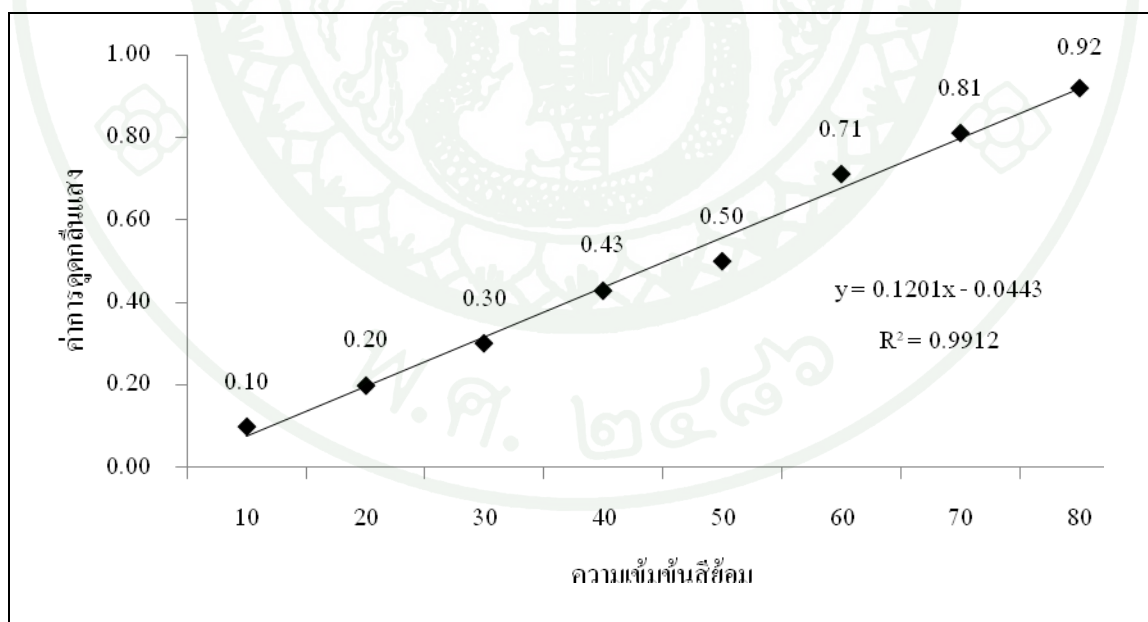




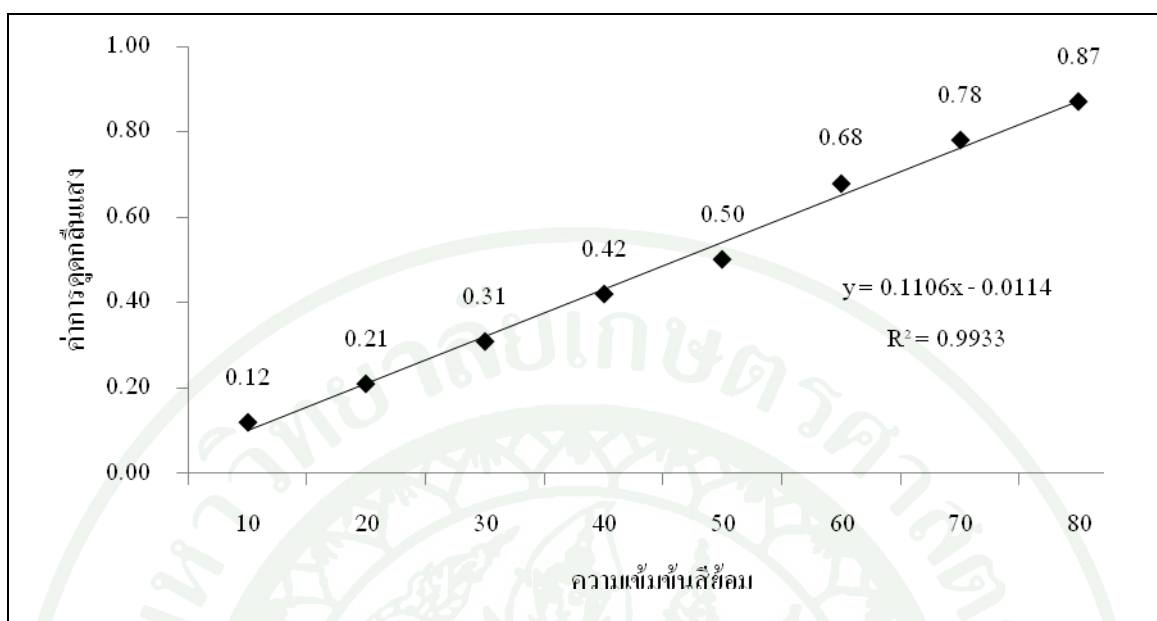




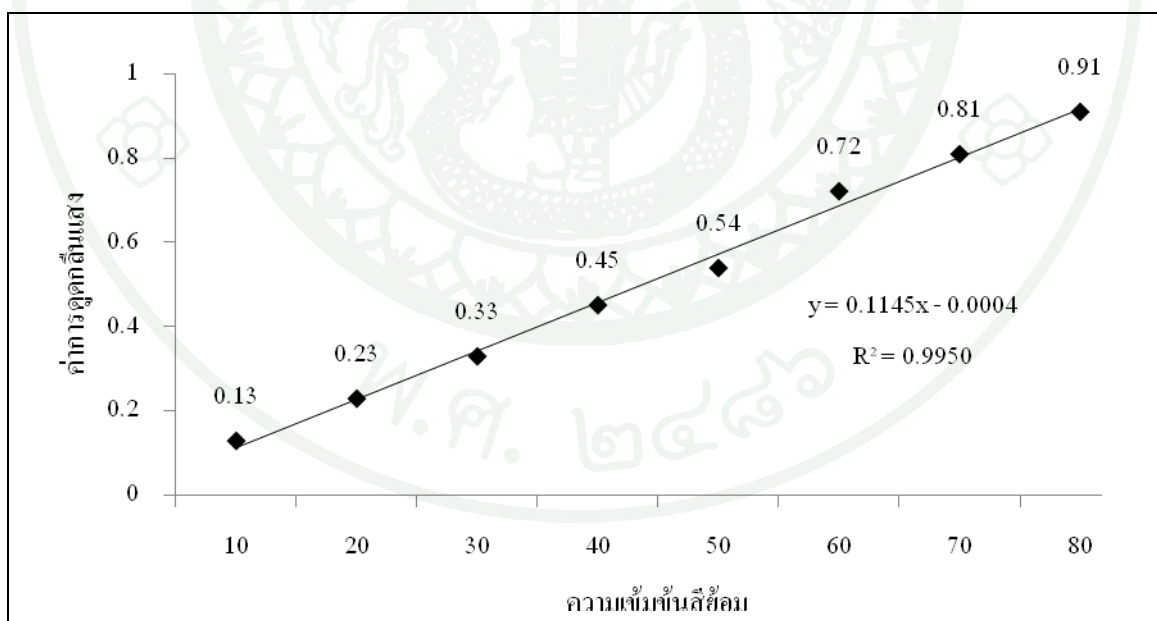
ภาพผนวกที่ 1 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 6% Super Black G ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร



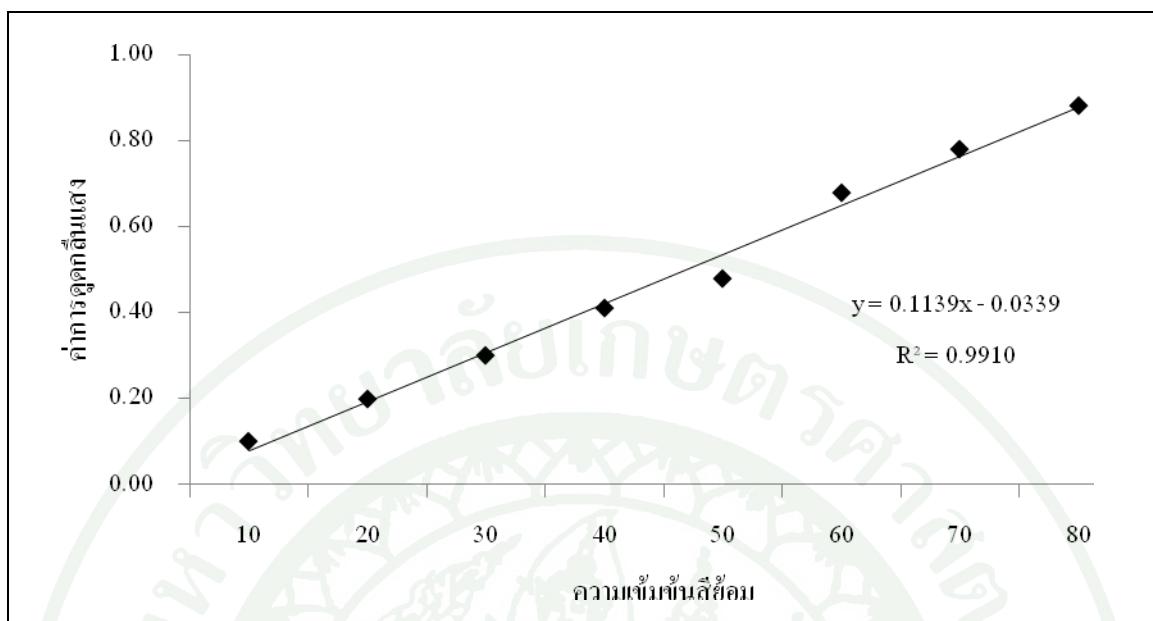
ภาพผนวกที่ 2 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 2% Turquoise H-GN ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



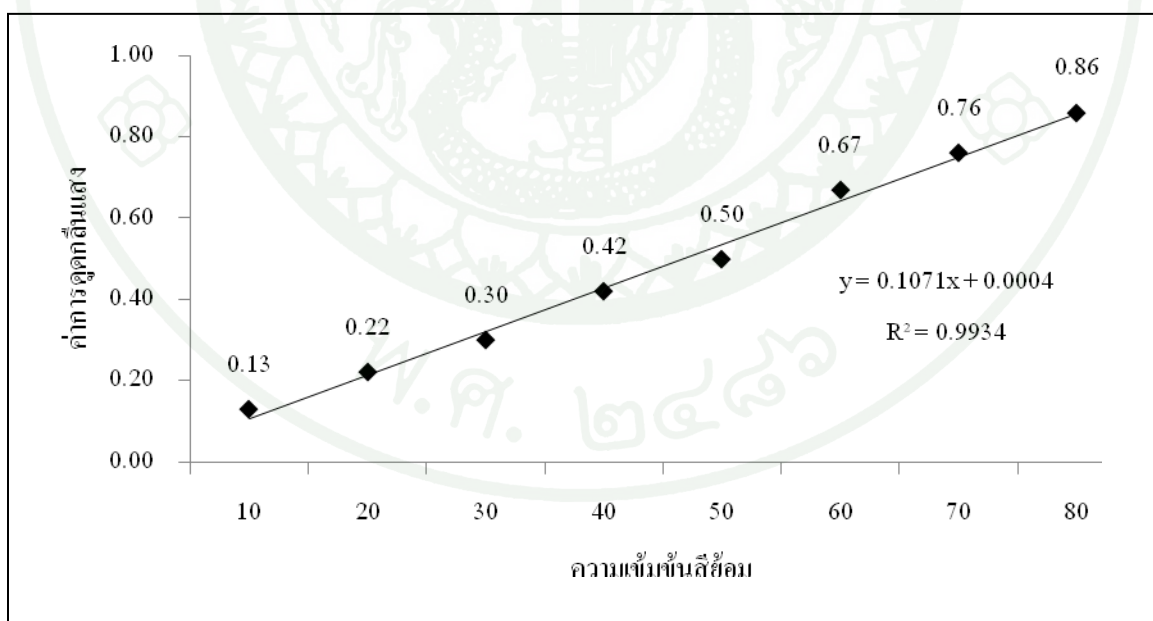
ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 2% Yellow LS-4G ที่ความยาวคลื่น 594 นาโนเมตร



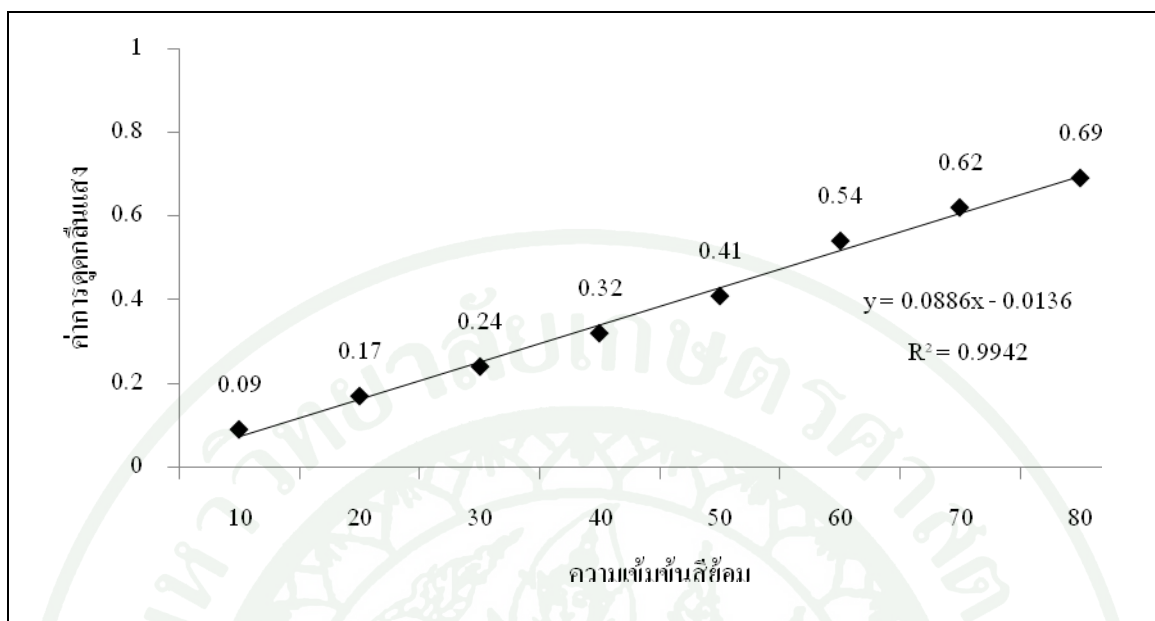
ภาพผนวกที่ 4 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 2% Yellow LS-R-01 ที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร



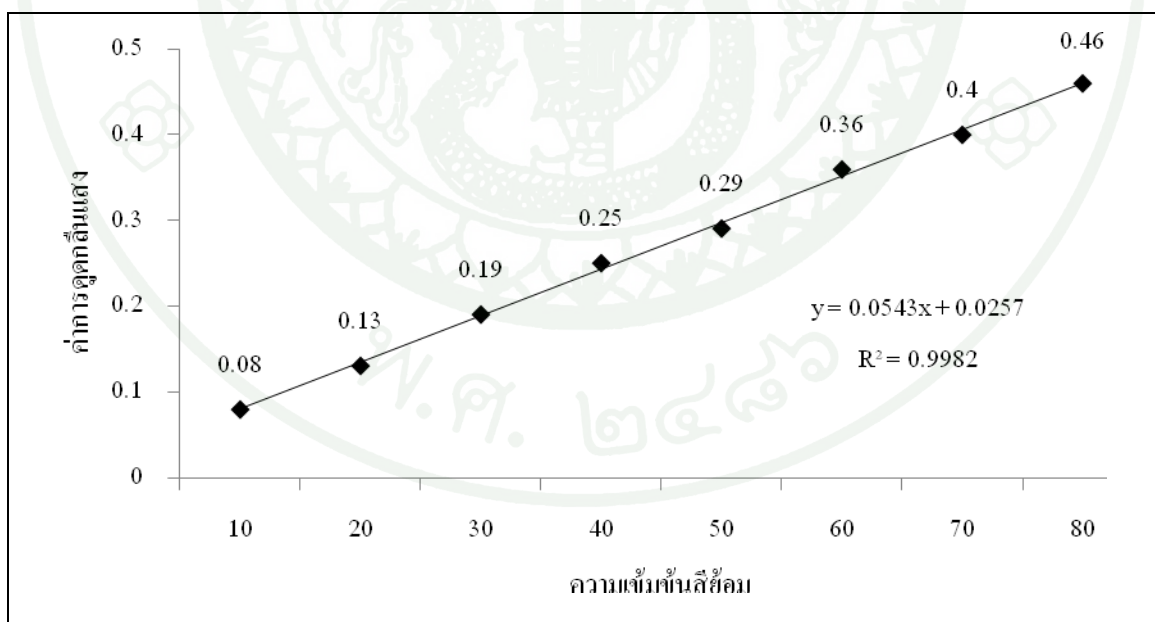
ภาพผนวกที่ 5 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 2% Orange LS-BR ที่ความยาวคลื่น 434 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 6 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นสี 4% Navy LS-G ที่ความยาวคลื่น 588 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 7 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 2% Red LS-B ที่ความยาวคลื่น 546 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 8 กราฟมาตรฐานแสดงอิทธิพลค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้น  
สี 2% Blue LS-3R ที่ความยาวคลื่น 666 นาโนเมตร



ตารางผนวกที่ 1 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ชนิดสีข้อม        | พีเอช 4                                         |                         | พีเอช 5                                         |                         | พีเอช 6.6                                       |                         | พีเอช 8                                         |                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/<br>ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูด<br>ซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/<br>ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูด<br>ซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/<br>ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูด<br>ซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/<br>ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูด<br>ซับ |
| 6% Super Black G  | 21.49                                           | 57.02                   | 21.98                                           | 56.03                   | 25.44                                           | 49.12                   | 22.77                                           | 54.46                   |
| 2% Turquoise H-GN | 24.15                                           | 51.70                   | 24.57                                           | 50.86                   | 28.45                                           | 43.10                   | 26.82                                           | 46.36                   |
| 2% Yellow LS-4G   | 13.54                                           | 72.92                   | 13.00                                           | 74.00                   | 16.83                                           | 66.35                   | 13.78                                           | 72.45                   |
| 2% Yellow LS-R-01 | 11.76                                           | 76.47                   | 12.75                                           | 74.51                   | 16.04                                           | 67.92                   | 13.24                                           | 73.53                   |
| 2% Orange LS-BR   | 20.37                                           | 59.26                   | 20.76                                           | 58.49                   | 23.61                                           | 52.78                   | 21.64                                           | 56.73                   |
| 4% Navy LS-G      | 13.00                                           | 74.00                   | 13.78                                           | 72.45                   | 17.65                                           | 64.71                   | 14.50                                           | 71.00                   |
| 2% Red LS-B       | 10.78                                           | 78.43                   | 11.00                                           | 78.00                   | 13.21                                           | 73.59                   | 10.78                                           | 78.43                   |
| 2% Blue LS-3R     | 10.87                                           | 78.26                   | 9.62                                            | 80.77                   | 11.11                                           | 77.78                   | 9.26                                            | 81.48                   |
| 2% Br.Blue LS-G   | 10.00                                           | 80.00                   | 9.26                                            | 81.48                   | 12.07                                           | 75.86                   | 10.71                                           | 78.57                   |

ตารางผนวกที่ 2 อิทธิพลของพีเอชต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ชนิดสีข้อม        | พีเอช 4                                     |                     | พีเอช 5                                     |                     | พีเอช 7                                     |                     | พีเอช 8                                     |                     |
|-------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------|---------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ร้อยละ<br>การดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 30.59                                       | 38.82               | 28.49                                       | 43.01               | 29.22                                       | 41.56               | 30.76                                       | 38.47               |
| 2% Yellow LS-R-01 | 28.26                                       | 43.48               | 27.81                                       | 44.38               | 28.29                                       | 43.42               | 30.07                                       | 39.86               |
| 4% Navy LS-G      | 29.23                                       | 41.54               | 30.00                                       | 40.00               | 29.58                                       | 40.85               | 30.15                                       | 39.71               |
| 2% Red LS-B       | 32.35                                       | 35.29               | 32.08                                       | 35.85               | 32.09                                       | 35.82               | 33.96                                       | 32.08               |
| 2% Blue LS-3R     | 42.17                                       | 15.67               | 34.59                                       | 30.81               | 34.50                                       | 31.00               | 36.89                                       | 26.22               |
| 2% Br.Blue LS-G   | 36.18                                       | 27.65               | 33.72                                       | 32.56               | 31.67                                       | 36.67               | 35.38                                       | 29.23               |

ตารางผนวกที่ 3 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ชนิดสีย้อม        | 0 รอบต่อนาที                                    |                         | 50 รอบต่อนาที                                   |                         | 100 รอบต่อนาที                                  |                         | 150 รอบต่อนาที                                  |                         | 200 รอบต่อนาที                                  |                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ |
| 6% Super Black G  | 22.95                                           | 54.10                   | 20.90                                           | 58.20                   | 21.49                                           | 57.02                   | 20.64                                           | 58.73                   | 21.37                                           | 57.26                   |
| 2% Turquoise H-GN | 24.60                                           | 50.79                   | 22.22                                           | 55.56                   | 24.15                                           | 51.70                   | 23.81                                           | 52.38                   | 25.40                                           | 49.19                   |
| 2% Yellow LS-4G   | 15.82                                           | 68.37                   | 10.50                                           | 79.00                   | 13.54                                           | 72.92                   | 11.50                                           | 77.00                   | 13.27                                           | 73.47                   |
| 2% Yellow LS-R-01 | 14.42                                           | 71.15                   | 10.10                                           | 79.81                   | 11.76                                           | 76.47                   | 11.32                                           | 77.36                   | 12.76                                           | 74.49                   |
| 2% Orange LS-BR   | 22.32                                           | 55.36                   | 18.86                                           | 62.28                   | 20.37                                           | 59.26                   | 20.61                                           | 58.77                   | 20.69                                           | 58.62                   |
| 4% Navy LS-G      | 15.82                                           | 68.37                   | 11.98                                           | 76.04                   | 13.00                                           | 74.00                   | 12.50                                           | 75.00                   | 13.73                                           | 72.55                   |
| 2% Red LS-B       | 13.02                                           | 73.96                   | 9.69                                            | 80.61                   | 10.78                                           | 78.43                   | 11.50                                           | 77.00                   | 12.00                                           | 76.00                   |
| 2% Blue LS-3R     | 15.22                                           | 69.57                   | 10.87                                           | 78.26                   | 10.87                                           | 78.26                   | 11.96                                           | 76.09                   | 14.58                                           | 70.83                   |
| 2% Br.Blue LS-G   | 15.38                                           | 69.23                   | 10.00                                           | 80.00                   | 10.00                                           | 80.00                   | 10.58                                           | 78.85                   | 11.11                                           | 77.78                   |

ตารางผนวกที่ 4 อิทธิพลของความเร็วรอบการเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ชนิดสีย้อม        | 0 รอบต่อนาที                                    |                         | 50 รอบต่อนาที                                   |                         | 100 รอบต่อนาที                                  |                         | 150 รอบต่อนาที                                  |                         | 200 รอบต่อนาที                                  |                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 25.20                                           | 49.60                   | 21.35                                           | 57.30                   | 21.62                                           | 56.76                   | 24.32                                           | 51.35                   | 27.43                                           | 45.14                   |
| 2% Yellow LS-R-01 | 23.57                                           | 52.86                   | 18.83                                           | 62.34                   | 19.48                                           | 61.04                   | 21.17                                           | 57.66                   | 24.03                                           | 51.95                   |
| 4% Navy LS-G      | 25.34                                           | 49.32                   | 20.96                                           | 58.08                   | 21.44                                           | 57.12                   | 23.97                                           | 52.06                   | 26.23                                           | 47.53                   |
| 2% Red LS-B       | 28.45                                           | 43.10                   | 26.72                                           | 46.55                   | 27.59                                           | 44.83                   | 32.16                                           | 35.69                   | 37.93                                           | 24.14                   |
| 2% Blue LS-3R     | 32.05                                           | 35.90                   | 28.21                                           | 43.59                   | 28.21                                           | 43.59                   | 31.15                                           | 37.69                   | 34.10                                           | 31.80                   |
| 2% Br.Blue LS-G   | 28.26                                           | 43.49                   | 24.77                                           | 50.47                   | 25.93                                           | 48.14                   | 28.60                                           | 42.79                   | 32.56                                           | 34.88                   |

ตารางผนวกที่ 5 อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ชนิดสีย้อม        | 15 นาที   | 30 นาที   | 45 นาที   | 60 นาที   | 75 นาที   | 90 นาที   | 105 นาที  | 120 นาที  |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    |
|                   | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ |
| 6% Super Black G  | 57.38     | 59.65     | 57.38     | 58.06     | 58.06     | 51.69     | 59.68     | 57.63     |
| 2% Turquoise H-GN | 48.33     | 55.93     | 51.61     | 53.23     | 53.23     | 50.00     | 51.67     | 51.61     |
| 2% Yellow LS-4G   | 72.92     | 79.35     | 75.00     | 73.96     | 75.53     | 72.34     | 75.00     | 73.40     |
| 2% Yellow LS-R-01 | 74.00     | 80.61     | 76.00     | 76.00     | 79.00     | 75.00     | 78.00     | 75.51     |
| 2% Orange LS-BR   | 60.71     | 62.75     | 60.71     | 62.50     | 62.50     | 58.93     | 63.64     | 60.71     |
| 4% Navy LS-G      | 73.40     | 78.26     | 74.47     | 74.47     | 73.91     | 71.74     | 73.91     | 73.91     |
| 2% Red LS-B       | 75.58     | 82.22     | 76.19     | 77.38     | 78.57     | 75.00     | 78.05     | 76.83     |
| 2% Blue LS-3R     | 73.91     | 80.43     | 77.08     | 77.08     | 79.17     | 77.08     | 83.33     | 81.25     |
| 2% Br.Blue LS-G   | 81.48     | 80.00     | 80.77     | 80.77     | 80.77     | 76.00     | 80.77     | 78.85     |

ตารางผนวกที่ 6 อิทธิพลของระยะเวลาเขย่าต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ชนิดสีข้อม        | 15 นาที   | 30 นาที   | 45 นาที   | 60 นาที   | 75 นาที   | 90 นาที   | 105 นาที  | 120 นาที  |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                   | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    | ร้อยละ    |
|                   | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ | การดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 57.69     | 56.41     | 57.69     | 57.69     | 62.82     | 61.54     | 58.97     | 56.41     |
| 2% Yellow LS-R-01 | 62.34     | 61.04     | 62.34     | 64.94     | 64.94     | 63.64     | 62.34     | 61.04     |
| 4% Navy LS-G      | 58.90     | 58.90     | 58.90     | 60.27     | 63.01     | 61.64     | 57.53     | 57.53     |
| 2% Red LS-B       | 48.21     | 44.64     | 44.64     | 46.43     | 46.43     | 46.43     | 41.07     | 37.50     |
| 2% Blue LS-3R     | 46.15     | 43.59     | 46.15     | 47.95     | 46.15     | 42.82     | 39.49     | 35.90     |
| 2% Br.Blue LS-G   | 52.38     | 52.38     | 52.38     | 52.38     | 54.76     | 52.38     | 50.00     | 45.24     |

ตารางผนวกที่ 7 อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ชนิดสีย้อม        | 0 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที | 120 นาที | 150 นาที | 180 นาที | 210 นาที | 240 นาที |
|-------------------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                   | ร้อยละ | ร้อยละ  | ร้อยละ  | ร้อยละ  | ร้อยละ   | ร้อยละ   | ร้อยละ   | ร้อยละ   | ร้อยละ   |
|                   | การ    | การ     | การ     | การ     | การ      | การ      | การ      | การ      | การ      |
|                   | ดูดซับ | ดูดซับ  | ดูดซับ  | ดูดซับ  | ดูดซับ   | ดูดซับ   | ดูดซับ   | ดูดซับ   | ดูดซับ   |
| 6% Super Black G  | 52.54  | 55.17   | 55.00   | 60.00   | 61.67    | 61.82    | 61.82    | 62.50    | 62.50    |
| 2% Turquoise H-GN | 52.46  | 53.33   | 54.10   | 56.67   | 58.33    | 58.93    | 58.93    | 58.93    | 58.93    |
| 2% Yellow LS-4G   | 73.33  | 75.00   | 75.56   | 79.55   | 79.07    | 79.17    | 81.25    | 81.25    | 80.85    |
| 2% Yellow LS-R-01 | 77.08  | 78.72   | 78.72   | 80.43   | 82.61    | 82.35    | 84.62    | 84.31    | 83.67    |
| 2% Orange LS-BR   | 55.56  | 57.41   | 58.18   | 63.64   | 65.45    | 66.67    | 66.67    | 66.67    | 66.67    |
| 4% Navy LS-G      | 72.73  | 75.00   | 74.42   | 79.07   | 79.07    | 80.85    | 80.43    | 82.98    | 82.61    |
| 2% Red LS-B       | 76.92  | 76.92   | 79.49   | 82.05   | 81.58    | 81.58    | 81.08    | 81.58    | 81.58    |
| 2% Blue LS-3R     | 75.00  | 75.00   | 78.26   | 82.61   | 82.61    | 83.33    | 83.33    | 83.33    | 82.61    |
| 2% Br.Blue LS-G   | 73.08  | 73.08   | 76.00   | 80.00   | 80.00    | 80.77    | 84.62    | 84.62    | 84.00    |

ตารางผนวกที่ 8 อิทธิพลของระยะเวลาเข้าสู่สมดุลต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

|                   | 0 นาที          | 30 นาที         | 60 นาที         | 90 นาที         | 120 นาที        | 150 นาที        | 180 นาที        | 210 นาที        | 240 นาที        |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ชนิดสีย้อม        | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 54.55           | 58.44           | 59.74           | 61.04           | 61.04           | 66.67           | 62.67           | 54.67           | 56.00           |
| 2% Yellow LS-R-01 | 60.76           | 63.29           | 64.56           | 64.56           | 65.82           | 68.83           | 64.94           | 59.74           | 50.65           |
| 4% Navy LS-G      | 55.26           | 59.21           | 59.21           | 59.21           | 60.53           | 64.79           | 60.56           | 53.52           | 52.11           |
| 2% Red LS-B       | 47.37           | 49.12           | 47.36           | 47.37           | 45.61           | 47.27           | 43.64           | 32.73           | 30.91           |
| 2% Blue LS-3R     | 47.37           | 47.37           | 47.37           | 47.37           | 50.00           | 48.72           | 41.03           | 30.77           | 25.64           |
| 2% Br.Blue LS-G   | 51.22           | 53.66           | 53.66           | 53.66           | 56.10           | 58.14           | 51.16           | 39.53           | 34.88           |

ตารางผนวกที่ 9 อิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อมต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกากลำต้นผักตบชวา

|                   | 10 ppm | 20 ppm | 30 ppm | 40 ppm | 50 ppm | 60 ppm | 70 ppm | 80 ppm |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ชนิดสีย้อม        | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ | ร้อยละ |
|                   | การ    | การ    | การ    | การ    | การ    | การ    | การ    | การ    |
|                   | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ | ดูดซับ |
| 6% Super Black G  | 0.00   | 43.48  | 50.00  | 58.04  | 60.38  | 65.71  | 62.82  | 60.20  |
| 2% Turquoise H-GN | -35.83 | 29.17  | 44.12  | 54.17  | 58.18  | 61.43  | 63.53  | 65.00  |
| 2% Yellow LS-4G   | 70.00  | 76.19  | 76.45  | 80.95  | 80.39  | 72.54  | 70.42  | 68.98  |
| 2% Yellow LS-R-01 | 71.33  | 72.73  | 75.76  | 80.21  | 80.77  | 74.13  | 72.31  | 71.24  |
| 2% Orange LS-BR   | 9.09   | 47.62  | 54.84  | 62.79  | 64.00  | 67.69  | 66.22  | 63.12  |
| 4% Navy LS-G      | 66.92  | 71.43  | 74.67  | 78.57  | 79.17  | 71.67  | 69.44  | 67.86  |
| 2% Red LS-B       | 63.33  | 76.47  | 79.17  | 81.25  | 82.05  | 78.00  | 75.44  | 74.29  |
| 2% Blue LS-3R     | 71.43  | 81.82  | 82.35  | 82.61  | 89.00  | 92.86  | 91.18  | 87.50  |
| 2% Br.Blue LS-G   | 62.50  | 72.50  | 72.22  | 79.17  | 82.14  | 84.38  | 83.33  | 79.07  |

ตารางผนวกที่ 10 อิทธิพลของความเข้มข้นสีย้อมต่อร้อยละการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับจากกกกล่ม

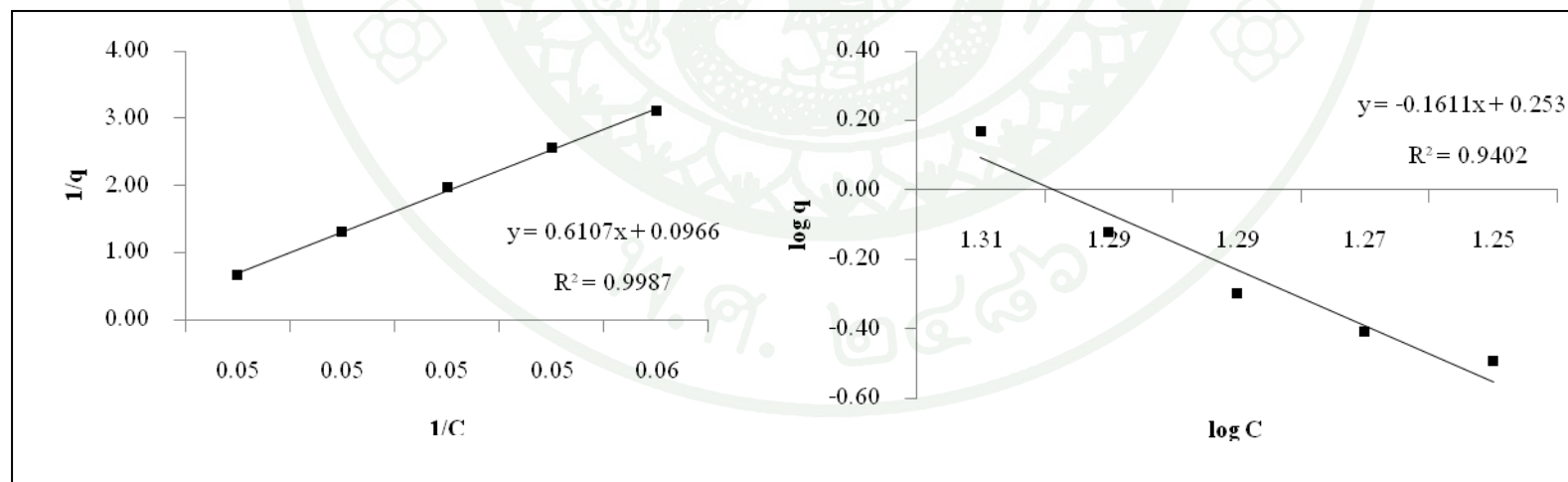
|                   | 10 ppm          | 20 ppm          | 30 ppm          | 40 ppm          | 50 ppm          | 60 ppm          | 70 ppm          | 80 ppm          |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ชนิดสีย้อม        | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ | ร้อยละการดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 7.14            | 51.61           | 56.52           | 58.33           | 51.25           | 48.94           | 47.71           | 43.65           |
| 2% Yellow LS-R-01 | 29.41           | 58.82           | 62.50           | 64.06           | 59.52           | 55.56           | 55.17           | 50.00           |
| 4% Navy LS-G      | 6.67            | 53.33           | 57.78           | 59.32           | 54.55           | 51.61           | 50.93           | 48.00           |
| 2% Red LS-B       | -50.00          | 25.00           | 47.06           | 50.00           | 45.52           | 44.29           | 43.21           | 42.55           |
| 2% Blue LS-3R     | -14.29          | 43.75           | 45.45           | 50.00           | 48.78           | 46.94           | 46.43           | 46.15           |
| 2% Br.Blue LS-G   | 0.00            | 43.75           | 52.00           | 53.13           | 52.38           | 50.98           | 50.82           | 50.00           |

ตารางผนวกที่ 11 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ชนิดสีข้อม        | 1 กรัม                                          |                         | 2 กรัม                                          |                         | 3 กรัม                                          |                         | 4 กรัม                                          |                         | 5 กรัม                                          |                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ |
| 6% Super Black G  | 20.54                                           | 58.93                   | 19.65                                           | 60.71                   | 19.65                                           | 60.71                   | 18.75                                           | 62.50                   | 17.86                                           | 64.29                   |
| 2% Turquoise H-GN | 18.42                                           | 63.16                   | 20.18                                           | 59.65                   | 19.30                                           | 61.40                   | 20.18                                           | 59.65                   | 20.18                                           | 59.65                   |
| 2% Yellow LS-4G   | 14.90                                           | 70.21                   | 8.96                                            | 82.08                   | 6.88                                            | 86.25                   | 6.73                                            | 86.53                   | 6.64                                            | 86.73                   |
| 2% Yellow LS-R-01 | 14.02                                           | 71.96                   | 8.82                                            | 82.35                   | 6.87                                            | 86.27                   | 6.18                                            | 87.65                   | 6.38                                            | 87.25                   |
| 2% Orange LS-BR   | 18.63                                           | 62.75                   | 17.65                                           | 64.71                   | 18.63                                           | 62.75                   | 21.57                                           | 56.86                   | 23.53                                           | 52.94                   |
| 4% Navy LS-G      | 14.90                                           | 70.21                   | 9.69                                            | 80.63                   | 7.29                                            | 85.42                   | 7.29                                            | 85.42                   | 7.81                                            | 84.38                   |
| 2% Red LS-B       | 11.84                                           | 76.32                   | 7.90                                            | 84.21                   | 6.58                                            | 86.84                   | 7.69                                            | 84.62                   | 8.98                                            | 82.05                   |
| 2% Blue LS-3R     | 8.70                                            | 82.61                   | 6.52                                            | 86.96                   | 6.52                                            | 86.96                   | 8.34                                            | 83.33                   | 8.34                                            | 83.33                   |
| 2% Br.Blue LS-G   | 11.54                                           | 76.92                   | 7.69                                            | 84.62                   | 8.85                                            | 82.31                   | 9.62                                            | 80.77                   | 9.62                                            | 80.77                   |

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 6% Super Black G ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

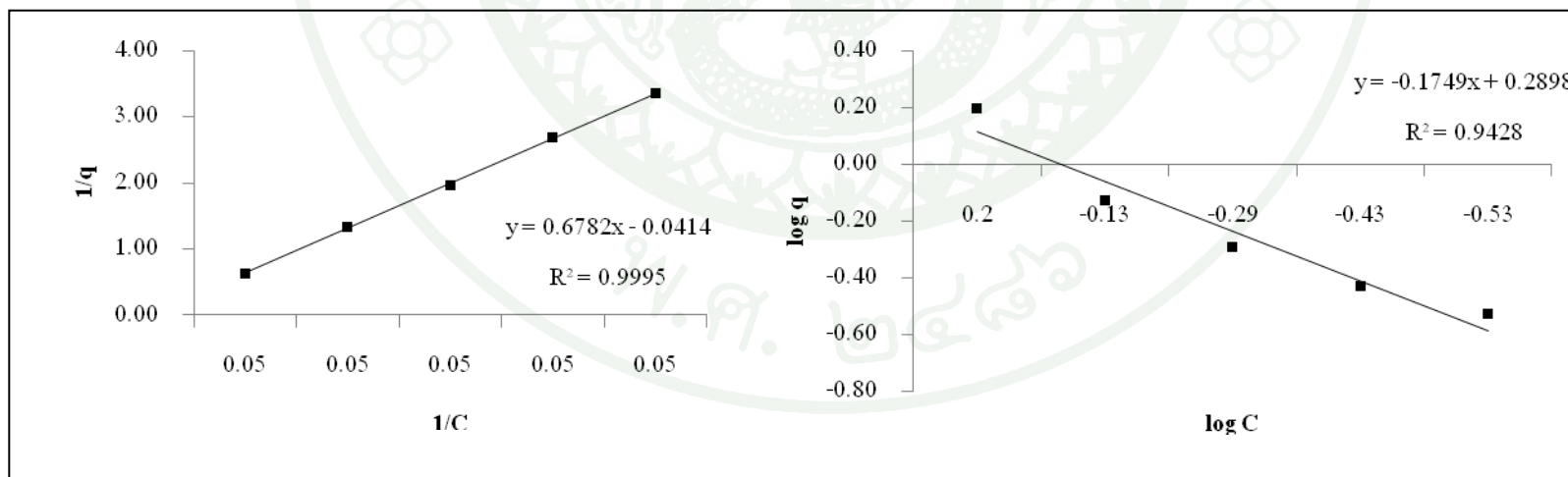
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา (กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                          | 50 | 20.54 | 0.05  | 1.47 | 0.05 | 0.68 | 1.31  | 0.17  |
| 2                                          | 50 | 19.64 | 0.05  | 0.76 | 0.05 | 1.32 | 1.29  | -0.12 |
| 3                                          | 50 | 19.64 | 0.05  | 0.51 | 0.05 | 1.98 | 1.29  | -0.30 |
| 4                                          | 50 | 18.75 | 0.05  | 0.39 | 0.05 | 2.56 | 1.27  | -0.41 |
| 5                                          | 50 | 17.86 | 0.05  | 0.32 | 0.06 | 3.11 | 1.25  | -0.49 |



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 6% Super Black G

ตารางผนวกที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

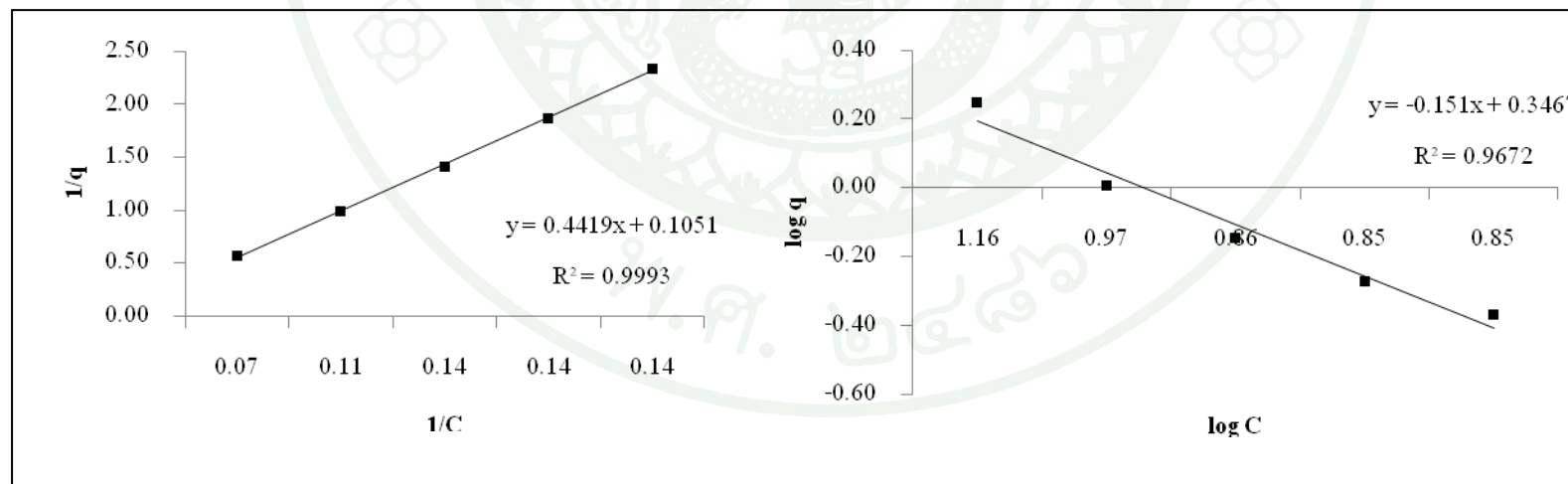
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา (กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                          | 50 | 18.42 | 0.05  | 1.58 | 0.05 | 0.63 | 1.27  | 0.20  |
| 2                                          | 50 | 20.18 | 0.05  | 0.75 | 0.05 | 1.34 | 1.30  | -0.13 |
| 3                                          | 50 | 19.30 | 0.05  | 0.51 | 0.05 | 1.95 | 1.29  | -0.29 |
| 4                                          | 50 | 20.18 | 0.05  | 0.37 | 0.05 | 2.68 | 1.30  | -0.43 |
| 5                                          | 50 | 20.18 | 0.05  | 0.30 | 0.05 | 3.35 | 1.30  | -0.53 |



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Turquoise H-GN

ตารางผนวกที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

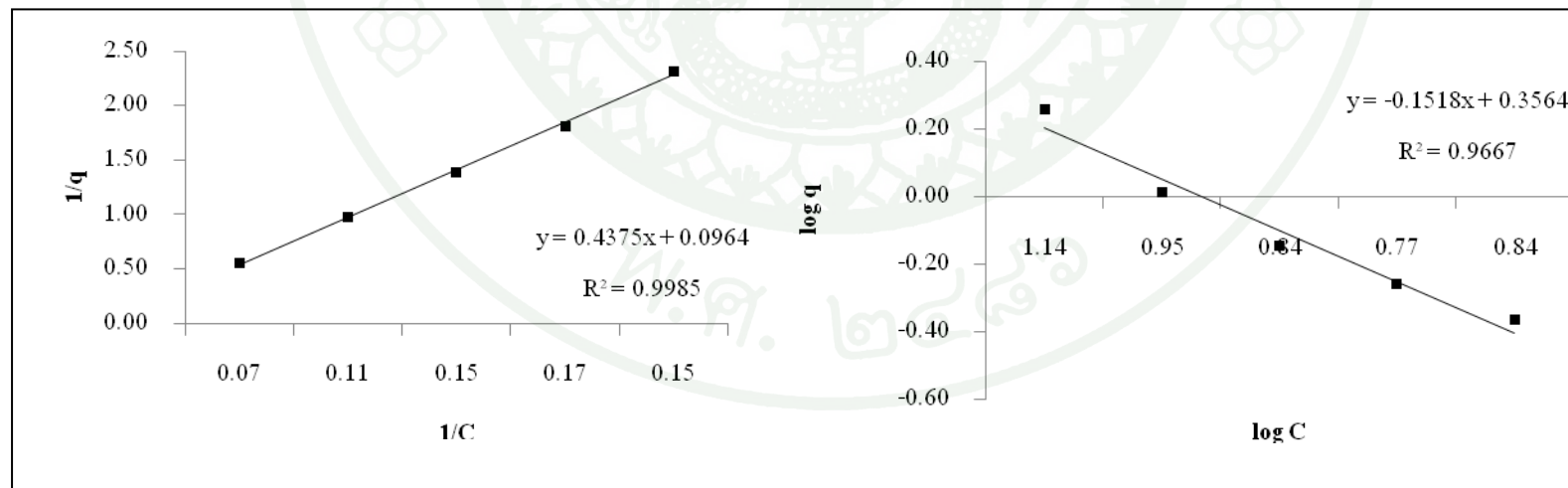
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา (กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                          | 50 | 14.58 | 0.05  | 1.77 | 0.07 | 0.56 | 1.16  | 0.25  |
| 2                                          | 50 | 9.38  | 0.05  | 1.02 | 0.11 | 0.98 | 0.97  | 0.01  |
| 3                                          | 50 | 7.29  | 0.05  | 0.71 | 0.14 | 1.40 | 0.86  | -0.15 |
| 4                                          | 50 | 7.14  | 0.05  | 0.54 | 0.14 | 1.87 | 0.85  | -0.27 |
| 5                                          | 50 | 7.14  | 0.05  | 0.43 | 0.14 | 2.33 | 0.85  | -0.37 |



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G

ตารางผนวกที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

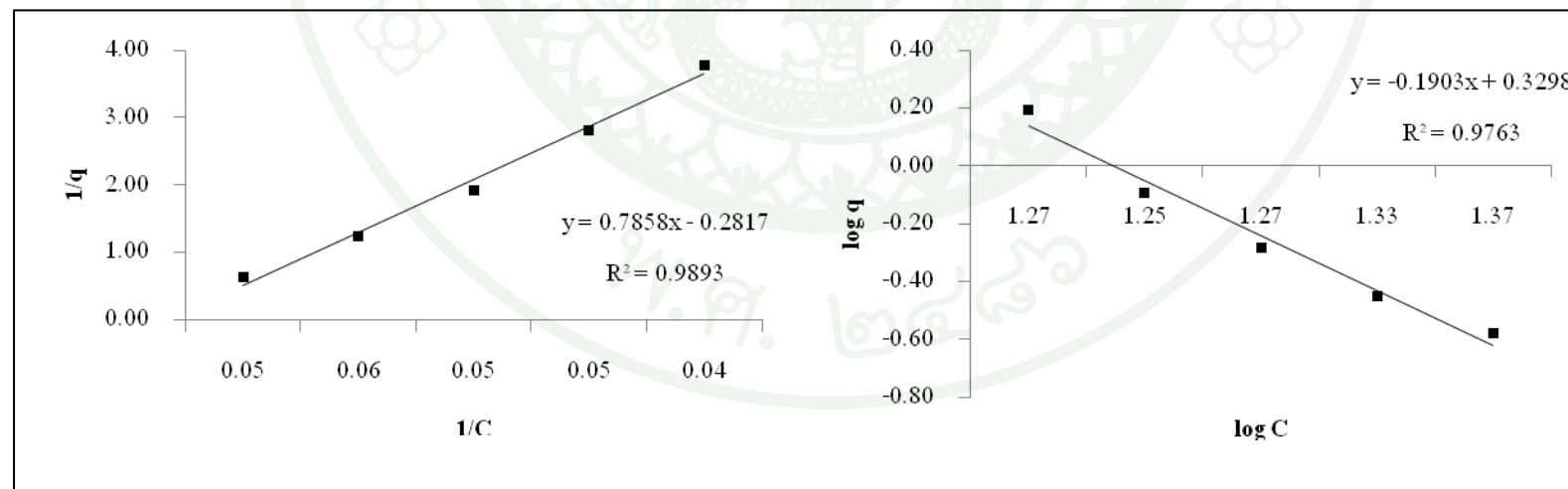
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                         | 50 | 13.73 | 0.05  | 1.81 | 0.07 | 0.55 | 1.14  | 0.26  |
| 2                                         | 50 | 8.82  | 0.05  | 1.03 | 0.11 | 0.97 | 0.95  | 0.01  |
| 3                                         | 50 | 6.86  | 0.05  | 0.72 | 0.15 | 1.39 | 0.84  | -0.14 |
| 4                                         | 50 | 5.88  | 0.05  | 0.55 | 0.17 | 1.81 | 0.77  | -0.26 |
| 5                                         | 50 | 6.86  | 0.05  | 0.43 | 0.15 | 2.32 | 0.84  | -0.37 |



ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01

ตารางผนวกที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Orange LS-BR ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

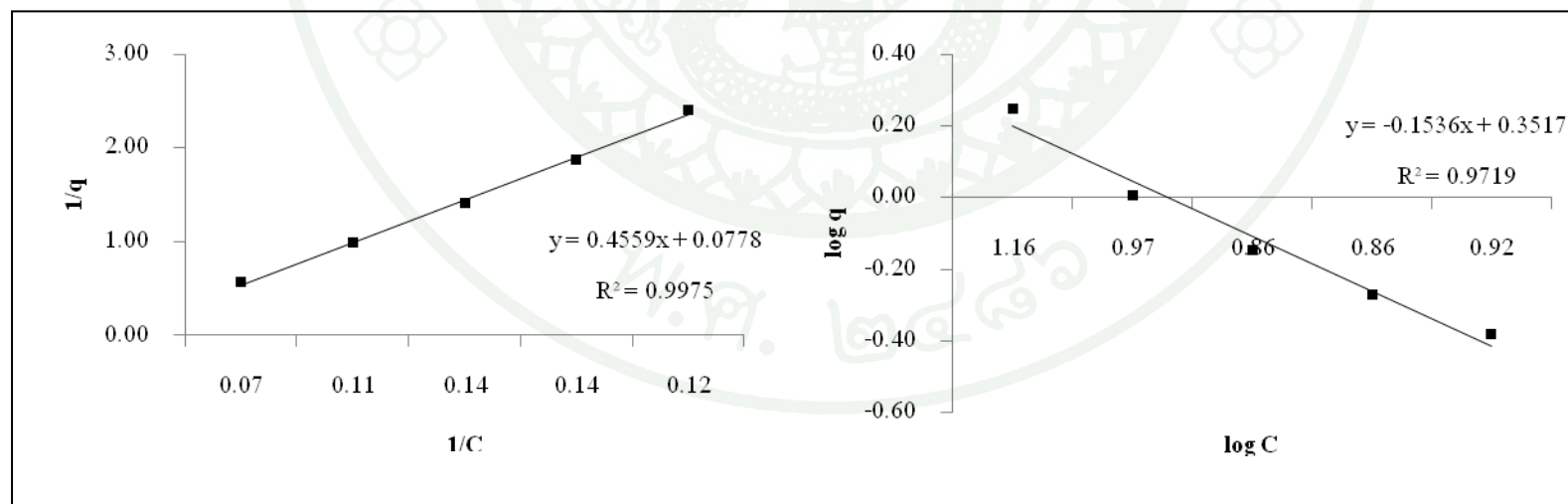
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา (กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                          | 50 | 18.63 | 0.05  | 1.57 | 0.05 | 0.64 | 1.27  | 0.20  |
| 2                                          | 50 | 17.65 | 0.05  | 0.81 | 0.06 | 1.24 | 1.25  | -0.09 |
| 3                                          | 50 | 18.63 | 0.05  | 0.52 | 0.05 | 1.91 | 1.27  | -0.28 |
| 4                                          | 50 | 21.57 | 0.05  | 0.36 | 0.05 | 2.81 | 1.33  | -0.45 |
| 5                                          | 50 | 23.53 | 0.05  | 0.26 | 0.04 | 3.78 | 1.37  | -0.58 |



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Orange LS-BR

ตารางผนวกที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 4% Navy LS-G ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

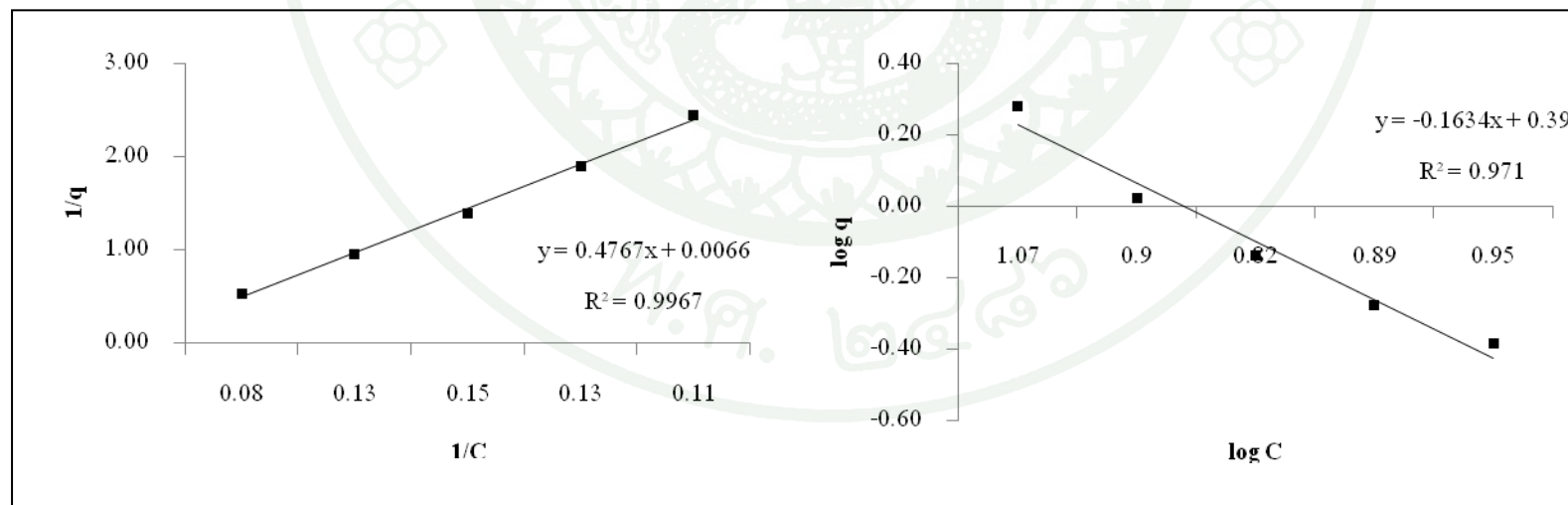
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                         | 50 | 14.58 | 0.05  | 1.77 | 0.07 | 0.56 | 1.16  | 0.25  |
| 2                                         | 50 | 9.38  | 0.05  | 1.02 | 0.11 | 0.98 | 0.97  | 0.01  |
| 3                                         | 50 | 7.29  | 0.05  | 0.71 | 0.14 | 1.40 | 0.86  | -0.15 |
| 4                                         | 50 | 7.29  | 0.05  | 0.53 | 0.14 | 1.87 | 0.86  | -0.27 |
| 5                                         | 50 | 8.33  | 0.05  | 0.42 | 0.12 | 2.40 | 0.92  | -0.38 |



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 4% Navy LS-G

ตารางผนวกที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Red LS-B ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

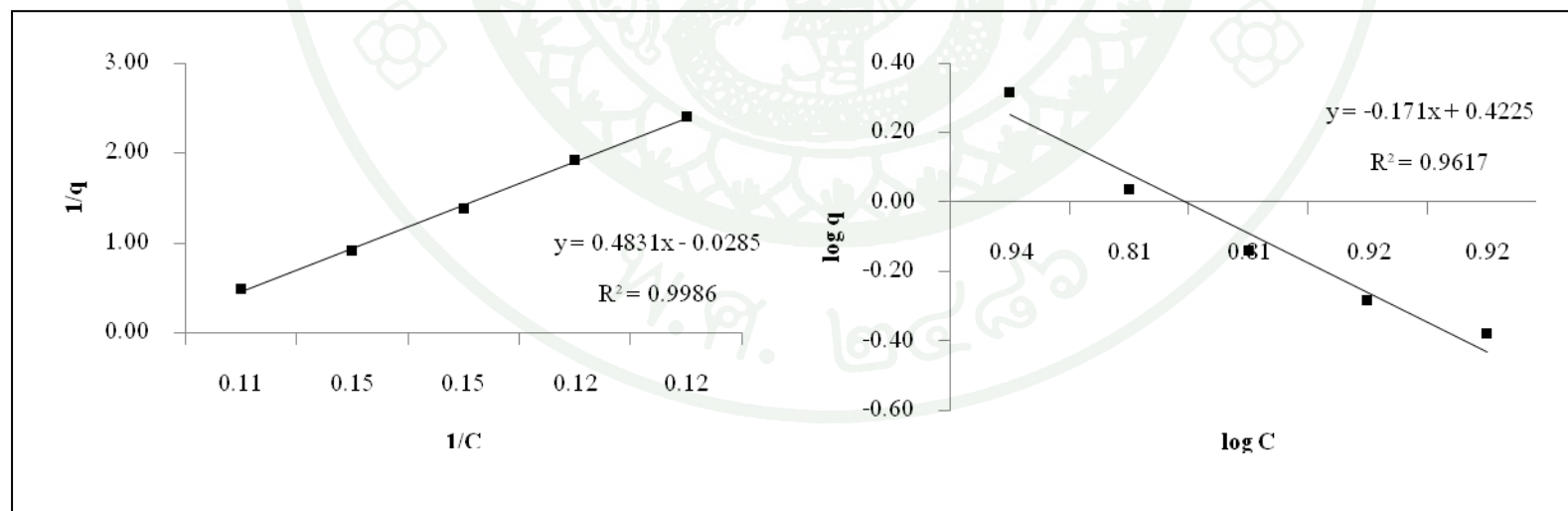
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา (กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|--------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                          | 50 | 11.84 | 0.05  | 1.91 | 0.08 | 0.52 | 1.07  | 0.28  |
| 2                                          | 50 | 7.89  | 0.05  | 1.05 | 0.13 | 0.95 | 0.90  | 0.02  |
| 3                                          | 50 | 6.58  | 0.05  | 0.72 | 0.15 | 1.38 | 0.82  | -0.14 |
| 4                                          | 50 | 7.69  | 0.05  | 0.53 | 0.13 | 1.89 | 0.89  | -0.28 |
| 5                                          | 50 | 8.97  | 0.05  | 0.41 | 0.11 | 2.44 | 0.95  | -0.39 |



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Red LS-B

ตารางผนวกที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

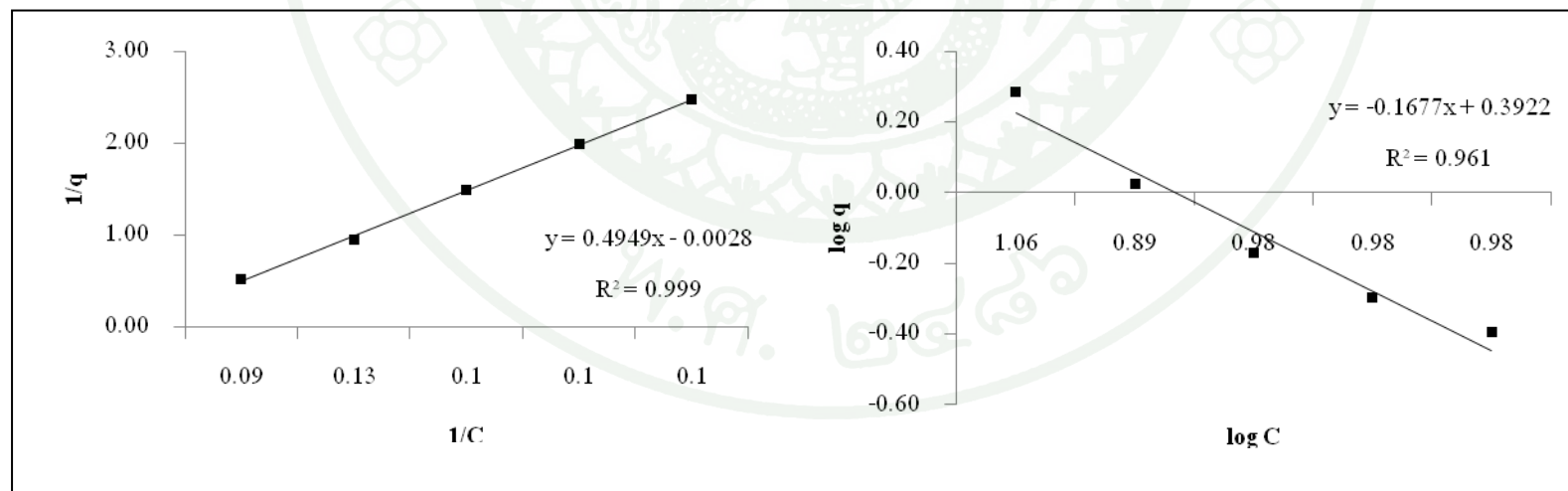
| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา(กรัม) | Co | C    | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-------------------------------------------|----|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                         | 50 | 8.70 | 0.05  | 2.07 | 0.11 | 0.48 | 0.94  | 0.31  |
| 2                                         | 50 | 6.52 | 0.05  | 1.09 | 0.15 | 0.92 | 0.81  | 0.04  |
| 3                                         | 50 | 6.52 | 0.05  | 0.72 | 0.15 | 1.38 | 0.81  | -0.14 |
| 4                                         | 50 | 8.33 | 0.05  | 0.52 | 0.12 | 1.92 | 0.92  | -0.28 |
| 5                                         | 50 | 8.33 | 0.05  | 0.42 | 0.12 | 2.40 | 0.92  | -0.38 |



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R

ตารางผนวกที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ของตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวา

| ปริมาณตัวดูดซับจาก<br>ลำต้นผักตบชวา(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-------------------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                         | 50 | 11.54 | 0.05  | 1.92 | 0.09 | 0.52 | 1.06  | 0.28  |
| 2                                         | 50 | 7.69  | 0.05  | 1.06 | 0.13 | 0.95 | 0.89  | 0.02  |
| 3                                         | 50 | 9.62  | 0.05  | 0.67 | 0.10 | 1.49 | 0.98  | -0.17 |
| 4                                         | 50 | 9.62  | 0.05  | 0.50 | 0.10 | 1.98 | 0.98  | -0.30 |
| 5                                         | 50 | 9.62  | 0.05  | 0.40 | 0.10 | 2.48 | 0.98  | -0.39 |



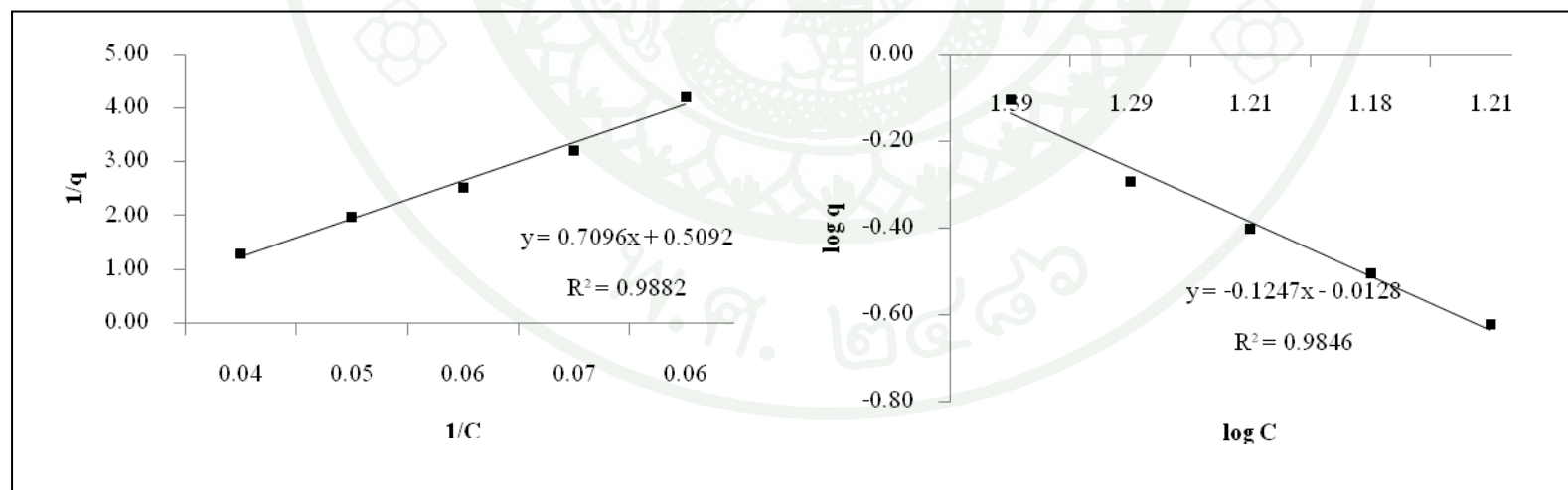
ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากลำต้นผักตบชวาในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G

ตารางผนวกที่ 21 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อร้อยละการดูดซับสีของตัวดูดซับจากกกกลม

| ชนิดสีย้อม        | 1 กรัม                                          |                         | 2 กรัม                                          |                         | 3 กรัม                                          |                         | 4 กรัม                                          |                         | 5 กรัม                                          |                         |
|-------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|
|                   | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ | ความเข้มข้น<br>ที่เหลือ<br>(มิลลิกรัม<br>/ลิตร) | ร้อยละ<br>การ<br>ดูดซับ |
| 2% Yellow LS-4G   | 24.54                                           | 38.65                   | 19.71                                           | 50.72                   | 16.23                                           | 59.42                   | 15.27                                           | 61.84                   | 16.04                                           | 59.90                   |
| 2% Yellow LS-R-01 | 23.10                                           | 42.25                   | 17.65                                           | 55.87                   | 14.27                                           | 64.32                   | 13.33                                           | 66.67                   | 13.71                                           | 65.73                   |
| 4% Navy LS-G      | 23.84                                           | 40.40                   | 19.19                                           | 52.02                   | 16.16                                           | 59.60                   | 14.95                                           | 62.63                   | 15.56                                           | 61.11                   |
| 2% Red LS-B       | 23.59                                           | 41.03                   | 21.54                                           | 46.15                   | 20.00                                           | 50.00                   | 20.26                                           | 49.36                   | 21.28                                           | 46.79                   |
| 2% Blue LS-3R     | 29.80                                           | 25.49                   | 24.71                                           | 38.24                   | 20.00                                           | 50.00                   | 19.22                                           | 51.96                   | 19.22                                           | 51.96                   |
| 2% Br.Blue LS-G   | 26.67                                           | 33.33                   | 22.81                                           | 42.98                   | 18.60                                           | 53.51                   | 17.89                                           | 55.26                   | 20.00                                           | 50.00                   |

ตารางผนวกที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G ของตัวดูดซับจากกกกลม

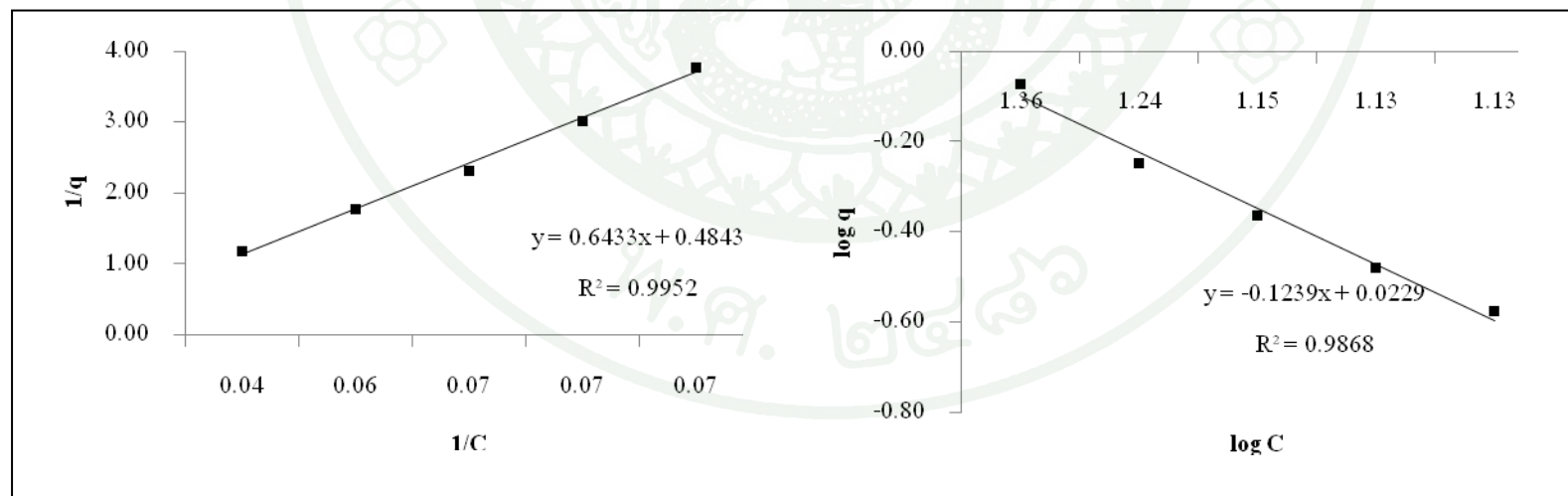
| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 24.35 | 0.05  | 0.78 | 0.04 | 1.28 | 1.39  | -0.11 |
| 2                                 | 40 | 19.71 | 0.05  | 0.51 | 0.05 | 1.97 | 1.29  | -0.29 |
| 3                                 | 40 | 16.23 | 0.05  | 0.40 | 0.06 | 2.52 | 1.21  | -0.40 |
| 4                                 | 40 | 15.07 | 0.05  | 0.31 | 0.07 | 3.21 | 1.18  | -0.51 |
| 5                                 | 40 | 16.23 | 0.05  | 0.24 | 0.06 | 4.21 | 1.21  | -0.62 |



ภาพที่ 19 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 2% Yellow LS-4G

ตารางผนวกที่ 23 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01 ของตัวดูดซับจากกกกลม

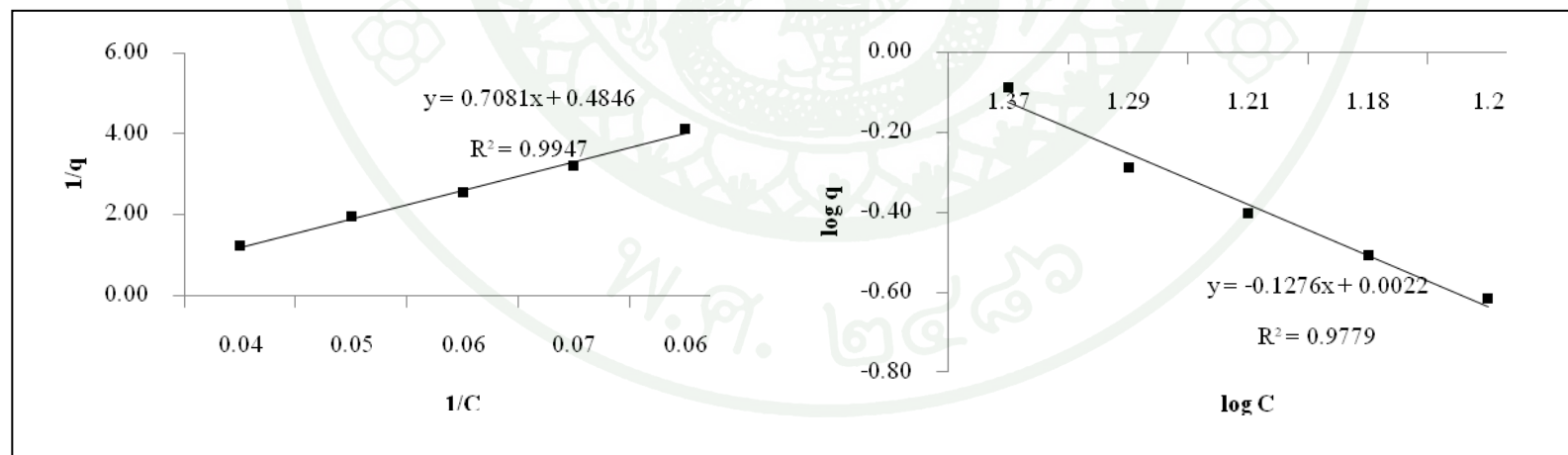
| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 23.10 | 0.05  | 0.85 | 0.04 | 1.18 | 1.36  | -0.07 |
| 2                                 | 40 | 17.46 | 0.05  | 0.56 | 0.06 | 1.77 | 1.24  | -0.25 |
| 3                                 | 40 | 14.08 | 0.05  | 0.43 | 0.07 | 2.31 | 1.15  | -0.36 |
| 4                                 | 40 | 13.52 | 0.05  | 0.33 | 0.07 | 3.02 | 1.13  | -0.48 |
| 5                                 | 40 | 13.52 | 0.05  | 0.26 | 0.07 | 3.78 | 1.13  | -0.58 |



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มของแสงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 2% Yellow LS-R-01

ตารางผนวกที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 4% Navy LS-G ของตัวดูดซับจากกกกลม

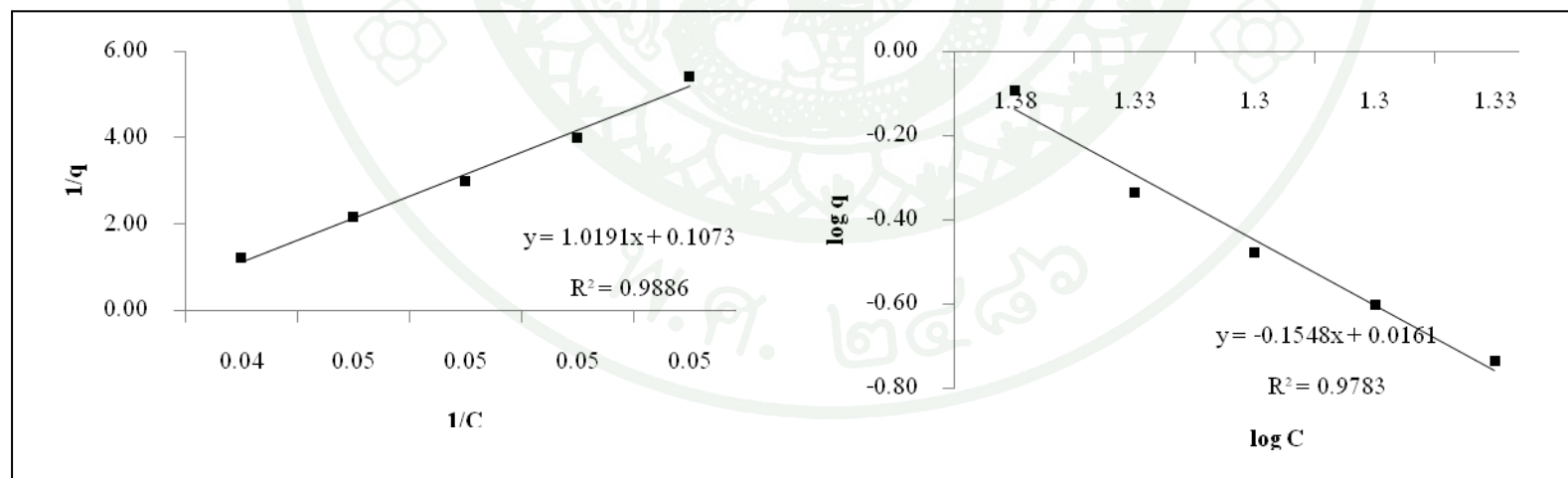
| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 23.64 | 0.05  | 0.82 | 0.04 | 1.22 | 1.37  | -0.09 |
| 2                                 | 40 | 19.39 | 0.05  | 0.52 | 0.05 | 1.94 | 1.29  | -0.29 |
| 3                                 | 40 | 16.36 | 0.05  | 0.39 | 0.06 | 2.54 | 1.21  | -0.40 |
| 4                                 | 40 | 15.15 | 0.05  | 0.31 | 0.07 | 3.22 | 1.18  | -0.51 |
| 5                                 | 40 | 15.75 | 0.05  | 0.24 | 0.06 | 4.12 | 1.20  | -0.62 |



ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 4% Navy LS-G

ตารางผนวกที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Red LS-B ของตัวดูดซับจากกกกลม

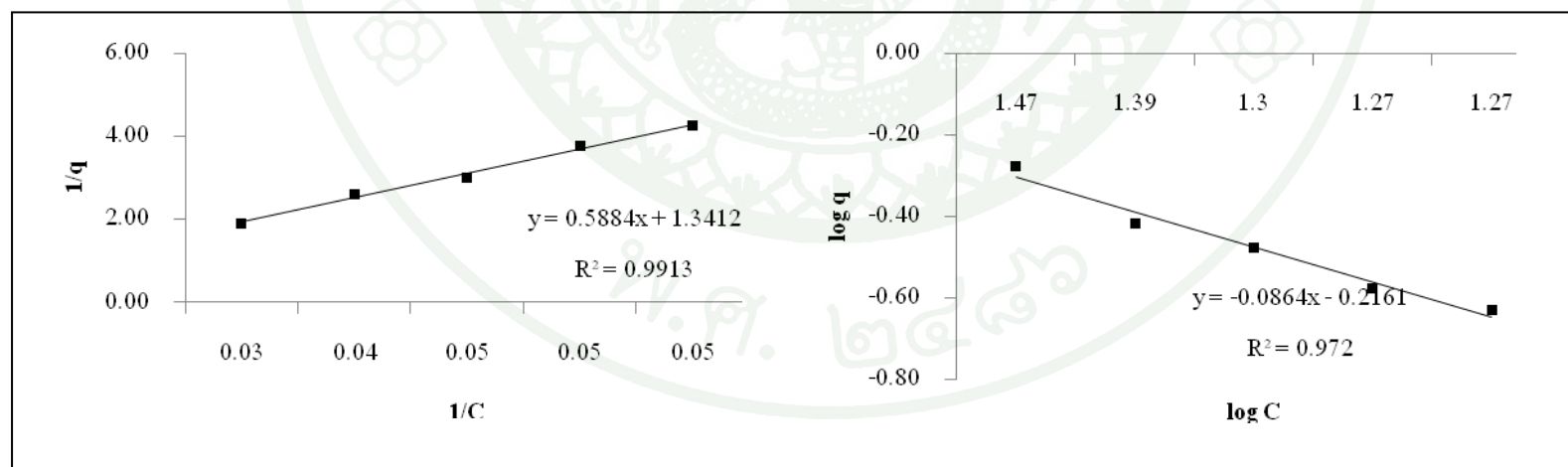
| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 23.85 | 0.05  | 0.81 | 0.04 | 1.24 | 1.38  | -0.09 |
| 2                                 | 40 | 21.54 | 0.05  | 0.46 | 0.05 | 2.17 | 1.33  | -0.34 |
| 3                                 | 40 | 20.00 | 0.05  | 0.33 | 0.05 | 3.00 | 1.30  | -0.48 |
| 4                                 | 40 | 20.00 | 0.05  | 0.25 | 0.05 | 4.00 | 1.30  | -0.60 |
| 5                                 | 40 | 21.54 | 0.05  | 0.18 | 0.05 | 5.42 | 1.33  | -0.73 |



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 2% Red LS-B

ตารางผนวกที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Blue LS-3R ของตัวดูดซับจากกกกลม

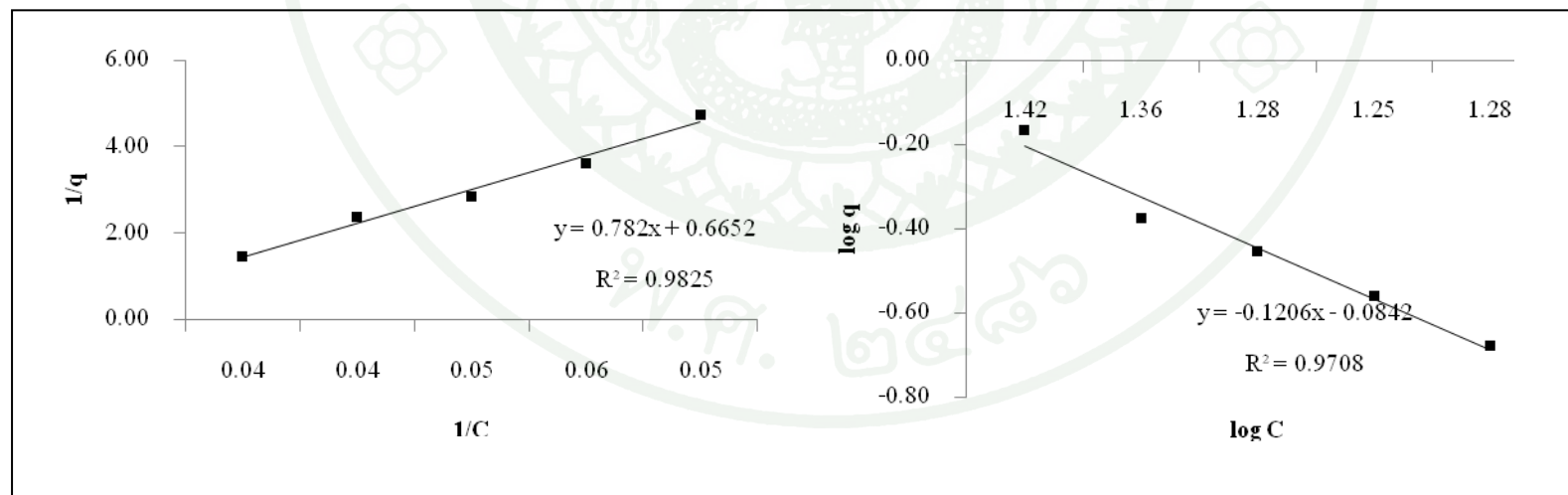
| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 29.41 | 0.05  | 0.53 | 0.03 | 1.89 | 1.47  | -0.28 |
| 2                                 | 40 | 24.71 | 0.05  | 0.38 | 0.04 | 2.62 | 1.39  | -0.42 |
| 3                                 | 40 | 20.00 | 0.05  | 0.33 | 0.05 | 3.00 | 1.30  | -0.48 |
| 4                                 | 40 | 18.82 | 0.05  | 0.26 | 0.05 | 3.78 | 1.27  | -0.58 |
| 5                                 | 40 | 20.00 | 0.05  | 0.20 | 0.05 | 5.00 | 1.30  | -0.70 |



ภาพที่ 23 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 2% Blue LS-3R

ตารางผนวกที่ 27 ไอโซเทอร์มการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G ของตัวดูดซับจากกกกลม

| ปริมาณตัวดูดซับ<br>จากกกกลม(กรัม) | Co | C     | V (L) | q    | 1/C  | 1/q  | log C | log q |
|-----------------------------------|----|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 1                                 | 40 | 26.32 | 0.05  | 0.68 | 0.04 | 1.46 | 1.42  | -0.16 |
| 2                                 | 40 | 23.16 | 0.05  | 0.42 | 0.04 | 2.38 | 1.36  | -0.38 |
| 3                                 | 40 | 18.95 | 0.05  | 0.35 | 0.05 | 2.85 | 1.28  | -0.45 |
| 4                                 | 40 | 17.89 | 0.05  | 0.28 | 0.06 | 3.62 | 1.25  | -0.56 |
| 5                                 | 40 | 18.95 | 0.05  | 0.21 | 0.05 | 4.75 | 1.28  | -0.68 |



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (ซ้าย) และฟรุนดลิช (ขวา) โดยใช้ตัวดูดซับจากกกกลมในการดูดซับสี 2% Br.Blue LS-G

ตารางผนวกที่ 28 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

| ดัชนีคุณภาพน้ำ                                  | ค่ามาตรฐาน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | วิธีวิเคราะห์                                      |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH value)                | 5.5-9.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | pH Meter                                           |
| 2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) | ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล.<br>น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย หรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล. | ระเหยแห้ง ที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |
| 3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)                | ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.                                                                                                                                                                           | กรองผ่านกระดาษกรอง                                 |
| 4. อุณหภูมิ (Temperature)                       | ไม่เกิน 40°C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | เครื่องวัดอุณหภูมิ<br>วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ   |

ตารางผนวกที่ 28 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (ต่อ)

| ดัชนีคุณภาพน้ำ                                                                    | ค่ามาตรฐาน                                                                                                                                                                         | วิธีวิเคราะห์                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 5. สีหรือกลิ่น                                                                    | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ                                                                                                                                                              | ไม่ได้กำหนด                                                      |
| 6. น้ำมันและไขมัน<br>(Fat, Oil and Grease)                                        | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน<br>แล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง<br>หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม<br>ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ<br>เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.  | สกัดด้วยตัวทำ<br>ละลาย แล้วแยกหา<br>น้ำหนักของน้ำมัน<br>และไขมัน |
| 7. ค่าบีโอดี (5 วัน<br>ที่อุณหภูมิ 20 °C)<br>(Biochemical Oxygen<br>Demand : BOD) | ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่<br>ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ<br>ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่<br>คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร<br>แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.          | Azide Modification<br>ที่อุณหภูมิ 20°C<br>เป็นเวลา 5 วัน         |
| 8. ค่าซีโอดี (Chemical<br>Oxygen Demand : COD)                                    | ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกัน<br>แล้วแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง<br>หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม<br>ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ<br>เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล. | Potassium<br>Dichromate<br>Digestion                             |

ที่มา: ดัดแปลงจากประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)  
เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ  
นิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13  
ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

|                              |                                                                              |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ-นามสกุล                 | นางสาวอศปภา สุขอึ้งจะสกุล                                                    |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด         | วันที่ 21 สิงหาคม 2529                                                       |
| สถานที่เกิด                  | โรงพยาบาลมิชชั่น กรุงเทพฯ                                                    |
| ประวัติการศึกษา              | ศึกษาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                     |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน | -                                                                            |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน         | -                                                                            |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ         | โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม<br>แหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ |