



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดินโดยใช้  
ถ่านลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพื่อการบำบัดน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า

The Development of Subsurface Flow Constructed Wetland System by Using Lignite  
Fly Ash as Reactive Dyes Adsorbent for Textile Factory Wastewater Treatment

นามผู้วิจัย นางสาวชลธิชา มณีโชติ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ \_\_\_\_\_ เดือน \_\_\_\_\_ พ.ศ. \_\_\_\_\_

สืบสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็น  
ตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพื่อบำบัดน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า

The Development of Subsurface Flow Constructed Wetland System by Using Lignite Fly Ash as  
Reactive Dyes Adsorbent for Textile Factory Wastewater Treatment

โดย

นางสาวชลธิชา มณีโชติ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ชลธิชา มณีโชติ 2557: การพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพื่อการบำบัดน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คณิตา ดังคนานุรักษ์, วท.ม. 110 หน้า

น้ำเสียของโรงงานย้อมผ้าที่ปล่อยออกมายังคงมีสีย้อมตกค้างในปริมาณมากจากกระบวนการผลิต ซึ่ง ส่งผลให้เกิดเป็นปัญหาสีสิ่งแวดล้อมทางน้ำได้ จึงได้มีการศึกษาการพัฒนานำถ้ำลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษมาใช้ในการกำจัดสีย้อม รีแอคทีฟ 9 ชนิด จากสารละลายสีย้อมผ้าที่มีความเข้มข้นของสีย้อมแต่ละชนิด 20 ppm ร่วมกับระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ผลการทดลองแบบเบดช์ พบว่าที่ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 1 กรัม ต่อปริมาตรสารละลายสีย้อมผ้าผสม 50 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง และ 5 วัน ให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าสูงสุดโดยเฉลี่ยร้อยละ 92.45 และ 99.86 ตามลำดับรูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นอกจากนั้นได้ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์แก้ว (6.5 cm i.d. x 40 cm L) ที่บรรจุชั้นกรวด ทราฮายาบทราฮะเลียด และถ้ำลอย ลิกไนต์ผสมดิน (1:60) จากล่างขึ้นบน ผลการทดลองแสดงว่าการบำบัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี (แบบไหลต่อเนื่อง แซ่ซัง 4 ชั่วโมง และ 5 วัน) ให้ประสิทธิภาพการบำบัดในครั้งแรกใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 98 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าจะลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าด้วยวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่องลดลงช้ากว่า นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาแบบไหลต่อเนื่องในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางในระบบพลาสติกที่บรรจุถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน ปลูกรูปถ้ำและหญ้าแฝก พบว่าหน่วยทดลองบำบัดให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้าได้ดี คือร้อยละ 98.81 สำหรับรูปถ้ำ และ 94.85 สำหรับหญ้าแฝก ในขณะที่หน่วยทดลองบำบัดที่ไม่ได้ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่า คือร้อยละ 80.87 และประสิทธิภาพยังลดลงอย่างรวดเร็วอีกด้วย

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chonthicha Maneechote 2014: The Development of Subsurface Flow Constructed Wetland System by Using Lignite Fly Ash as Reactive Dyes Adsorbent for Textile Factory Wastewater Treatment. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 110 pages.

Wastewater discharge of textile factory containing large amount of residual dyes from the production process can cause aquatic environment problems. The development of using lignite fly ash, a waste material from pulp and paper industry was investigated for removal of nine reactive dyes from 20 ppm of each dyes in aqueous solution together with the subsurface flow in constructed wetland treatment system. From batch experimental results, the average maximum removal efficiency of nine dyes at 92.45 and 99.86 were achieved from 1 g lignite fly ash/ 50 mL mixed dyes aqueous solution and contact time for 4 h and 5 days, respectively. The adsorption model was conformed to Langmuir isotherm and Freundlich isotherm. Moreover, the continuous experiment was carried out by filled the column (6.5 cm i.d. x 40 cm L) with gravel, coarse sand, sand and mixture of lignite fly ash and soil (1:60) from the bottom to the top. The results revealed that in 3 different treatments (continuous flow, retention time 4 h and 5 days) gave a nearly 98% removal efficiency at the 1<sup>st</sup> time and after that continue to decrease. However, removal efficiency of continuous flow decreased more slowly. Furthermore, the continuous subsurface flow constructed wetland was investigated in plastic tank which filled with mixture of lignite fly ash and soil and growing *Typha angustifolia* L. and *Vetiveria zizanioides*. The results showed that the treatment experiment units gave high removal efficiency of dyes at 96.81% for *T. angustifolia* L. and 94.85% for *V. zizanioides*. While the treatment experiment unit which without lignite fly ash gave removal efficiency lower at 80.87% and also efficiency was reduced rapidly.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ และสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ คำสั่งสอนแก่ผู้วิจัยเพื่อนำความรู้ต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณ คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุ และอุปกรณ์ ในการทำการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาคอยดู อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ตัวอย่างสีย้อมผ้าสังเคราะห์

ขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวมณีนีโชติที่คอยให้กำลังใจ ในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้เมตตา อบรมสั่งสอน และช่วยสนับสนุนทุนการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนสิ่งแวดล้อมรุ่น 36 ตลอดจนทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชลธิชา มณีนีโชติ

พฤศจิกายน 2557



## สารบัญ

## หน้า

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| สารบัญ                     | (1) |
| สารบัญตาราง                | (2) |
| สารบัญภาพ                  | (5) |
| คำนำ                       | 1   |
| วัตถุประสงค์               | 3   |
| การตรวจเอกสาร              | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ          | 51  |
| อุปกรณ์                    | 51  |
| วิธีการ                    | 52  |
| ผลและวิจารณ์               | 58  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ          | 87  |
| สรุป                       | 87  |
| ข้อเสนอแนะ                 | 88  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง       | 89  |
| ภาคผนวก                    | 95  |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 110 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                                            | หน้า |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1        | องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์                                                                         | 5    |
| 2        | ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์                                                        | 16   |
| 3        | น้ำหนักของสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสมที่แตกต่างกัน                     | 53   |
| 4        | ความยาวคลื่นที่สารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด                                | 58   |
| 5        | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่แตกต่างกัน                                      | 61   |
| 6        | ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์                                                            | 62   |
| 7        | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน (ชั่วโมง)                                     | 63   |
| 8        | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน (วัน)                                         | 66   |
| 9        | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าของดินปนทราย                                                                        | 69   |
| 10       | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินที่แตกต่างกัน                | 70   |
| 11       | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิดด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางโดยการปลูกหญ้า    | 81   |
| 12       | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิดด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางโดยการปลูกหญ้าแฝก | 84   |

## ตารางผนวกที่

|   |                                                                                             |    |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสม 9 ชนิด ที่ความเข้มข้น 10 - 50 มิลลิกรัม/ลิตร | 96 |
| 2 | อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด                            | 96 |
| 3 | อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ 1 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิตร                       | 97 |
| 4 | อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นชั่วโมง (1-3 ชั่วโมง)                                  | 97 |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                                           | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5      อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นชั่วโมง (4-6 ชั่วโมง)                                                                      | 98   |
| 6      อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นวัน (1-3 วัน)                                                                              | 98   |
| 7      อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นวัน (4-5 วัน)                                                                              | 99   |
| 8      อิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถาลอยลิกไนต์ต่อดินปนทราย (กรัม)<br>อัตราส่วน 1:10 ถึง 1:30                                     | 99   |
| 9      อิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถาลอยลิกไนต์ต่อดินปนทราย (กรัม)<br>อัตราส่วน 1:40 ถึง 1:60                                     | 100  |
| 10     อิทธิพลของปริมาณเถาลอยลิกไนต์ (0.5 – 5 กรัม) กับร้อยละการบำบัด<br>สีข้อมฟ้า                                                     | 100  |
| 11     อิทธิพลของปริมาณเถาลอยลิกไนต์ (3 – 5 กรัม) กับร้อยละการบำบัดสีข้อมฟ้า                                                           | 101  |
| 12     ไอโซเทอร์มของเถาลอยลิกไนต์                                                                                                      | 101  |
| 13     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดิน<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง     | 102  |
| 14     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง     | 104  |
| 15     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดิน<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง | 105  |
| 16     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง | 106  |
| 17     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดิน<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 5 วัน     | 106  |
| 18     อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่<br>ผสมเถาลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 5 วัน     | 107  |
| 19     ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูก และ<br>ดินผสมเถาลอยลิกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้า                 | 108  |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ |                                                                                                                    | หน้า |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 20           | ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูก และ<br>ดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก | 109  |
| 21           | ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูกโดย<br>ไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก  | 109  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่ |                                                                                            | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1      | เปรียบเทียบรูปร่างและลักษณะผิวของถ้ำลอยขนาดเล็ก (ก.) กับถ้ำลอยขนาดใหญ่ (ข.)                | 6    |
| 2      | โครงสร้างสีซ้อม Reactive Blue 5                                                            | 11   |
| 3      | ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                                  | 19   |
| 4      | แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว                           | 21   |
| 5      | แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว           | 21   |
| 6      | แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว                                              | 22   |
| 7      | การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น          | 24   |
| 8      | การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ                                                                 | 24   |
| 9      | การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                                            | 27   |
| 10     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน                                                              | 30   |
| 11     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง                                                              | 31   |
| 12     | กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C$                                              | 32   |
| 13     | ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช                                             | 33   |
| 14     | แบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์                                               | 34   |
| 15     | การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว                                   | 34   |
| 16     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์                                                 | 35   |
| 17     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท                                                    | 36   |
| 18     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท                                                       | 37   |
| 19     | Breakthrough Curve ของ Fixed-bed adsorption column                                         | 39   |
| 20     | รูปของกราฟเบรคทรูจ์ในกระบวนการดูดซับผิว                                                    | 40   |
| 21     | พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetland; FWS) | 41   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                  | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 22     | พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน (Subsurface Flow Constructed Wetland; SF)                  | 42   |
| 23     | ต้นธูปฤาษี ( <i>Typha angustifolia</i> Linn.)                                                    | 43   |
| 24     | แฝกหอม หรือ ( <i>Vetiveria zizanioides</i> L. Nash)                                              | 45   |
| 25     | หญ้าแฝกดอน หรือแฝกพื้นบ้าน ( <i>Vetiveria nemoralis</i> A. Camus)                                | 46   |
| 26     | คอลัมน์แก้วและลำดับชั้นของวัสดุปลูกในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง                                  | 55   |
| 27     | กระเบื้องปลูกพืช และชั้นวัสดุเพาะปลูก                                                            | 56   |
| 28     | ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์                                                                           | 59   |
| 29     | กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้าผสม                                                        | 60   |
| 30     | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์กับร้อยละการบำบัดสีข้อมฟ้าแต่ละชนิด                        | 61   |
| 31     | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์กับร้อยละ โดยเฉลี่ยของการบำบัดสีข้อมฟ้า 9 ชนิด             | 62   |
| 32     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีข้อมฟ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)                    | 64   |
| 33     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีข้อมฟ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)        | 65   |
| 34     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีข้อมฟ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (วัน)                        | 66   |
| 35     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีข้อมฟ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (วัน)            | 67   |
| 36     | ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ก.) และฟรุนดลิช (ข.) ของการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์                          | 68   |
| 37     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีข้อมฟ้าทั้ง 9 สี กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดิน | 71   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                           | หน้า |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 38     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักถ้ำลอยลึกในดินผสมกับดิน                                               | 71   |
| 39     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง                                                 | 73   |
| 40     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง                                     | 73   |
| 41     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง                                                   | 74   |
| 42     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง                                             | 75   |
| 43     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง                                 | 75   |
| 44     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง                                               | 76   |
| 45     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 5 วัน                                                 | 77   |
| 46     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 5 วัน                                     | 77   |
| 47     | ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 5 วัน                                                   | 78   |
| 48     | เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง และแบบแช่ขัง 5 วัน | 79   |

### สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                                                                                           | หน้า |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 49     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง (ก.) แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง (ข.) และแบบแช่ขัง 5 วัน (ค.) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม                      | 80   |
| 50     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกธูปฤาษี                                                           | 82   |
| 51     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกธูปฤาษี                                              | 83   |
| 52     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก                                                           | 84   |
| 53     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก                                              | 85   |
| 54     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับ ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการผสมถ้ำลอยลิกไนต์ | 86   |



การพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวตัวกลางโดยใช้ถ่านลอย  
ลิกไนต์เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเพื่อการบำบัดน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า

**The Development of Subsurface Flow Constructed Wetland System  
by Using Lignite Fly Ash as Reactive Dyes Adsorbent  
for Textile Factory Wastewater Treatment**

คำนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มในประเทศไทยมีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของไทยเป็นอย่างมาก โดยมีสัดส่วนมูลค่าเพิ่มต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศเป็นอันดับ 4 รองจากอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมเครื่องจักรสำนักงาน และอุตสาหกรรมยานยนต์ ตามลำดับ ในปี พ.ศ.2554 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มเป็นอันดับที่ 12 ของโลก และเป็นอันดับที่ 3 ในอาเซียนรองจากอินโดนีเซีย และเวียดนาม (สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจ ขนาดกลางและขนาดย่อม, 2554) โดยโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มที่มีอยู่ในประเทศไทยเป็นจำนวนมากนั้น ส่วนมากเป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม โดยจะมีขั้นตอนที่สำคัญคือการฟอกย้อมสีผ้า ซึ่งจะมีสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ซึมเข้าสู่เนื้อผ้า ส่วนที่เหลือจะถูกปล่อยออกมาเป็น น้ำทิ้งรวมกับน้ำล้างซึ่งใช้ในกระบวนการผลิต ดังนั้นน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีส่วนใหญ่จึงมีอนุภาคหรือโมเลกุลของสีย้อมผ้าปะปนอยู่มาก ส่งผลต่อแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียโดยทำให้แหล่งน้ำเกิดสภาพไม่นาดู และกั้นขวางแสง ทำให้ปริมาณแสงส่องผ่านสู่แหล่งน้ำลดลง ลดการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ การผลิตออกซิเจนลดลง แหล่งน้ำมีออกซิเจนไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศ และทำให้แหล่งน้ำเน่าเสีย (ศุภวิน, 2552; Chulhwan *et al.*, 2007; Shaobin, 2008)

โดยทั่วไปสีย้อมที่ใช้ในกระบวนการย้อมผ้า มักมีความคงตัว และมีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้ยากแก่การบำบัดด้วยวิธีตกตะกอนด้วยสารเคมีที่สามารถบำบัดได้เพียงสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำเท่านั้น ทำให้สีย้อมที่ละลายน้ำยังคงปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้ง (รัชนิย์, 2546) และยังยากต่อการบำบัดด้วยวิธีทางธรรมชาติ เช่น ระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ที่ใช้ความสามารถในการดูดซับมลสารของพืชและดิน ร่วมกับความสามารถของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายมลสารเหล่านั้น

(กรมควบคุมมลพิษ, 2547) แต่เนื่องจากสีย้อมมีความสามารถในการละลายสูง ทำให้พืชและดินไม่สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านคิดหาตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ที่สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กของสีย้อมผ้าได้ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหิน หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่างๆ (กิติโรจน์ และคณะ, 2543; จันทนา และคณะ, 2555; AbdurRahman et al., 2013; Nopkhuntod et al., 2012; Mohammed et al., 2007)

การศึกษากครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงคิดใช้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพคือถ่านลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นกากของเสียอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษมาเป็นตัวดูดซับสีย้อม เพื่อให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายโมเลกุลสีย้อมต่อไป เนื่องจากสีย้อมผ้าเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก โดยใช้ถ่านลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกชั้นบนสุดของชั้นวัสดุปลูกอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติเป็นชั้นกรองในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดังกล่าว ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิด คือ กล้วยาญี และหญ้าแฝก สีย้อมผ้าที่ใช้ในการศึกษากครั้งนี้เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมผ้าไทย คือสีย้อมจากโรงงานย้อมผ้าในโครงการพัฒนาออยตุง อันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยงานวิจัยนี้มีเป้าหมายหลักเพื่อบ่งชี้การพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ให้มีประสิทธิภาพ สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้ และเป็นการใช้ของเสียที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้เกิดประโยชน์ได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง มาใช้กับน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า
2. เพื่อใช้ประโยชน์จากถ้ำลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษ มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสีย
2. เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองแบบเบดซ์
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยวิธีการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง
4. เพื่อศึกษา และพัฒนาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยวิธีการบำบัด แบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง โดยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

## การตรวจเอกสาร

### 1. เถ้าลอยลิกไนต์

#### 1.1 สภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อน ในเตาเผา จะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด โดยเถ้าลิกไนต์จะมี 2 สภาพ คือ

1.1.1 เถ้าหนัก (bottom ash หรือ wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้า ในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกันเป็นเม็ดหรือก้อน ตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของเถ้าปะทะกับผนังเตาและหลอมติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

1.1.2 เถ้าลอย (fly ash ,pulverized fuel ash หรือ dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผา ถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดไปสู่ปล่องควัน และถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า (electrostatic precipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บเถ้าปริมาณ ของเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เหลือจา การเผาไหม้ถ่านลิกไนต์จะมีประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ ของ น้ำหนักถ่านหินที่เผา (วิจิตอำจรร, 2536)

#### 1.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

จากการ ตรวจสอบตัวอย่างของเถ้าลอยลิกไนต์ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่าในเถ้าลอยลิกไนต์โดยทั่วไป จะ ประกอบไปด้วย ซิลิกอนออกไซด์ร้อยละ 40.89 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 14.54 โดยน้ำหนัก อะลูมินัมออกไซด์ร้อยละ 13.33 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

| องค์ประกอบทางเคมี              | เถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ) |
|--------------------------------|-------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40.89                   |
| CaO                            | 14.54                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.33                   |
| SO <sub>3</sub>                | 2.71                    |
| K <sub>2</sub> O               | 2.25                    |
| MgO                            | 2.08                    |
| MnO                            | 0.39                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.79                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.57                    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.48                    |
| LOI                            | 0.35                    |

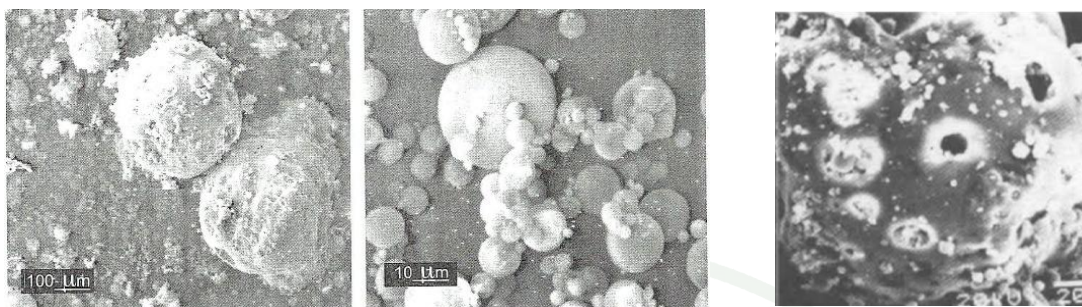
หมายเหตุ LOI (Loss On Lgnition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: วรวิทย์ และคณะ (2553)

### 1.3 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

โครงสร้างทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาป และหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลง หลังออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายหลังจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้เถ้าลอยที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม และอยู่ในสถานะแก้ว เถ้าลอยส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ โดยเถ้าลอยขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า และจะมีท รงกลมและผิวเรียบกว่า ส่วนเถ้าลอยขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุนเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง เมื่อเปรียบเทียบรูปร่าง และลักษณะผิวของเถ้าลอยขนาดเล็กกับเถ้าลอยขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 1





(ก.)

(ข.)

**ภาพที่ 1** เปรียบเทียบรูปร่างและลักษณะผิวของเถ้าลอยขนาดเล็ก (ก.) กับเถ้าลอยขนาดใหญ่ (ข.)

ที่มา : ชีรวัดน์ (2554)

นอกจากนี้ความละเอียดและรูปร่างของเถ้าถ่านหิน ยังขึ้น อยู่กับการบดถ่านหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบด ชนิดของเตาเผา อุณหภูมิการเผา และสภาพแวดล้อม กล่าวคือ ถ้าวบถ่านหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะทำให้ได้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงกว่าเมื่อใช้ถ่านหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีถ่านหินปนอยู่จำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ่านหินที่บดละเอียดจะมีขนาดใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินมาก ดังนั้นความละเอียดของเถ้าถ่านหินจึงขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน

โครงสร้างทางกายภาพของเถ้าลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าลอย และยังมีเถ้าลอยกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆอยู่ภายในเรียกว่า พลีโอสเฟีย (Plerosphere) เถ้าลอยกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน ความกลวงทำให้ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินต่ำกว่าปกติ (ปกติความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.2-2.8) ตัวอย่างเช่นความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางอยู่ที่ 2.0-2.2 โดยที่องค์ประกอบหลักของเถ้าลอยกลวง คือ ออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เนื่องจากเถ้าลอยกลวงเป็นเถ้าลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าลอยกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบาและคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟ และการเก็บเสียง เป็นต้น (ชีรวัดน์, 2554)

## 2. สีย้อมผ้า

### 2.1 สีย้อม

สีย้อม คือ สีย้อมชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสาร อนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด สามารถจำแนกตามลักษณะทางกายภาพได้ 2 ชนิด คือ สีย้อมละลายน้ำได้เรียกว่าสีย้อม และสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่าปิกเมนต์ โดยจะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ (อัจฉราพร, 2527) เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิดพันธะไฮโดรเจน หรือพันธะโควาเลนต์ กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรง สีย้อมที่เห็นจากการย้อมนั้นเกิดจากอิเล็กตรอนในพันธะคู่ ซึ่งอยู่ในโมเลกุลของสีย้อมนั้นมีความสามารถดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นช่วง 400 – 700 นาโนเมตร สีย้อมที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลต่างกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างกันไป ซึ่งสายตาสถาสามารถรับภาพได้ จึงทำให้โมเลกุลสีย้อมต่างโทนสีกัน แสดงสีให้เราเห็นด้วยสายตาสถาออกมาเป็นสีต่างกันไป ทั้งนี้เราสามารถแบ่งสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ สีย้อมธรรมชาติ เช่น สีย้อมที่มาจากพืช หรือ สัตว์ และสีย้อมสังเคราะห์ ที่เกิดจากกระบวนการทางเคมี (คุชฎี, 2531)

### 2.2 โครงสร้างโมเลกุลสีย้อม

โครงสร้างของโมเลกุลสีย้อมประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน (สกล, 2546; เทพฤทธิ์, 2544; Buckley, 1992) ได้แก่

2.2.1 หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อม (Dye Chromophore Group) ประกอบด้วยพันธะคู่ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดสีของสีย้อม โดยเมื่อแสงถูกกระทบกับโมเลกุลสีย้อม โครงสร้างโครโมฟอร์ของสีย้อมจะสั่นสะเทือนเนื่องจากการดูดกลืนแสงบางความยาวคลื่นไป ทำให้เห็นสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน โครโมฟอร์ของสีย้อมมีประมาณ 20 กลุ่ม เช่น กลุ่มเอโซ (N = N) หมู่คาร์บอนิล (C = O) เป็นต้น

2.2.2 หมู่ออกโซโครมของสีย้อม (Auxochrom Group) คือหมู่ปฏิกิริยาที่อ้อมตัว ที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ โครงสร้างนี้มักเป็นวงเบนซีน (Benzene Aromatic) ที่มีหมู่อะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Group) ติดอยู่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ออกโซโครมมีคุณสมบัติการละลายน้ำและยังเป็นส่วนที่ทำให้พันธะที่ทำให้เกิดการขีดยึดระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับเส้นใย ตัวอย่างของออกโซโครม ได้แก่ กลุ่มหมู่คาร์บอกซิลิก (COOH) กลุ่มไฮดรอกซิล (OH) กลุ่มเอมีน (NH<sub>2</sub>) เป็นต้น

โครโมฟอร์และออกโซโครมจะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ โดยทั้ง 3 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่าโครโมเจน ซึ่งการรวมกันของพันธะคู่สลับกับโครโมฟอร์ทำให้เกิดสี แต่ความเข้มและความสว่างของสีจะขึ้นอยู่กับออกโซโครม

### 2.3 การจำแนกประเภทสีย้อม

การจำแนกประเภทสีย้อมที่นิยมกันมากที่สุด คือ การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการนำไปใช้ เนื่องจากสีย้อมแต่ละประเภทจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีใช้ที่แตกต่างกันไป ดังนั้นการเลือกใช้สีย้อมจึงมีความสำคัญอย่างมากในการย้อมสี เพราะวัสดุที่ต้องการย้อมอาจสามารถย้อมด้วยสีย้อมเพียงชนิดเดียวหรือย้อมด้วยสีย้อมหลายชนิดที่ต่างชนิดกันได้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสส่วนใหญ่จะย้อมด้วยสีไดเรกต์ เป็นต้น โดยสามารถจำแนกประเภทสีย้อมได้เป็น 11 ประเภท (คุชฎี, 2531) ดังนี้

2.3.1 สีเอซิด (acid dye) สีชนิดนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีเอซิดบางตัวสามารถนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ดี เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ไชขนแกะ ไหม และอะคริลิก แต่สีเอซิดนี้จะไม่ทนการซัก และไม่ทนเหงื่อ

2.3.2 สีไดเรกต์ (direct dye) หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิคที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยโมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน สีไม่ทนต่อการซักน้ำ ดกง่าย ทนแสง

2.3.3 สีเบสิก (basic or cationic dye) สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ให้ประจุลบ ละลายน้ำได้ ดี ติดทน นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอน และใยอะคริลิก ในขณะที่ย้อมโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย แต่ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติเพราะจะไม่ทนการซัก และไม่ทนแสง

2.3.4 สีดิสเพอร์ส (disperse dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอน และอะคริลิกได้ดี การย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก้สบางชนิด เช่น แก๊สไนตรัสออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ สีย้อมอะโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (amino anthraquinone)

2.3.5 สีรีแอคทีฟ (reactive dye) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง มีประจุลบ สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟจะให้สีที่สดใส ติดทนในทุกสภาวะ

2.3.6 สีอะโซอิก (azoic dye) สีย้อมชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้ต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้รวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์ซึ่งจะเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท เป็นสีที่ทนต่อการซัก แต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.3.7 สีแว็ต (vat dye) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีแว็ตละลายน้ำ โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแว็ตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเกลือจึงซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศสีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสีแว็ต สีย้อมชนิดนี้มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ สีอินดิโก (indigoid) และสีแอนทราควิโนอยด์ (anthraquinoid)

2.3.8 สีมอร์แดนต์ หรือโครม (mordant or chrome dye) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไปช่วยเพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารที่ช่วยติดที่ใช้คือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ



เช่น โครเมียม ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดงที่เป็นสีที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจาก สีมอร์แดงหลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำ ได้จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใย โพรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

2.3.9 สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อมชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้า

2.3.10 สีออกซิเดชัน (oxidation dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยาในน้ำโดยสีจะติดแน่น อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย ใช้สำหรับย้อมผ้าและขนสัตว์

2.3.11 สีซัลเฟอร์ (sulfur dye) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวซ์สีเพื่อให้โมเลกุลอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวซ์จะสามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมผ้า สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีที่อ่อนจะไม่ทนต่อการซัก

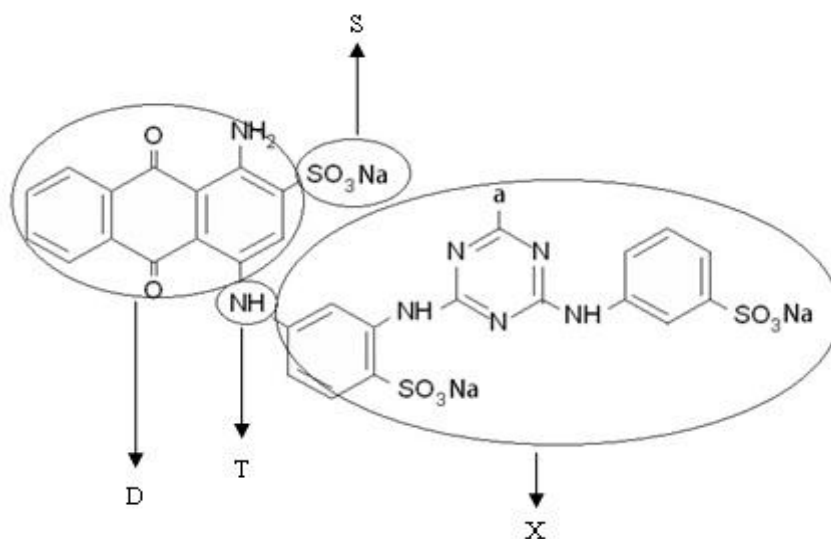
## 2.4 สีย้อมรีแอคทีฟ

สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dye) ถือกำเนิดขึ้นในปี ค .ศ.1950 เป็นสีที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม นิยมใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยเซลลูโลส และเส้นใยโปรตีน เส้นใยในลอน โดยสีชนิดนี้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี และมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง กลไกในการย้อมสีรีแอคทีฟบนเส้นใยเซลลูโลสนั้น จะเกิดโดยโมเลกุลสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเส้นใยเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส มีความคงทนต่อการซักล้างสูง และให้สีสดใส นอกจากนี้สีย้อมรีแอคทีฟยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ ได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียสีย้อมบางส่วนไปกับน้ำ (ลิลี, 2541)

### 2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ

กลุ่มเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม คือ S-D-T-X แสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปดังภาพที่ 2





ภาพที่ 2 โครงสร้างสีย้อม Reactive Blue 5

ที่มา: วรณวิภา (2547)

จากภาพที่ 2 อธิบายได้ดังนี้

- (1) S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3\text{Na}$ ) ซึ่งอยู่ติดกับกลุ่มโครโมฟอร์
- (2) D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกกลุ่มโครโมฟอร์
- (3) T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์ เช่น กลุ่ม  $-\text{NH}-$ ,  $-\text{SO}_2-$  และ  $-\text{NCH}_3-$  เป็นต้น
- (4) X คือ กลุ่มรีแอคทีฟ เป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย ส่วนมากจะเป็นสเตอโรไฮดรอลิกอะโรมาติก (Heterocyclic Aromatic)

โดยส่วนประกอบที่สำคัญคือ กลุ่มที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอคทีฟ ซึ่งจะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีย้อมแต่ละชนิดแตกต่างกันไป (ปิ่นสยาม, 2546; วรณวิภา, 2547)

### 3. อุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีทันสวยงาม และคงทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ คือ การเตรียมผ้า การย้อมสี และการตกแต่งสำเร็จ ซึ่งกระบวนการผลิตนี้จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเส้นใยโดยใช้เคมีและสีย้อมที่เหมาะสม กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำ เป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก โดยน้ำที่ทั้งที่ผ่านมาจากกระบวนการฟอกย้อมนี้มักจะมีสี ย้อมและสารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตปนเปื้อนอยู่ เช่น สารทำความสะอาด สารช่วยย้อม เป็นต้น ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่ง หรือแม้แต่การฟอกย้อมประเภทเดียวกันแต่ต่างกันที่ขั้นตอน ก็จะมีลักษณะน้ำเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของการผลิต และการเลือกใช้สารเคมี เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

กระบวนการฟอกย้อม สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ตามประเภทการผลิต (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) ดังนี้

#### 3.1 กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย

ในกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย จะเริ่มด้วยการนำเส้นด้ายไปกำจัดสิ่งสกปรกที่เจือปน (scouring) ด้วยความร้อน สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟ ( $\text{NaOH}$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) สารช่วยกำจัดสิ่งสกปรก (scouring agent) และสารช่วยเปียก (wetting agent) จากนั้นเส้นด้ายที่ถูกกำจัดสิ่งสกปรกออกจะถูกนำไปฟอกขาว (bleaching) ซึ่งมีการใช้สารเคมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ( $\text{NaOCl}$ ) หรือโซเดียมคลอไรต์ ( $\text{NaClO}_2$ ) รวมทั้งกรดและด่างด้วย ในขั้นตอนการย้อม (dyeing) จะมีการใช้สารเคมีต่างๆ เช่น สีย้อม สารเคมีช่วยย้อม กรดและด่าง โดยมีการใช้ความร้อนช่วยในกระบวนการด้วย หลังจากนั้นจะนำด้ายที่ย้อมไปล้างด้วยน้ำสบู่ (soaping) ด้วยสารสบู่ (soaping agent) จากกระบวนการทั้งหมดนี้ จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกมา มีสีเข้ม มีค่าบีโอดี (biochemical oxygen demand, BOD) ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ค่าของแข็งแขวนลอย (suspended solids, SS) และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total solids, TS) สูง มีสภาพเป็นด่าง มีอุณหภูมิสูง และมีการปนเปื้อนของน้ำสบู่ด้วย

### 3.2 กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ

กระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบมีขั้นตอนคล้ายกับการฟอกย้อมเส้นด้าย ต่างกันที่ก่อนการฟอกย้อมผ้าดิบจะต้องทำการลอกแป้ง (desizing) ก่อน และต้องนำผ้าที่ผ่านการฟอกขาวแล้วไปชุบมัน (mercerization) ก่อนนำไปย้อม หลังจากที่ผ่านมาการย้อมแล้วต้องมีการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยในขั้นตอนการลอกแป้งจะมีการใช้สารเคมี ได้แก่ เอนไซม์ หรือกรดซัลฟูริก หรือสารออกซิไดซ์ซึ่งรวมทั้งสารช่วยเปียก และใช้ความร้อนร่วมด้วย ดังนั้นน้ำทิ้งที่ออกมาจะมีค่าบีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมดสูง และมีอุณหภูมิสูงด้วย สำหรับขั้นตอนการชุบมันซึ่งมีการใช้โซดาไฟ จะทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีค่าบีโอดี ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และสภาพความเป็นด่างสูง ขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จมีการใช้สารตกแต่ง เช่น เรซิน สารกันน้ำ เป็นต้น โดยใช้ความร้อนร่วมด้วย จึงทำให้น้ำทิ้งที่ออกมามีอุณหภูมิสูง มีค่าบีโอดีสูง มีสภาพเป็นกลาง หรือมีค่าความเป็นกรด -ด่าง (pH) ประมาณ 7

### 3.3 กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

กระบวนการฟอกย้อมผ้าถักมีขั้นตอนการฟอกย้อมเช่นเดียวกับการฟอกย้อมผ้าดิบ แต่ไม่มีขั้นตอนการลอกแป้ง ลักษณะของน้ำทิ้งในแต่ละขั้นตอนจะเหมือนน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมผ้าดิบ นอกจากนี้ยังอาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันและไขมันที่ปะปนมากับเส้นใย เศษเส้นใย และเศษผ้าด้วย

## 4. น้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้า

### 4.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย

แหล่งที่มาของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมมีหลายแหล่งด้วยกัน เช่น น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต น้ำจากกรรหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ เป็นต้น (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต คือ น้ำที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม น้ำใช้ส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่เป็นเพียงส่วนน้อย น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ดังนี้

- (1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง
- (2) น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

#### 4.1.2 น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อมมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำจะได้น้ำสะอาดที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ใหม่ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง ไอน้ำเหล่านี้จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำย้อม และถูกรวมเป็นน้ำเสียที่มาจากกระบวนการผลิตด้วย

#### 4.1.3 น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

ในกระบวนการฟอกย้อมอาจมีความจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมในเวลาอันสั้น สามารถทำได้โดยอาศัยการหล่อเย็นด้วยน้ำ ซึ่งน้ำส่วนนี้โดยมากจะเป็นน้ำสะอาดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

#### 4.1.4 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

น้ำเสียส่วนนี้อาจมีทั้งน้ำเสียที่มีความสกปรกไม่มาก และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนสูงปะปนกันอยู่ เช่น น้ำที่ใช้ในการทำมาสะอาดพื้นโรงงาน และน้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

#### 4.1.5 น้ำจากแหล่งอื่นๆ

นอกจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โรงงานฟอกย้อมยังอาจมีน้ำเสียจากแหล่งอื่นๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงาน เป็นต้น

### 4.2 ลักษณะน้ำเสีย

น้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกย้อมจะมีความเป็นด่างสูง เนื่องจากการใช้สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต น้ำเสียจะมีปริมาณสารอินทรีย์สูง เนื่องจากมีค่าบีโอดีและซีโอดีสูง ปริมาณสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อม ได้แก่ แป้ง สีย้อม เส้นใย และเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการฟอกย้อม รวมถึงไขมัน และตัวทำละลายต่างๆ ด้วย น้ำเสียจะมีของแข็งที่ละลายน้ำ และของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในปริมาณมาก ซึ่งมาจากเกลือโซเดียมและกรดต่างๆ อาจมีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากสีที่ใช้ย้อมผ้ามีส่วนประกอบของโลหะ เช่น ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี นอกจากนี้ น้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกย้อมจะมีสีเข้มมาก ซึ่งมาจากสีที่ใช้ย้อมผ้านั่นเอง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมที่อยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 100 ตัวอย่าง โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (grab sampling) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย วิเคราะห์หาค่า าดชนีต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

| ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม       | ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด |               |               |              |             | จำนวนข้อมูล |
|---------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
|                           | pH                                   | BOD<br>มก./ล. | COD<br>มก./ล. | SS<br>มก./ล. | สี<br>Pt Co |             |
| ฟอกย้อมด้าย               | 8.2                                  | 120           | 300           | 43           | 450         | 13          |
| ฟอกย้อมผ้าฝ้าย            | 9.0                                  | 110           | 370           | 50           | 570         | 16          |
| ฟอกย้อมผ้าทอ              | 8.6                                  | 400           | 1200          | 140          | 670         | 41          |
| ฟอกย้อมด้าย ผ้า หรืออื่นๆ | 9.1                                  | 230           | 713           | 65           | 400         | 30          |

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2542)

#### 4.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งคือความเข้มของสี แม้จะมีสีย้อมปะปนอยู่ในน้ำปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่าสนใจต่อผู้ที่พบเห็นได้ และสีเหล่านี้มักแยกออกจากน้ำเสียได้ค่อนข้างยากด้วย เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียที่มาจากโรงงานฟอกย้อมโดยไม่ได้รับการบำบัดก่อน จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางน้ำตามมา (เปล่งศักดิ์, 2546; ศุภวิน, 2552) ดังนี้

##### 4.3.1 ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแหล่งน้ำ

น้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการฟอกย้อมมักมีสารพิษ และสารเคมีต่างๆปนเปื้อนอยู่ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ที่เป็นตัวก่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพด้วย เช่น โลหะหนักที่เป็นองค์ประกอบในสีย้อมบางชนิด อาจทำให้เกิดโรคร้ายแรงในสัตว์น้ำ อาจสะสมอยู่ในระบบนิเวศทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ รวมทั้งมนุษย์ด้วย นอกจากนี้ในกระบวนการฟอกย้อมมักมีการใช้สารเคมีที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้น้ำทิ้งมีสภาพเป็นด่างสูง เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงแล้วอาจ

เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วสิ่งมีชีวิตจะดำรงชีพอยู่ได้ในสภาวะที่เป็นกลาง หรือในช่วยพีเอช 6 - 9

#### 4.3.2 การลดของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

น้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เนื่องจากในน้ำทิ้งมีปริมาณสารอินทรีย์สูงทำให้ออกซิเจนถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ จนทำให้แหล่งน้ำมีปริมาณออกซิเจนลดลง นอกจากนี้ออกซิเจนถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรซัลไฟด์ซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางประเภทด้วย

#### 4.3.3 สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง

น้ำทิ้งที่มาจากกระบวนการฟอกย้อมจะมีสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงปนเปื้อนอยู่ด้วย เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำมีสีเข้ม เป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้ที่พบเห็น และน้ำที่มีสีเข้มนี้จะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้สาหร่ายและพืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง นอกจากนี้น้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมอาจมีอุณหภูมิสูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลงด้วย

### 5. กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับได้ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียอย่างแพร่หลาย โดยการดูดซับนี้เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือความพรุน เนื่องจากรูพรุนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสภายในให้มากขึ้น นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น

สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศ และน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับขามะแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม จะทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมาได้ ซึ่งจะมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย และจะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิด กระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

## 5.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังนี้

5.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

5.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

5.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

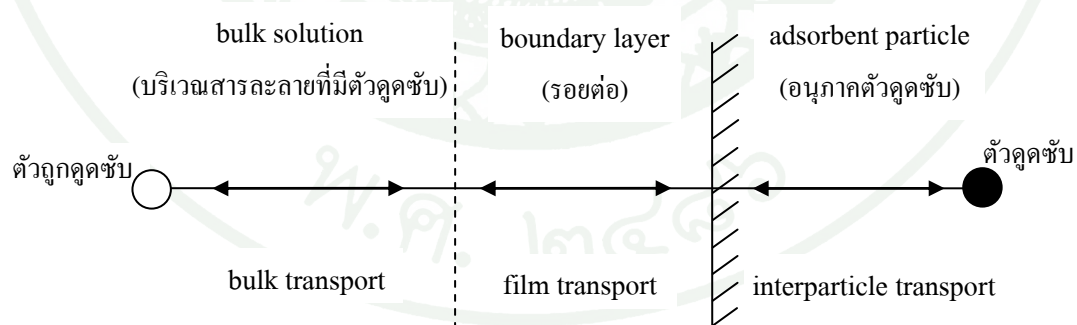
## 5.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ

อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ โดยขั้นตอนการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

5.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

5.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

5.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

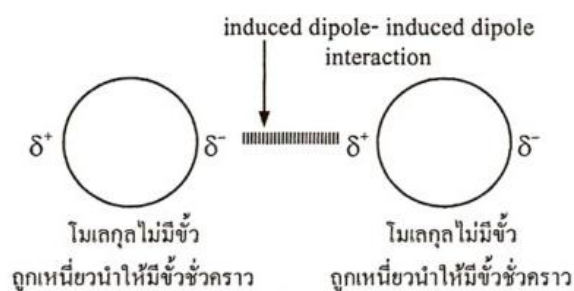
### 5.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้นอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

5.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) คือแรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วค่า จะมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลมีขนาดเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แรงแวนเดอร์วาลส์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มี ความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่าถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วยโดยแรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภทดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่าทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induce dipole) ขึ้น โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราวแสดงดังภาพที่ 4



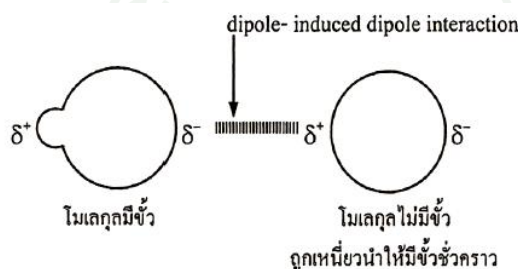


ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 4 ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงให้มีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

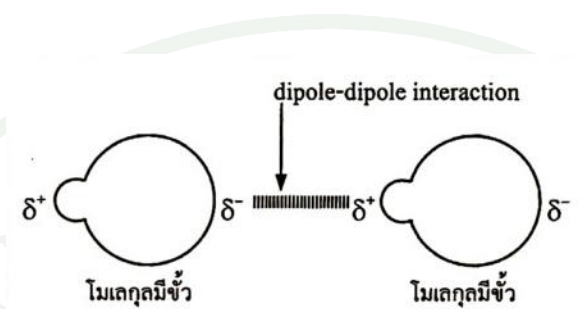
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction) โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราวแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว โดยด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล - ไดโพล (dipole-dipole attraction) โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้วแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ในกรณีที่มีโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง (ความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนในพันธะเข้ามาหาตัวเองสูง) ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้คือการคายสารออก (desorption) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

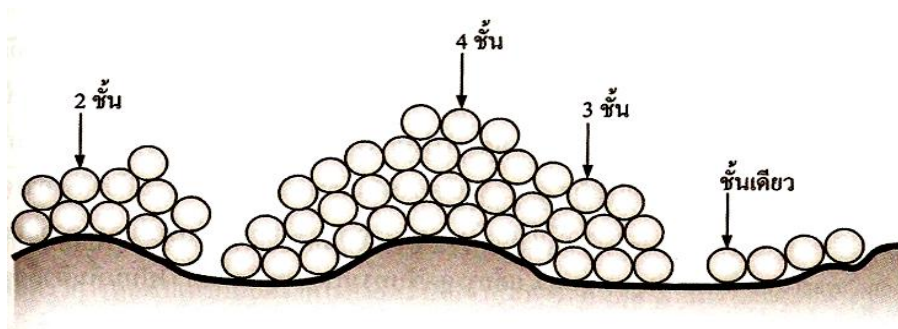
5.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ที่

เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอน กับโปรตอน ) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน ) หรือกล่าวได้ว่า แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเพื่อให้เป็นโมเลกุล หรือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเพื่อให้เป็นกลุ่มก้อนนั่นเอง ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

#### 5.4 รูปแบบของการดูดซับ

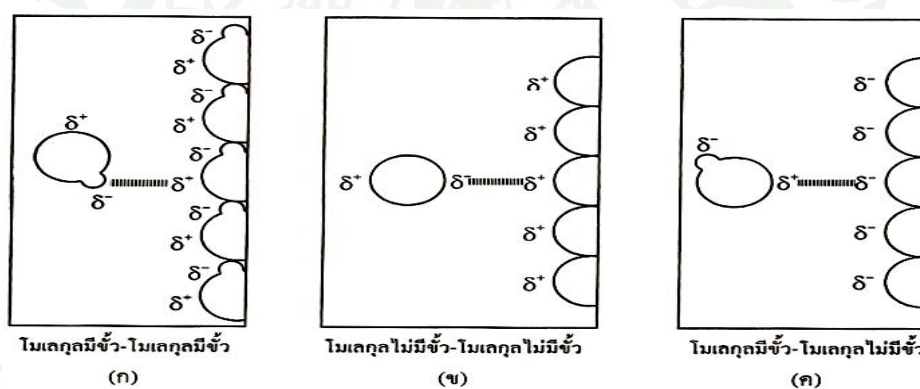
รูปแบบของการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) คือ

5.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล เป็นต้น และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้นี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8



ภาพที่ 7 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว

ภาพที่ 8 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



5.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิด ปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

## 5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

5.5.1 ความดันป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่จะเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความดันป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

5.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

5.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูด



ระหว่างตัวถูกดูดซับและ ตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

5.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือน้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

5.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

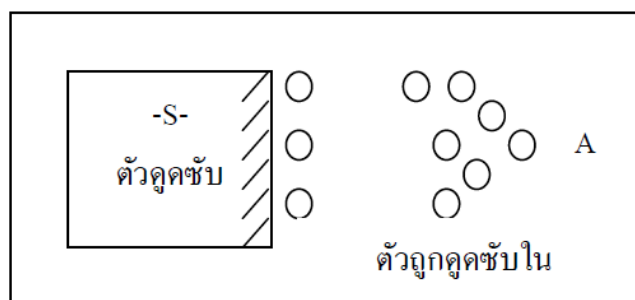
5.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

## 5.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย

สภาวะสมดุลของการดูดซับจะได้ว่า จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

$q$  เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

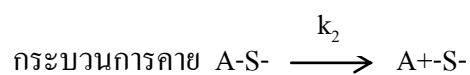
$(1-q)$  เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ  $C$  และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

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



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2 (q)$$

ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับจะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกละลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกละลบลู่ออกมาจากตัวดูดซับ

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

เมื่อ  $q$  เป็นปริมาณตัวถูกละลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกละลบลู่ออกต่อ มวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

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

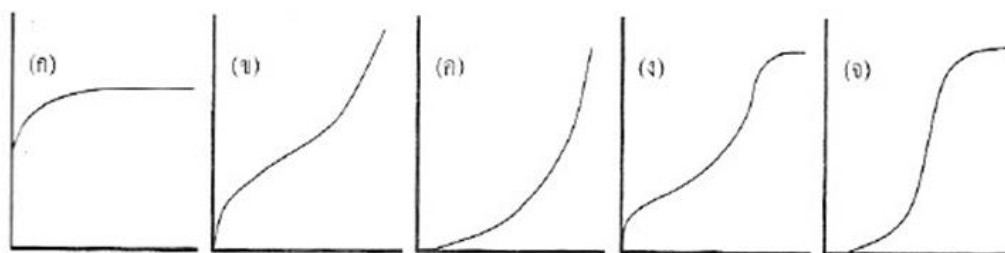
$V$  เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลบลู่ออกอยู่ หน่วยเป็น ลูกบาศก์ เซนติเมตรหรือลิตร

$C_i$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลบลู่ออกก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นโมลต่อลิตร (mol/l)

$C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลบลู่ออกที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็น ความเข้มข้นโมลต่อลิตร (mol/l)

## 5.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลบบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลบลู่ออกในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

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

จากภาพที่ 11 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

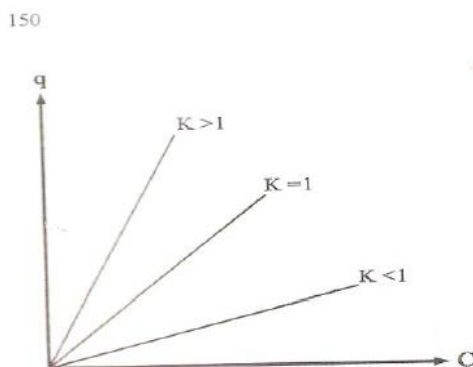
5.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และค่า  $C$

$$\text{จะได้} \quad K = \frac{q}{C}$$

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ละลายอยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำดังภาพที่ 11





ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)

เมื่อ  $K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

5.7.2 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (freundlich adsorption isotherm) สมการใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่า พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) คือพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

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

$K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป  $1/n$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

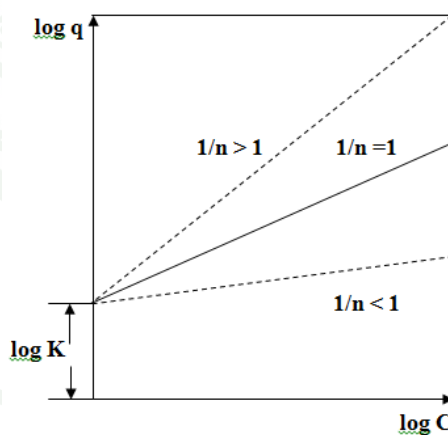
เมื่อ  $q$  คือปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$  คือ ความชันของกราฟ

$C$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K$  ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความชันระหว่าง  $\log q$  และ  $\log C$

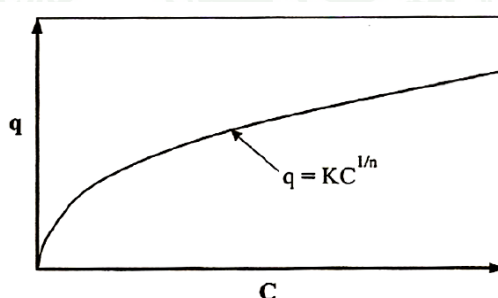
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

ถ้า  $\frac{1}{n} < 1$  บอกถึงความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำใน ทุกค่าของความเข้มข้น  $C$  หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

ถ้า  $\frac{1}{n} > 1$  บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับว่าจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

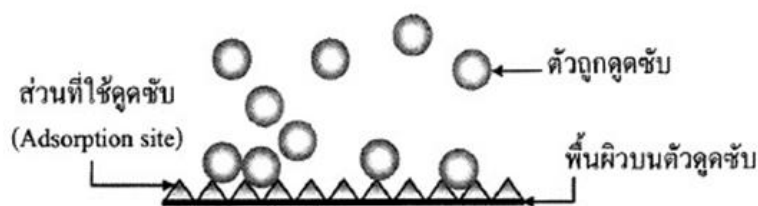
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

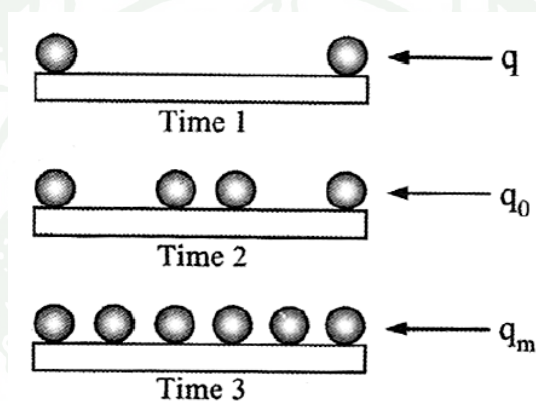
ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

5.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)



ภาพที่ 15 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (2) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (2) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

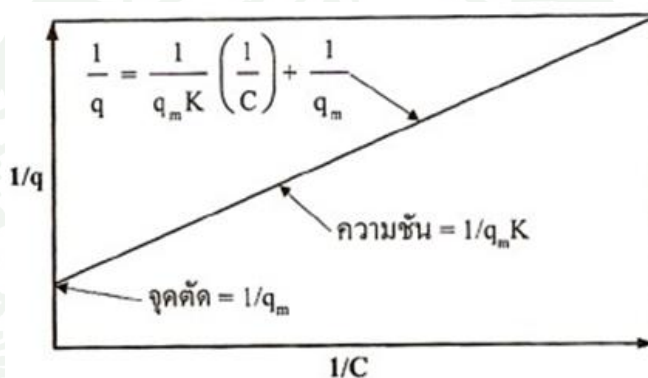
$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปเส้นตรงจะได้

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

$q_m$  คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

เขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{K q_m}$   
และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)

5.7.4 สมการการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อว่า Stephen Brunauer, Paul Emmett และEdward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

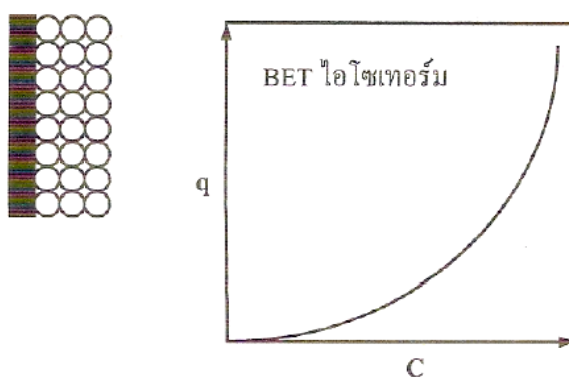


4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตซ์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง  $q$  กับ  $C$  เป็นดังนี้



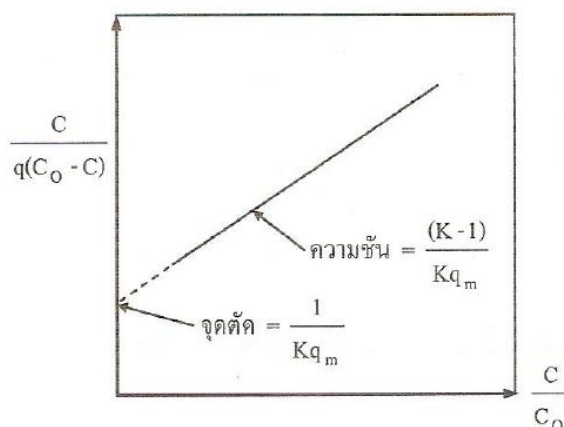
ภาพที่ 17 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบต

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{K-1}{q_m K} \left[ \frac{C}{C_0} \right] \quad \text{.....(9)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $\frac{C}{q(C_0 - C)}$  กับค่า  $\frac{C}{C_0}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ  $\frac{K-1}{Kq_m}$  และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

## 5.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

5.8.1 สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ แอคติเวเต็ดซิลิกา รวมทั้งถั่วลยถิกไนต์ด้วย โดยสารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามข้อเสียของตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียง ไม่กี่ชนิด ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทนี้

5.8.2 ถ่านกัมมันต์ เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

5.8.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม

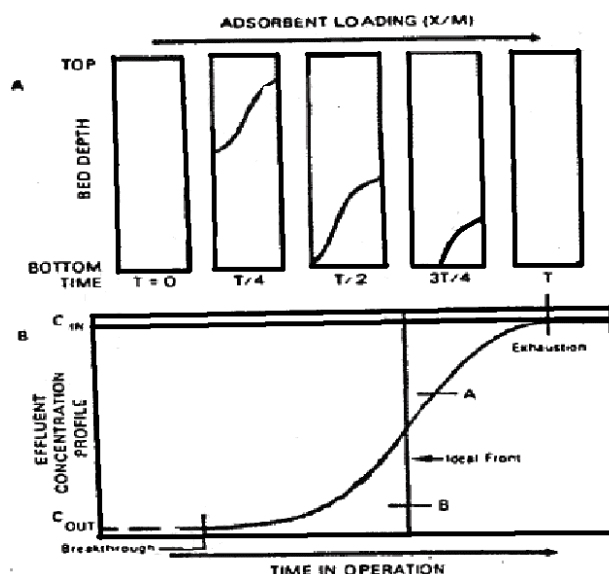
5.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลเยอ กะลามะพร้าว กากกาแฟ ฟางข้าว เปลือกไม้ ชังข้าวโพด หรือถ่านจากการเผาต้นธูปฤาษี ต้นกกกลม ผักตบชวา เป็นต้น

5.8.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่นแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา และสาหร่าย (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

## 6. ลักษณะของกราฟเบรคทรูจ (Breakthrough Curve) และการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับ Fixed-bed adsorption column

Fixed-bed adsorption column เป็นระบบการดูดซับที่ให้น้ำไหลผ่านชั้นดูดซับที่อยู่กับที่ ไม่มีการขึ้นลงในลักษณะเดียวกับการกรอง ลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับเริ่มเคลื่อนที่ลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นสารดูดซับ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนล่างของชั้นสารดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 19 ณ จุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakthrough) หรือจุด  $C_B$  และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้น คือ การดูดซับค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำได้อีก ซึ่งนิยมเรียกโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve จนถึงจุด  $C_E$  ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) นิยมใช้กันที่ 95% ของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบ

กราฟเบรคทรูจโดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้าย ตัวเอส (S-Shape) กรณีที่เส้นกราฟมีความลาดชันมาก ๆ แสดงว่า ในการดูดซับจะมี Film Transfer Coefficient และ Internal Diffusion Coefficient สูง หรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะลาดชันต่ำ ( $1/n$  มีค่าน้อย) เมื่อกรองน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (ปริมาตรต่างๆ) คือ  $C_c$  ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่สนใจคือ เบรคทรูจ และ จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ  $0.95C_c$  หรือจุด  $C_E$  ซึ่งปริมาตรที่สารดูดซับหมดสภาพ



ภาพที่ 19 Breakthrough Curve ของ Fixed-bed adsorption column

ที่มา: Faust and Aly (1987)

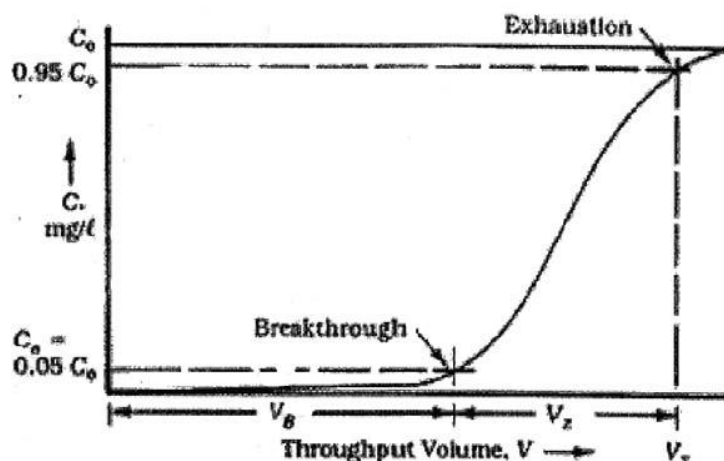
ภาพที่ 20 ถ้าคำนวณพื้นที่ภายใต้เส้น  $0.95C_c$  จนมาถึงเส้น  $C_c$  จะได้ปริมาณสารในของเหลวทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์ และถ้านำสารปริมาณสารดูดติดผิวที่บรรจุในคอลัมน์มาหารจะได้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของวัสดุ คัดัดที่สามารถดูดติดสารที่อยู่ในของเหลวนั้นๆ ความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็กๆ หารด้วยวัสดุดูดติดที่นำมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในคอลัมน์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการที่ได้นั้นคือ

$$\text{ความสามารถในการดูดติดผิว} = \frac{\sum_{n=1}^T (C_E - C_{ci}) DV_i}{\text{Weight Media}}$$

โดยที่  $C_c$  = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่จุดหมดสภาพ (95% ของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่เข้าระบบ)

$C_{ci}$  = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลว (Solute) ที่ผ่าน ณ ปริมาตร ที่  $i$

$V_i$  = ปริมาตร ณ เวลา  $i$



ภาพที่ 20 รูปของกราฟเบรคทรูจในกระบวนการดูดติดผิว

ที่มา: Faust and Aly (1987)

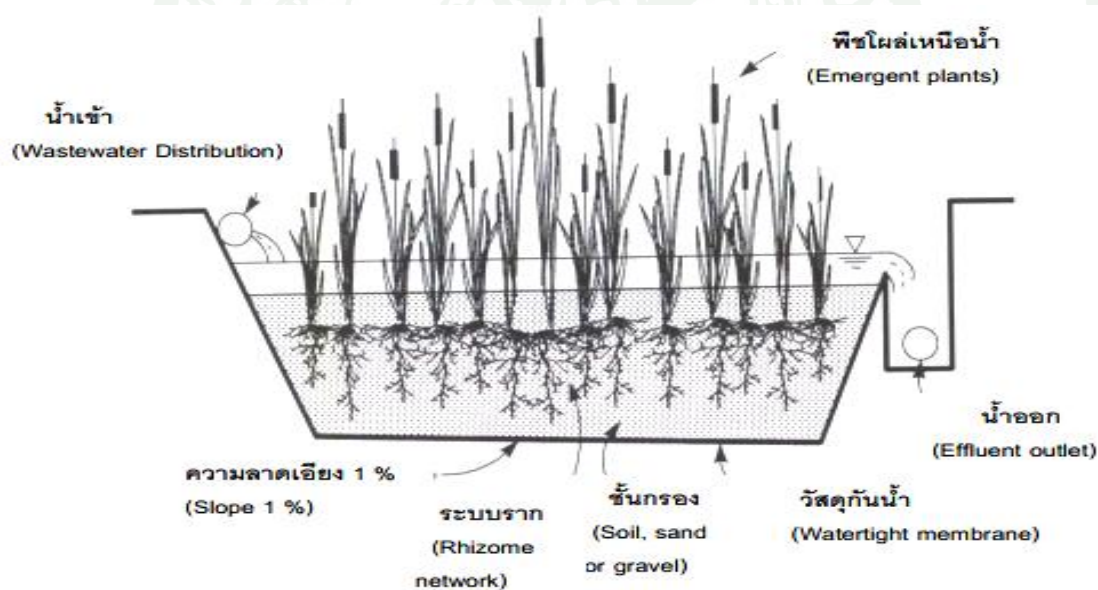
## 7. เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ระบบการบำบัดน้ำเสียแบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ เป็นการบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยา โดยอาศัยพืชน้ำ และจุลินทรีย์ ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย โดยพืชและดินช่วยดูดซับมลสาร ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเปลี่ยนให้เป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นธาตุอาหารของพืช ซึ่งพืชจะดูดธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียนลดลง (ลักษณะ, 2539) ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำจะมี 2 ประเภท คือ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ โดยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้มากกว่า สามารถออกแบบ ควบคุมสถานที่ตั้ง การไหลของน้ำ และระยะเวลาเก็บกักน้ำได้ (Jing *et al.*, 2001) โดยจะนิยมปลูกพืชประเภท โพล์พื้นน้ำ (Emerged Plant Constructed Wetland) ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นี้ เช่น หญ้าสตาร์ หญ้าโคสครอส แวนแก้ว ภูฤาษี กกกลม กกอีปัด แพงพวนน้ำ เป็นต้น โดยคุณลักษณะเด่นของพืชโพล์พื้นน้ำที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียคือ ลำต้นมีลักษณะแข็งแรงกว่าพืชใต้น้ำ ใบค้ำ านบนจะมีคิวติน และปากใบ มีระบบเนื้อเยื่อท่อลำเลียงประกอบไปด้วยไซเลม และโฟลเอ็มที่เด่นชัด ทำให้มีลักษณะการทำงานเหมือนเครื่องปั๊มอากาศ คือ ลำเลียงออกซิเจนจากอากาศลงสู่ราก สามารถบำบัด มลสารต่างๆ ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบพืชโพล์พื้นน้ำจะแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (ลักษณะ, 2539; ศุวศา, 2546) ดังนี้



## 7.1 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetland; FWS)

เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่น้ำเสียไหลผ่านผิวหน้าดินหรือตัวกลาง สัมผัสกับอากาศโดยตรง จากนั้นจึงไหลซึมลงสู่พื้น มีระดับน้ำลึกประมาณ 0.1 – 0.6 เมตร แต่โดยทั่วไปจะมีระดับความลึกประมาณ 0.3 เมตร พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในรูปแบบนี้อาศัยการทำงานของพืชในการบำบัดน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งจะปล่อยให้ น้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างช้าๆ ผ่านก้นดินพืช และรากพืช เกิดการไหลของน้ำแบบไหลตามกันอย่างช้าๆ น้ำเสียจะไหลตามแนวนอนขนานกับพื้นดินซึ่งมีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูด้วยวัสดุกันซึม โดยพืชน้ำจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของแร่ธาตุ เป็นที่ซัดเกาะของพอกจุลินทรีย์ เกิดการตกตะกอนโดยพืช และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ค่าบีโอดีลดลง (ศุวศา, 2546) ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวแสดงในภาพที่ 21

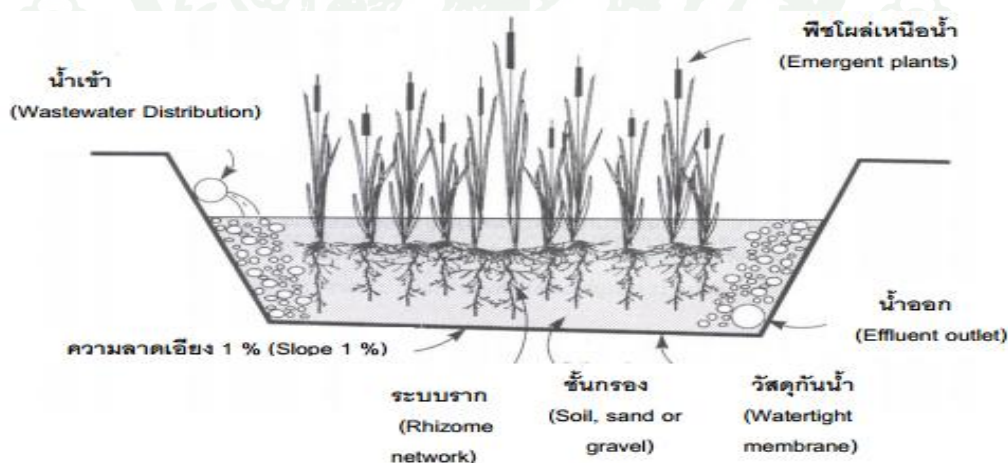


ภาพที่ 21 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (Free Water Surface Flow Constructed Wetland; FWS)

ที่มา: ศุวศา (2548)

## 7.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland; SF)

เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยผ่านลงไปในพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีพืชน้ำขึ้นอยู่ ตัวกลางที่ใช้เป็นพวกหินบด กรวด หรือดินชนิดต่างๆ ซึ่งตัวกลางอาจมีเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ (ลักขณิ, 2539) ความหนาแน่นตัวกลางประมาณ 0.6 – 0.7 เมตร ด้านล่างอัดด้วยดินเหนียวหรือวัสดุกันซึม เพื่อรักษาระดับน้ำซึ่งจะต่ำกว่าผิวดักกลางเล็กน้อย (สุวศา, 2546) โดยที่ทางน้ำเข้าจะไหลผ่านข้างใต้ชั้นตัวกลางในแนวนอนหรือแนวตั้งได้ และทางน้ำออกอยู่ลึกจากผิวดักกลางประมาณ 0.3 – 0.6 เมตร (ระดับน้ำอยู่เท่ากันหรือต่ำกว่าผิวดิน) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ระบบนี้ น้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบจะถูกบำบัดระหว่างสัมผัสพื้นผิวดักกลางและรากพืชซึ่งมีจุลินทรีย์เกาะอยู่ โดยสารแขวนลอยหรือสารอินทรีย์จะตกตะกอนภายในตัวกลาง ส่วนสารที่ละลายได้จะถูกดูดซับที่ผิวของตัวกลางและย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ธาตุอาหารในน้ำเสียจะลดลงเนื่องจากกลไกการดูดซึมของพืช (วัชรพงษ์, 2554) ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ปานกลาง ที่มีความเข้มข้นของบีโอดีอยู่ในช่วง 30 – 175 มิลลิกรัม/ลิตร (United States Environmental Protection Agency, 2000) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง แสดงดังภาพที่ 22



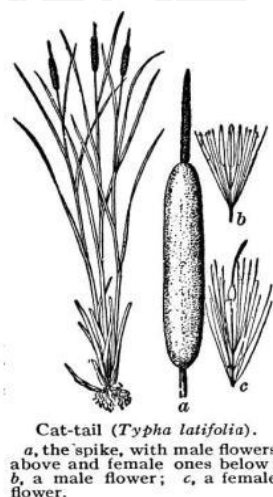
ภาพที่ 22 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland; SF)

ที่มา: สุวศา (2548)

## 8. พืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

### 8.1 ต้นธูปฤาษี

ต้นธูปฤาษี (Narrow-leaved cattail, Lesser reedmace, Bulrush, Cattail, Flag, Reedmace tule, Elephant-Grass และ Indian Leedmace; ชื่อวิทยาศาสตร์: *Typha angustifolia* Linn.) มีชื่อท้องถิ่นคือ ธูปฤาษี (กรุงเทพฯ), กกช้าง (ภาคกลาง), หญ้าสลาบลหวง (ภาคเหนือ), เพ็ญ, หญ้าเพ็ญ, ปรีอ, หญ้าปรีอ และหญ้ากกช้าง (ดวงพร และรังสิต, 2544) แสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.)

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2552)

ธูปฤาษีเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี จัดเป็นวัชพืชในกลุ่มวัชพืชชายตลิ่ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา สามารถแพร่กระจายทั่วไปได้ในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ มักขึ้นในที่ลุ่มมีน้ำขัง ต้นเจริญตั้งตรงเป็นกอสูงประมาณ 1-2 เมตร มีลำต้นใต้ดินเรียกว่าเหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ ใบเป็นใบเดี่ยวแบนเรียบเรียวแหลม ความกว้างของใบประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ยาวมากกว่า 1 เมตร กลางใบมีลักษณะเซลล์ที่มีความยืดหยุ่นเหมือนฟองน้ำ โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกัน กาบใบด้านในมีเมือกเหนียว ดอกออกเป็นช่อแบบสไปค์ คล้ายรูปดอกตัวผู้กับดอกตัวเมียจะแยกกันอยู่กันคนละส่วนในช่อดอกเดียวกัน คือส่วนที่เป็นดอกตัวผู้อยู่ด้านบนของช่อดอก ดอกย่อยอยู่กันหลวมๆ รอบก้านช่อดอกมีความยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่าง

เป็นดอกตัวเมีย ดอกย่อยเรียงตัวอัดกันแน่น ความยาวช่อดอก 7-28 เซนติเมตร มีเมล็ดประมาณ 20,000-700,000 เมล็ด (Grace and Harrison, 1986) ขนาดเล็กกว้าง 0.2-0.3 มิลลิเมตร ยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร มีขนสั้นละเอียดสีขาวคล้ายไหม (silky) ปกคลุม ปลายทั้งสองด้านเรียวยาวโดยปลายด้านหนึ่งมีหางหรือเส้นยาวยื่นออกมาจากเมล็ด (สุรชัย, 2538; ดวงพร และรังสิต, 2554) เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตกเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนุนและปลิวกระจายทั่วไปในสภาพที่มีแสงจัด สามารถงอกและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นยังสามารถเจริญเติบโตในสภาพดินและน้ำที่มีความเค็มสูงได้ (Wilcox, 1986) ในอดีตต้นธูปฤๅษีถือเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่ทำให้ความเสียหายต่อสถานะแวดล้อม และการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลง ทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็น เป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำและการพักผ่อนหย่อนใจ การควบคุมและกำจัดวัชพืชชนิดนี้ทำได้หลายวิธี เช่น ตัด เผา และใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามการกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำให้ต้นธูปฤๅษีหมดไปจากพื้นที่ได้ เนื่องจากกำจัดได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือน้ำเท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการนำธูปฤๅษีมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆแทน เช่น ใช้เป็นอาหารสัตว์ ทำเครื่องจักรสาน ใช้เป็นเชื้อเพลิง และปุ๋ยหมัก รวมถึงการนำธูปฤๅษีมาบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการทางธรรมชาติ เป็นต้น

## 8.2 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (Vetiver Grass; ชื่อวิทยาศาสตร์: *Vetiveria zizanioides*) เป็นพืชตระกูลหญ้า เช่นเดียวกับอ้อยหรือตะไคร้ มีใบเลี้ยงเดี่ยวอายุยืน สามารถปรับตัวได้เข้ากับสถานะแวดล้อมได้ดี มีความทนทานต่อโรคพืช ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติในเขตร้อน กระจายทั่วไปในประเทศไทย สันนิษฐานว่าต้นกำเนิดมาจากประเทศอินเดีย และแพร่กระจายลงมาบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะในประเทศแถบเส้นศูนย์สูตรของทวีปเอเชีย หญ้าแฝกสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิดตั้งแต่พื้นที่ลุ่มจนถึงพื้นที่ดอน ลักษณะกอหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางกอประมาณ 50-90 เซนติเมตร มีรากส่วนใหญ่เป็นระบบรากฝอยสานกันแน่นหยั่งตรงลึกแนวตั้งลงในดินไม่แผ่ขนาน มีทั้งรากแกนรากแขนง หญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 18 เดือน รากจะเจริญเติบโตเต็มที่ เมื่อรากแก่ผนังด้านนอกจะแข็ง มีลักษณะอวบน้ำจะตายและจะถูกแทนที่ด้วยเซลล์ชั้นที่อยู่ถัดไปทำให้ รากหนาขึ้น มีความแข็งแรง ดูดซับน้ำและความชื้นโดยเฉพาะป้องกันส่วนลำเลียงน้ำและอาหารที่อยู่ภายในได้ดีขึ้น ในสภาพธรรมชาติจะพบหญ้าแฝกตามพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ทางน้ำธรรมชาติริมหนอง บึง ในป่าเขา เมื่อนำพันธุ์ที่ได้คัดเลือกแล้วไปปลูกในพื้นที่ต่างๆทั่วโลก พบว่าขึ้นได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ โดยหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบใกล้เคียงระดับน้ำทะเลถึงพื้นที่ภูเขา



สูงถึง 2,600 เมตร จากระดับน้ำทะเล พื้นดินเปรี้ยว (pH 4.5) ดินด่าง (pH 10.5) ดินเค็ม (20 มิลลิโมห์) ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ พื้นที่มีปริมาณฝนน้อย 200 มิลลิเมตรต่อปีหรือมีฝนตกชุก 3,900 - 5,000 มิลลิเมตรต่อปี มีสภาพอากาศหนาวเย็น -9 องศาเซลเซียส ถึงอากาศร้อนจัด 45 องศาเซลเซียส (วิฑูร และอาทิตย์, 2536)

### 8.2.1 หญ้าแฝกหอม หรือหญ้าแฝกกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* L. Nash.)

หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝก กลุ่ม มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย เป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมที่จะขึ้นอยู่ในพื้นที่นั้นๆ ได้ดี ทำให้นำไปปลูกและขยายพันธุ์ได้ทั่วไป หญ้าแฝกหอม ลักษณะออกเป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง สูงประมาณ 150-200 เซนติเมตร มีการแตกแขนงของลำต้น ใบยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร ใบมีสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ปลายใบแบน เนื้อใบค่อนข้างเหนียว มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน ท้องใบออกสีขาวชัดเจนกว่าด้านหลังใบ และเมื่อนำใบส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกั้นขวางในเนื้อ ใบ (septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นที่ใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ ฝังอยู่ในตัวแผ่นใบ ช่อดอกสูง 150-250 เซนติเมตร ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง ดอกย่อยส่วนใหญ่ไม่มีรยางค์แข็ง ขนาดเมล็ดโตกว่าหญ้าแฝกขนาดเล็กน้อย รากมีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหยเฉลี่ย 1.4-1.6 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง โดยทั่วไปรากจะหยั่งลึกได้ประมาณ ตั้งแต่ 100-300 เซนติเมตร (วีระชัย, 2536) หญ้าแฝกหอมแสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 แฝกหอม หรือ (*Vetiveria zizanioides* L. Nash)

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2552)



### 8.2.2 หญ้าแฝกดอน หรือแฝกพื้นบ้าน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus)

หญ้าแฝกดอนหรือแฝกพื้นบ้านนั้นมีการกระจายพันธุ์อยู่ในวงแคบๆ ตามธรรมชาติเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ ประเทศไทย ลาว เขมร เวียดนาม และมาเลเซีย เท่านั้น หญ้าแฝกดอนจะพบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง หรือที่ดินระบายน้ำได้ดีในทุกภาคของประเทศไทยโดยเฉพาะในป่า เต็งรัง แต่จะมีน้อยในภาคใต้ สามารถขึ้นได้ดีทั้งในที่แดดปานกลาง ยอดกอส่วนปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอดตะไคร้ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม ลักษณะกอเป็นพุ่ม ใบยาว สูง 100-150 เซนติเมตร ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น ใบยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร สีเขียวซีด หลังใบพับเป็นสันแข็งสามเหลี่ยม ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบแต่ซีดกว่าแผ่นใบ เมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เนื้อใบหยาบ สากคาย มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูร่วนไม่เหนียวมัน ช่อดอกสูง 100-150 เซนติเมตร มีหลายสีตั้งแต่สีขาว ครีမ် สีม่วง ดอกย่อยมีขนาดเล็ก แข็ง เมล็ดมีขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกหอม รากไม่มีความหอม สั้นกว่าหญ้าแฝกดอน โดยทั่วไปจะหยั่งลึก ประมาณ 80-100 เซนติเมตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2536) หญ้าแฝกดอนแสดงดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 หญ้าแฝกดอน หรือแฝกพื้นบ้าน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus)

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2552)

## 9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิติโรจน์ และคณะ (2543) ทำการศึกษาการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินที่นำเข้ามาจากประเทศอเมริกาและจากกะลามะพร้าวที่ผลิตได้ในประเทศไทย พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินมีอัตราเร็วของการดูดซับสูงกว่า และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ความสามารถในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย โดยพบว่าความสามารถในการดูดซับจะดีในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน เมื่อใช้เกลือแกงปรับสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมของ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินในสภาวะการดูดซับที่เหมาะสม ดังนั้นจึงสามารถใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวแทนการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินในการดูดซับสีย้อมได้

จันทนา และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษการดูดซับสีย้อมเบสิกด้วยสาหร่ายน้ำจืดสีเขียว *Spirogyra* sp. ซึ่งดำเนินการทดลองแบบกะ และศึกษาถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามวลชีวภาพจากสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกมากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 และผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับที่จุดสมดุลบ่งชี้ว่าการดูดซับสีย้อมเบสิกลดลงเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อคำนวณโดยใช้โมเดลการดูดซับของฟรันทซ์และแลงก์เมียร์ยืนยันได้ว่าสาหร่ายน้ำจืดสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพเพื่อขจัดสีย้อมเบสิกจากสารละลายได้ และอาจเป็นประโยชน์ต่อการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอต่อไป

ประนัศดา (2548) ศึกษาการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อมไหม โดยในการศึกษาใช้หน่วยการทดลอง 3 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นบ่อที่ไม่ปลูกพืชใช้เป็นชุดควบคุม แบบที่ 2 เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกธูปฤาษี และแบบที่ 3 เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่ปลูกกกกล่ม โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่ได้จากการย้อมไหม 6 สี คือ สีแดงสด สีแดง สีเปลือกมังคุด สีเขียวก้านมะลิ สีน้ำเงิน สีบานเย็น และสีเหลืองทอง พบว่าประสิทธิภาพในการลดสีในน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ทั้ง 2 แบบ มีค่าสูงกว่าบ่อควบคุม และพบว่ากกกล่มมีประสิทธิภาพในการลดสีสูงกว่าธูปฤาษี มีประสิทธิภาพในการลดสีร้อยละ 72.50

ปัญญา (2543) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสี โดยชั้นกรองทรายร่วมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีร้อยละ 73.60-85.20 ความขุ่นร้อยละ 82.75-86.78 ของแฉ่งแขวนลอยร้อยละ 75.93-85.98 และประสิทธิภาพการบำบัด COD ร้อยละ 72.40-81.00 เนื่องจากถ่านกัมมันต์ เมื่อดูดซับอนุภาคสี สารอินทรีย์ และมลสารต่างๆ แล้ว จะทำให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนลดลง ดังนั้นชั้นกรองทรายจะช่วยกำจัดความขุ่น สารแขวนลอย ออกก่อน ซึ่งจะช่วยลดภาระของถ่านกัมมันต์ ทำให้สามารถกำจัดสีทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้

ศิริพรรณ (2554) ทำการศึกษาระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ ประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว (FWS) และพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (SF) เพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมเอโซ และสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ผ่านระบบการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (AS) ร่วมกับการปลูกต้นอ้อในระบบ ผลการศึกษาพบว่าระบบบำบัด แบบ SF-FWS สามารถนำมาใช้บำบัดสีย้อมเอโซ และฟอสฟอรัสได้ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเอโซ สีโอดี ทีเคเอ็น แอมโมเนียไนโตรเจน และฟอสฟอรัสจากน้ำทิ้งฟอกย้อมสังเคราะห์ในช่วงร้อยละ 95.22-98.58, 79.16-90.76, 72.30-81.69, 68.62-79.56 และ 88.48-92.53 ตามลำดับ แสดงว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ SF-FWS สามารถนำไปบำบัดสีย้อมเอโซจากน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมได้

สุจินต์ (2544) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีด้วยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยได้ศึกษาที่อัตราน้ำล้นผิวที่ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.2 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร/ชั่วโมง พบว่าที่อัตราน้ำล้นผิวต่ำ มีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าที่อัตราน้ำล้นผิวสูง และพบว่าที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 80 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงสุด (ทำการศึกษาที่ความสูง 20, 50 และ 80 เซนติเมตร จากฐานคอลัมน์) แต่เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีนี้มีต้นทุนสูง จึงแนะนำให้บำบัดร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่น หรือบำบัดน้ำเสียที่ได้มาตรฐานแล้ว แต่ยังเหลือสีตกค้าง ที่ยังไม่สามารถบำบัดได้ จึงใช้วิธีการบำบัดด้วยวิธีการดูดซับนี้

AbdurRahman *et al.* (2013) ทำการศึกษาโดยใช้เปลือกส้มเป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมจากน้ำเสีย ทดลองในปริมาณตัวดูดซับที่ต่างกัน ในสถานะ pH และเวลาในการดูดซับที่ต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมเป็นร้อยละ 60-70 ที่ pH 7 ด้วยเวลา 120 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 1.5 กรัมต่อน้ำเสีย 25 มิลลิลิตร



Bulc and Ojstrsek (2008) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียที่มาจากโรงงานทอผ้า ด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ (CW) ทำการทดลองโดยใช้รูปแบบการบรรจุวัสดุตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ประกอบด้วยกรวด ทราบ และซีโอไลต์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ทำการทดลอง ในการทดลองแบบเบตซ์พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้มากกว่า 70% และบำบัด COD และ TOC ได้มากกว่า 45% จากผลการทดลองนี้ทำการทดลองในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลแนวตั้ง (VF) และแบบไหลแนวนอน (HF) ร่วมกับการปลูกต้นอ้อ โดยใช้น้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานย้อมผ้าฝ้าย พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัด COD 84%, BOD<sub>5</sub> 66%, TOC 89%, N 87%, NH<sub>4</sub>-N -331%, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 88%, TSS 93% และสีย้อมผ้า 90% พิสูจน์ได้ว่าระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มาจากโรงงานย้อมผ้าได้

Davies *et al.* (2005) ศึกษาการใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง ในการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม โดยใช้ sandy-clay Soil เป็นตัวกลางในระบบบำบัด และปลูกต้นอ้อในระบบ พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอไลต์เป็นร้อยละ 74 และ 64 ตามลำดับ

Eren and Acar (2006) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ Reactive Black 5 ด้วยเถ้าลอย (fly ash) และถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมชนิด Reactive Black 5 ของเถ้าลอยและถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีค่าเท่ากับ 7.936 และ 58.823 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Black 5 จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมชนิด Reactive Black 5 เพิ่มขึ้น

Nopkhuntod *et al.* (2012) ทำการศึกษาโดยใช้หินดินดาน (Shale) เป็นตัวดูดซับ ทำการดูดซับสีย้อม 3 สี คือ สีแดง (Red RGB), สีฟ้า (Blue RN gran) และสีเหลือง (Yellow 3RS 133% gran) โดยทำการทดลองแบบเบตซ์เพื่อทดสอบผลของเวลา, pH, อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น เมื่อคำนวณโดยใช้โมเดลการดูดซับของแลงก์เมียร์พบว่าหินดินดานมีความสามารถในการดูดซับสีแดง สีฟ้า และสีเหลืองสูงที่สุดคือ 0.0110-0.0322 มิลลิกรัม/กรัม, 0.4479-1.1409 มิลลิกรัม/กรัม และ 0.0133-0.0255 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยค่าความจุของการดูดซับของหินดินดานสูงที่สุดที่ pH 2 อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 700 Pt-Co ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า pH ลดลง เมื่อทำการ

ทดลองโดยใช้น้ำเสียที่มาจากการฟอกย้อมสิ่งทอผ่านลงในคอลัมน์ที่บรรจุหินดินดานสำหรับดูดซับ พบว่ามีประสิทธิภาพในการลดค่า COD และกำจัดสีได้ 97% และ 90% ตามลำดับ

Mohammed *et al.* (2007) ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เปรียบเทียบกับเม็ดดูดความชื้น (Activated Alumina) โดยศึกษาสีย้อม 2 ประเภท (สี reactive และสี dispersed) ทั้งหมด 3 สี (สีฟ้า, สีแดง, สีเหลือง) ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 99.7% ซึ่งดีกว่าเม็ดดูดความชื้นที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 95%

Ong *et al.* (2009) ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมชนิด Acid Orange 7 ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักกลาง (up-flow constructed wetland) โดยทำการปลูกพืช 2 ชนิด คือ ต้นอ้อ และหน่อไม้ฝรั่ง เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าระบบที่ปลูกต้นอ้อให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Acid Orange 7 และซีไอดีเท่ากับร้อยละ 96 และ 82 ตามลำดับ และระบบที่ปลูกหน่อไม้ฝรั่งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมชนิด Acid Orange 7 และซีไอดีเท่ากับร้อยละ 96 และ 79 ตามลำดับ

Rao *et al.* (2006) ได้ใช้ถั่วลอยในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและทองโกรด เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น จาก 15-60 นาที

Sun *et al.* (2010) ได้ศึกษาการนำถั่วลอยมาใช้ในการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟ 2 ชนิด ได้แก่ Reactive Red 23 และ Reactive Blue 171 จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม Reactive Red 23 และ Reactive Blue 171 มีค่าเท่ากับ 2.10 และ 1.86 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0000 กรัม
- 1.3 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.4 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 1.5 ตู้อบ
- 1.6 คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร
- 1.7 กระดาษพลาสติกหุ้มพลาสติก ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร

#### 2. สารเคมี

สีย้อมชนิดรีแอคทีฟ (reactive dye) จากโรงงานย้อมผ้าในโครงการพัฒนาออยดุง 9 ชนิด คือ 2% Yellow LS-R, 2% Yellow LS-4G, 2% Orange Hf-2R, 2% Red LS-B, 2% Blue LS-3R, 2% Black R, 4% Navy LS-G, 2% Turquoise H-GN และ 2% Blue G

#### 3. วัสดุดูดซับ

ถ่านกัมมันต์ จากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษ

## วิธีการ

### 1. การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า

1.1 สารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสีย้อมผ้ามาตรฐานชนิดละ 0.02 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตรแต่ละขวด

1.2 น้ำเสียสังเคราะห์ (Dyes Synthetic wastewater) ประกอบด้วยสีย้อมผ้า 9 ชนิด ผสมกัน แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งสีย้อมผ้า 9 ชนิด ชนิดละ 0.02 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร

### 2. วิเคราะห์หาค่าความยาวคลื่นที่สีย้อมแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด ( $\lambda_{\max}$ )

โดยนำสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าแต่ละสีที่เตรียมไว้จากข้อ 1.1 มาสแกนหา  $\lambda_{\max}$  ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

### 3. การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสม

เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด ผสมกัน แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่งน้ำหนักของสีย้อมผ้าแต่ละชนิดดังตารางที่ 3 ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400, 420, 470, 546, 550, 588, 616, 660 และ 662 นาโนเมตรตามลำดับ สร้างกราฟมาตรฐานโดยให้ค่าการดูดกลืนแสงโดยเฉลี่ยอยู่ในแนวแกนตั้ง และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสมอยู่ในแนวแกนนอน

**ตารางที่ 3** น้ำหนักของสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสมที่แตกต่างกัน

| ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสม | น้ำหนักของสีย้อมผ้าแต่ละชนิด (กรัม) |
|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| 10                                        | 0.01                                |
| 20                                        | 0.02                                |
| 30                                        | 0.03                                |
| 40                                        | 0.04                                |
| 50                                        | 0.05                                |

#### 4. การเตรียมตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

นำถ้ำลอยลิกไนต์มาอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้นเพื่อเก็บไว้ใช้ในการวิจัยต่อไป

#### 5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสม และ ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมด้วยกระบวนการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

ปัจจัยที่ทำการศึกษา มีดังนี้

##### 5.1 ศึกษาปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์

ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า 2% Yellow LS-R 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วใช้ปิเปตดูดเฉพาะส่วนใส และนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ทำการทดลองกับสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าอีก 8 ชนิด เช่นเดียวกัน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์

### 5.2 ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากสีย้อมผ้าผสม

ซึ่งถั่วลยถิกไนต์ในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.1 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1 โดยใช้สีสังเคราะห์ที่ได้จากสีย้อมผ้าผสมปริมาตร 50 มิลลิลิตร และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่  $\lambda_{\max}$  ของสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถั่วลยถิกไนต์

### 5.3 ศึกษาระยะเวลาสัมผัส

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.2 โดยแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงคือ 1 – 6 ชั่วโมง และเป็นวันคือ 1 – 5 วัน

### 5.4 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมผ้าของถั่วลยถิกไนต์

ทำการทดลองโดยแปรผันปริมาณถั่วลยถิกไนต์ 0.5 ถึง 5 กรัม ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อ 5.3 และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1 และนำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

### 5.5 ศึกษาปริมาณดิน

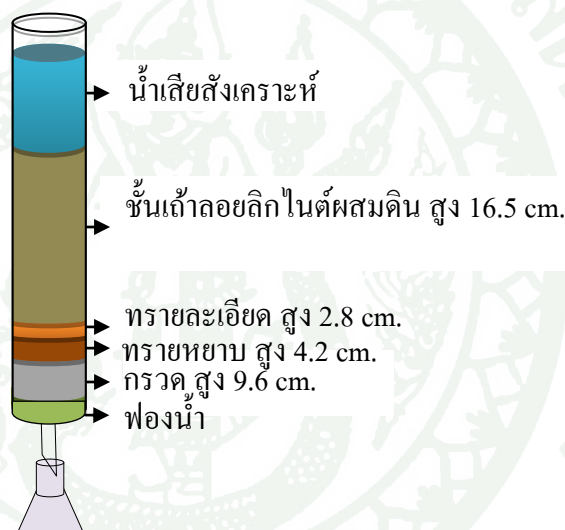
ดินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นดินนาผสมทรายในอัตราส่วน 1:3 ทำการทดลองโดยชั่งดินนาปนทรายปริมาณ 10, 20 และ 30 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาได้จากการทดลองข้อ 5.3 และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่  $\lambda_{\max}$  ของสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิด และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้า

### 5.6 ศึกษาอัตราส่วนปริมาณถั่วลยถิกไนต์ต่อดินนาปนทราย

แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถั่วลยถิกไนต์ผสมกับดินนาปนทรายเป็น 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 กรัม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.5

## 6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของเถ้าลอยลิกไนต์ โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์

นำสภาวะที่เหมาะสมแต่ละปัจจัยที่ให้สภาวะการบำบัดสีย้อมผ้าผสมที่ดีที่สุดในการทดลองแบบเบตซ์ในการทดลองข้อ 5 มาทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยจำลองชั้นวัสดุปลูกในคอลัมน์แก้ว ลำดับชั้นที่บรรจุจากล่างขึ้นบน คือ กรวด 9.6 เซนติเมตร ทรายหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2.8 เซนติเมตร และเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 5.6 สูง 16.5 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 26 โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส แตกต่างกัน 3 วิธี คือ แบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง และแบบแช่ขัง 5 วัน



ภาพที่ 26 คอลัมน์แก้วและลำดับชั้นของวัสดุปลูกในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

### 6.1 การบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง

ทำการทดลองโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ 5,500 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 100 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของเถ้าลอยลิกไนต์จนประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่ คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัด และเขียนกราฟเบรคทูร์จ์ (Breakthrough Curve)



## 6.2 การบำบัดแบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง

ทำการทดลองโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร แช่ขังไว้ 4 ชั่วโมง เก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์ ทำการทดลองไปเรื่อยๆจนกระทั่งประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่ คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัด และเขียนกราฟเบรคทรูจ

## 6.3 การบำบัดแบบแช่ขัง 5 วัน

ทำการทดลองโดยเติมน้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร แช่ขังไว้ 5 วัน เก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ในวันที่ 5 และปล่อยแห้ง 2 วัน นำน้ำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์ ทำการทดลองไปเรื่อยๆจนกระทั่งประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่ คำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัด และเขียนกราฟเบรคทรูจ

## 6.4 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 6.1, 6.2 และ 6.3 แต่ชั้นบนสุดใช้ดินเพียงอย่างเดียวไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

## 7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยการจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน



ภาพที่ 27 กระบะปลูกพืช และชั้นวัสดุเพาะปลูก

### 7.1 การบำบัดสีย้อมผ้าด้วยการจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักกลาง

ทำการทดลองด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักกลาง ในกระเบบพลาสติกรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุปลูกให้มีความสูงตามระดับดังนี้ คือ กรวด 7 เซนติเมตร ทราบหยาบ 3 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วน 1:60 ความสูง 21 เซนติเมตร ดังภาพที่ 27 ปลูกต้นธูปฤาษี และหญ้าแฝกจนพืชเจริญเติบโตแข็งแรง จึงทำการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ 140 ลิตร ผ่านกระเบบอย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านกระเบบทุกๆ 20 ลิตร และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์ จนประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่

### 7.2 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1 แต่ชั้นบนสุดของวัสดุปลูกใช้ดินเพียงอย่างเดียวไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ และปลูกหญ้าแฝก

## 8. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและดิน ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## 9. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาทำการทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2556 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557

## ผลและวิจารณ์

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุปลูก ในระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลาง การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองแบบ เบตซ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัด ได้แก่ ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ ระยะเวลาการบำบัด ไอโซเทอรั่มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และอัตราส่วนปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดิน ส่วนที่สองเป็นการทดลองการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง โดยจำลองชั้นวัสดุปลูกในคอลัมน์ โดยชั้นบนสุดเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน และบำบัดสีย้อมผ้าด้วยวิธีที่แตกต่างกันด้วยระยะเวลาบำบัดที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบเบตซ์ และส่วนที่สามเป็นการทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็กเพื่อจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

### 1. ผลการวิเคราะห์หาความยาวคลื่นที่สีย้อม 9 ชนิดสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ( $\lambda_{max}$ )

ทำการสแกนหาความยาวคลื่นที่สารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด ( $\lambda_{max}$ ) ในช่วงความยาวคลื่นแสง 400 – 700 นาโนเมตร พบว่าสีย้อมผ้าแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด ที่ความยาวคลื่นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความยาวคลื่นที่สารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดสามารถดูดกลืนได้มากที่สุด

| ชนิดสี          | $\lambda_{max}$ (nm) |
|-----------------|----------------------|
| 2% Yellow LS-R  | 400                  |
| 2% Yellow LS-4G | 420                  |
| 2% Orange Hf-2R | 470                  |
| 2% Red LS-B     | 546                  |
| 2% Black R      | 550                  |
| 2% Blue LS-3R   | 588                  |

#### ตารางที่ 4 (ต่อ)

| ชนิดสี            | $\lambda_{\text{max}}$ (nm) |
|-------------------|-----------------------------|
| 4% Navy LS-G      | 616                         |
| 2% Blue G         | 660                         |
| 2% Turquoise H-GN | 662                         |

#### 2. ผลการเตรียมตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

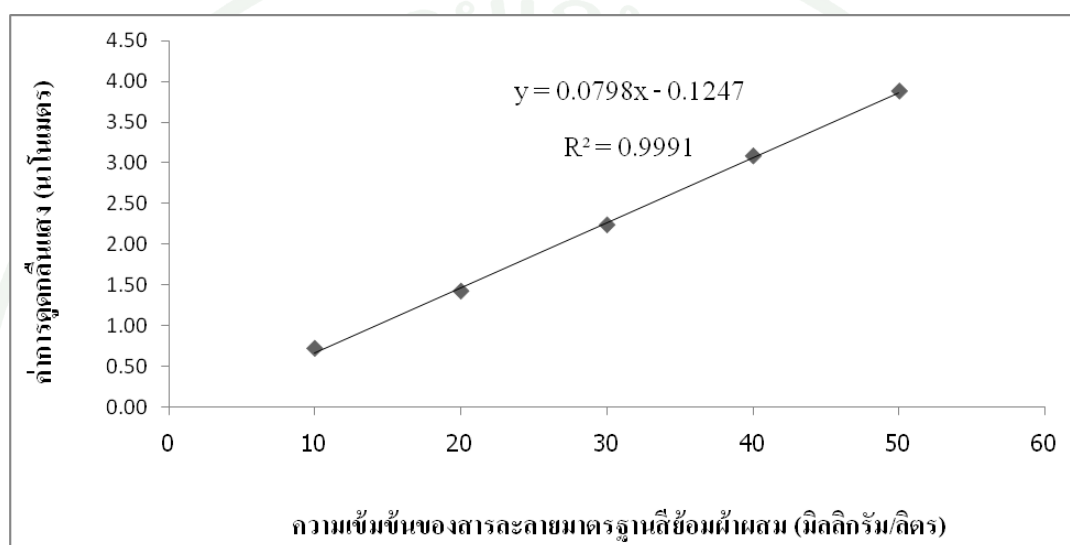
ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นถ้ำที่เกิ ดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ 100 เปอร์เซ็นต์ ของ โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ บริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) จังหวัด และ นำไปผ่านกระบวนการไล่ความชื้น เตรียมไว้สำหรับใช้เป็นตัวดูดซับในการวิจัยต่อไป ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

### 3. ผลการเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้าผสม

กราฟมาตรฐานที่เตรียมได้จากการทดลองข้อที่ 3 ได้กราฟมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 29 ซึ่งกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง สมการถดถอยเชิงเส้นคือ  $y = 0.0798x - 0.1247$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Rsquared) เท่ากับ 0.9991 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



ภาพที่ 29 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้าผสม

### 4. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีข้อมฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์โดยวิธีแบบเบดซ์

#### 4.1 ปริมาณแฉ่ายลอยลิกไนต์

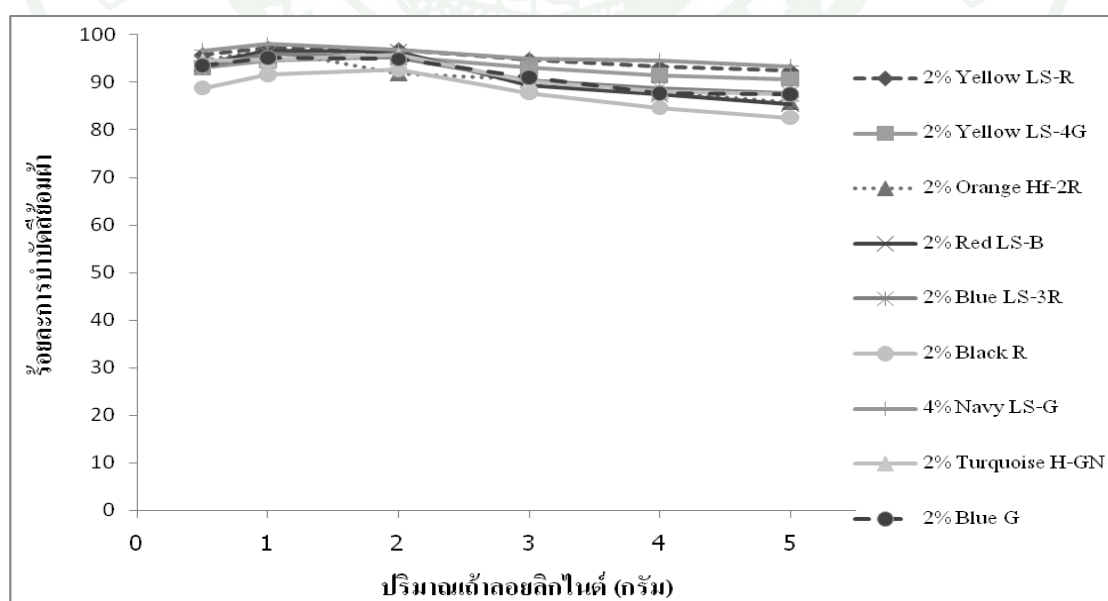
จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 5.1 เมื่อแปรผันปริมาณแฉ่ายลอยลิกไนต์เป็น 0.5, 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้า 9 ชนิด ชนิดละ 50 มิลลิลิตร โดยใช้ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง พบว่าแฉ่ายลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้าได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดังแสดงในตารางที่ 5 และภาพที่ 30 โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแฉ่ายลอยลิกไนต์ประสิทธิภาพการบำบัดสีข้อมฟ้าจะเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มคงที่จนกระทั่งลดต่ำลง และแฉ่ายลอยลิกไนต์ปริมาณ 1 กรัม มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมฟ้าสูงสุดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 95.68 แสดงดังภาพที่ 31 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแฉ่ายลอยลิกไนต์เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่างๆ แต่ปริมาณมลสารที่อยู่ในสารละลายมาตรฐานสีข้อมฟ้าที่แฉ่าย



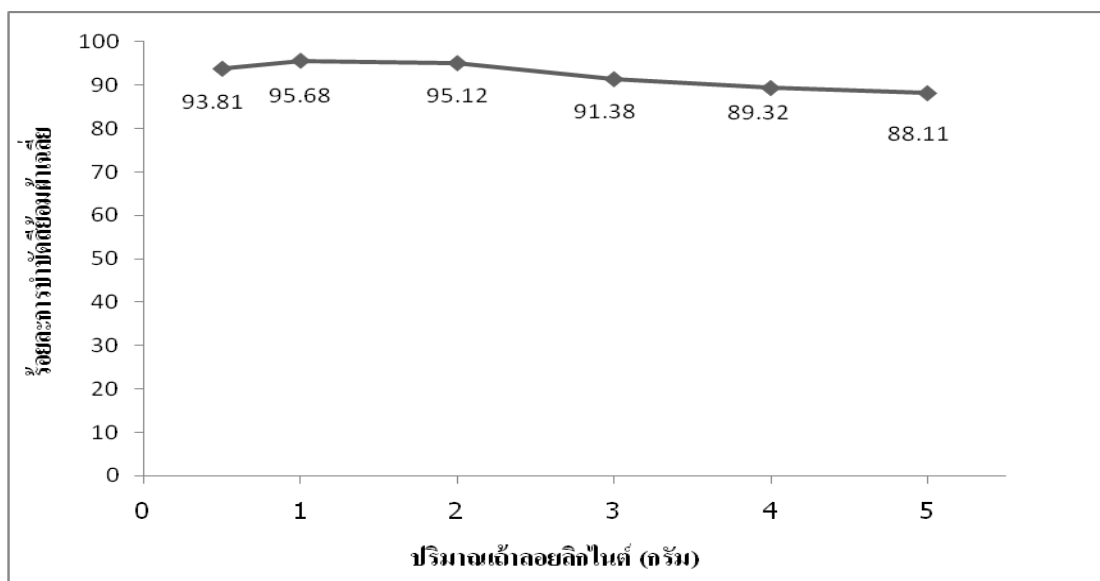
ลิกไนต์ดูดซับได้มีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ จึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการคายซับ (desorption) ร่วมด้วย (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณถ่านลิกไนต์ 1 กรัมในการศึกษาและทดลองปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

ตารางที่ 5 ร้อยละการบำบัดสีข้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ปริมาณถ่านลิกไนต์ที่แตกต่างกัน

| ชนิดสี            | 0.5 กรัม | 1 กรัม | 2 กรัม | 3 กรัม | 4 กรัม | 5 กรัม |
|-------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2% Yellow LS-R    | 95.90    | 97.22  | 96.93  | 94.88  | 93.26  | 92.53  |
| 2% Yellow LS-4G   | 93.04    | 94.64  | 95.36  | 93.04  | 91.45  | 90.72  |
| 2% Orange Hf-2R   | 94.59    | 96.80  | 91.89  | 90.66  | 87.96  | 85.74  |
| 2% Red LS-B       | 93.93    | 96.63  | 96.40  | 89.44  | 87.41  | 85.39  |
| 2% Blue LS-3R     | 93.10    | 96.03  | 95.19  | 90.38  | 88.7   | 87.65  |
| 2% Black R        | 88.83    | 91.69  | 92.73  | 87.79  | 84.68  | 82.6   |
| 4% Navy LS-G      | 96.76    | 98.06  | 96.89  | 94.95  | 94.57  | 93.4   |
| 2% Turquoise H-GN | 94.64    | 94.87  | 95.76  | 90.18  | 88.17  | 87.5   |
| 2% Blue G         | 93.48    | 95.17  | 94.93  | 91.06  | 87.68  | 87.44  |



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านลิกไนต์กับร้อยละการบำบัดสีข้อมผ้าแต่ละชนิด



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผงซักฟอกใส่กับร้อยละโดยเฉลี่ยของการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด

### 3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 5.2 ใช้ผงซักฟอกใส่ปริมาณ 1 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง พบว่าผงซักฟอกในดัมมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดังแสดงในตารางที่ 6 โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าเฉลี่ยร้อยละ 68.58

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์

| ชนิดสี          | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า |
|-----------------|-------------------------|
| 2% Yellow LS-R  | 70.19                   |
| 2% Yellow LS-4G | 71.10                   |
| 2% Orange Hf-2R | 67.47                   |
| 2% Red LS-B     | 74.22                   |
| 2% Black R      | 74.40                   |

ตารางที่ 6 (ต่อ)

| ชนิดสี            | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า |
|-------------------|-------------------------|
| 2% Blue LS-3R     | 73.84                   |
| 4% Navy LS-G      | 72.03                   |
| 2% Turquoise H-GN | 57.81                   |
| 2% Blue G         | 56.15                   |
| เฉลี่ยร้อยละ      | 68.58                   |

### 3.3 ผลการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เหมาะสม

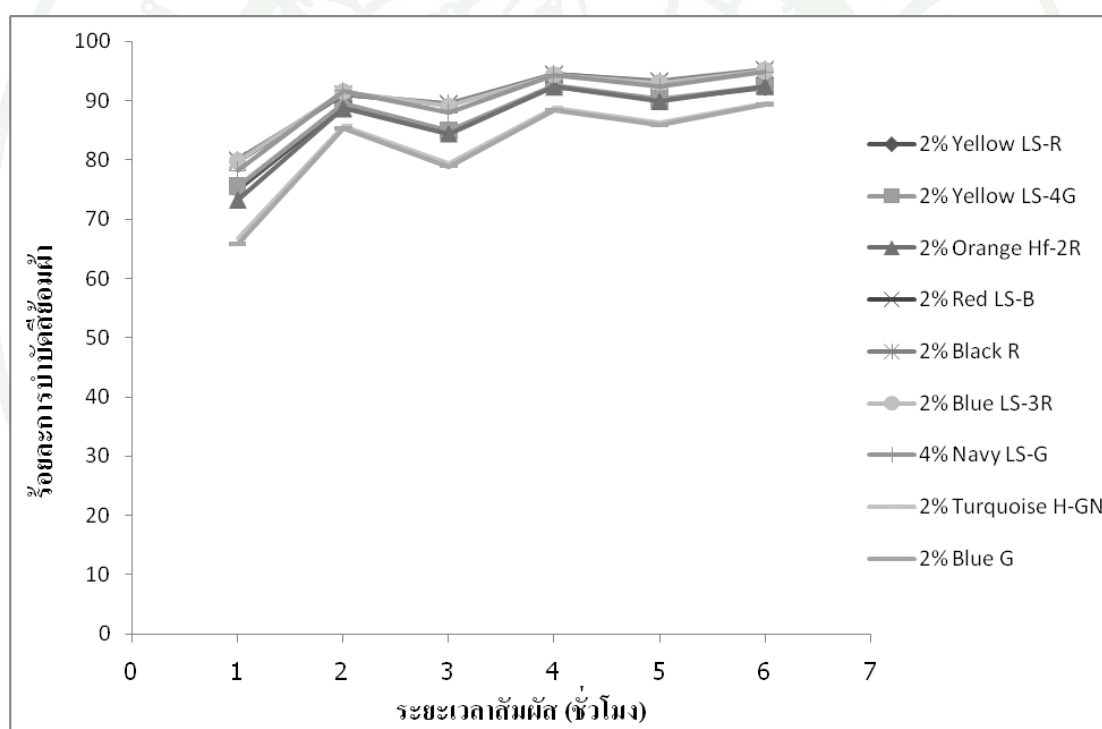
จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 5.3 โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ 1 กรัม ต่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร แปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 ชั่วโมง พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดังแสดงในตารางที่ 7 และภาพที่ 32 โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเริ่มคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าเฉลี่ยร้อยละ 92.45 แสดงดังภาพที่ 33 เนื่องจากเมื่อระยะเวลาสัมผัสมากขึ้นทำให้มลสารมีโอกาสสัมผัส หรือถูกดูดซับด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ได้มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับมีจำกัด เมื่อถึงระยะเวลานึงบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ (นิพนธ์ และคณิตา , 2550) ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมงสำหรับการทดลองต่อไป

ตารางที่ 7 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน (ชั่วโมง)

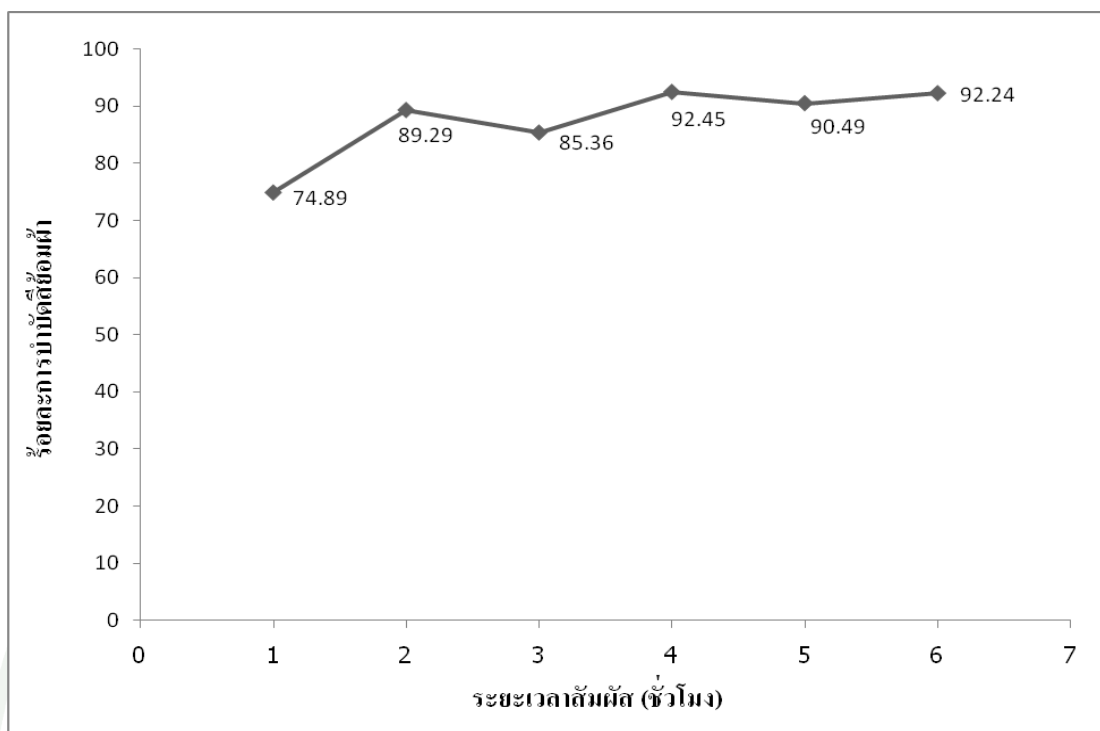
| ชนิดสี          | 1 ชั่วโมง | 2 ชั่วโมง | 3 ชั่วโมง | 4 ชั่วโมง | 5 ชั่วโมง | 6 ชั่วโมง |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2% Yellow LS-R  | 74.90     | 89.09     | 84.70     | 92.39     | 90.01     | 91.66     |
| 2% Yellow LS-4G | 75.58     | 89.54     | 84.91     | 92.65     | 90.26     | 91.95     |
| 2% Orange Hf-2R | 73.17     | 88.67     | 84.41     | 92.32     | 89.87     | 91.78     |
| 2% Red LS-B     | 79.78     | 91.05     | 89.35     | 94.40     | 93.22     | 94.46     |

ตารางที่ 7 (ต่อ)

| ชนิดสี            | 1 ชั่วโมง | 2 ชั่วโมง | 3 ชั่วโมง | 4 ชั่วโมง | 5 ชั่วโมง | 6 ชั่วโมง |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2% Black R        | 80.07     | 91.12     | 89.53     | 94.49     | 93.32     | 94.56     |
| 2% Blue LS-3R     | 79.74     | 91.49     | 89.03     | 94.38     | 93.01     | 94.41     |
| 4% Navy LS-G      | 78.22     | 91.62     | 87.96     | 94.37     | 92.47     | 94.16     |
| 2% Turquoise H-GN | 66.76     | 85.73     | 79.42     | 88.76     | 86.35     | 88.76     |
| 2% Blue G         | 65.78     | 85.28     | 78.89     | 88.32     | 85.91     | 88.41     |



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสียอมผ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)



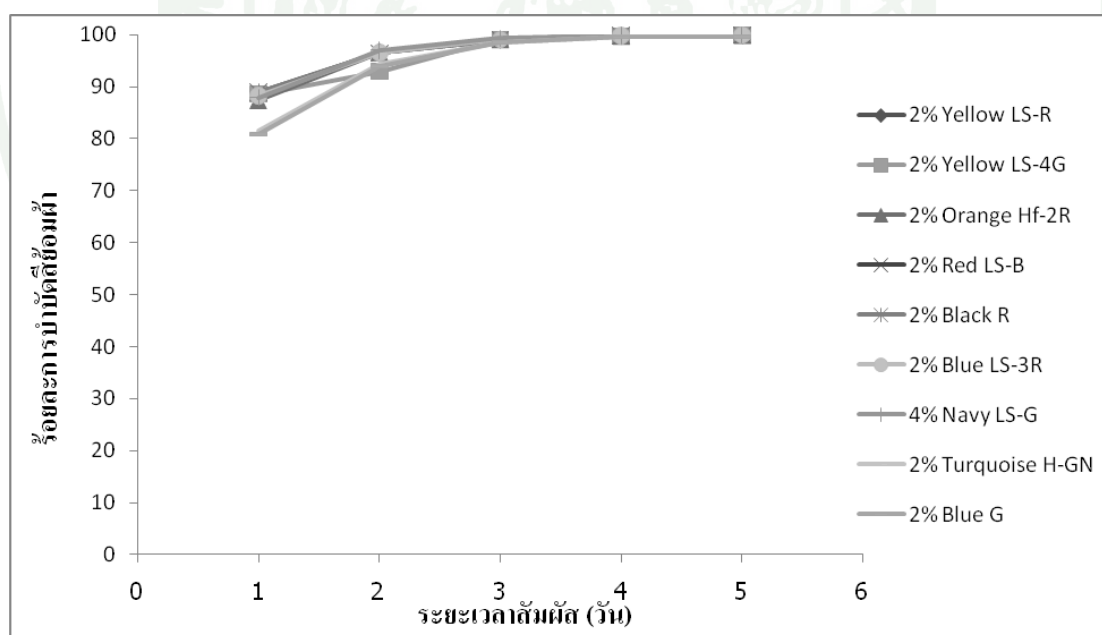
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีข้อมผ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)

เมื่อทำการทดลองโดยแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน พบว่าถ้าลดข้อมผ้าในคัมภ์ประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแสดงดังตารางที่ 8 และภาพที่ 34 โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีข้อมผ้าจะเพิ่มขึ้น อธิบายได้เช่นเดียวกับการแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง และที่ระยะเวลาสัมผัส 5 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ข้อมผ้าสูงสุด เฉลี่ยร้อยละ 99.86 แสดงดังภาพที่ 35 และพบว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นวันให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง

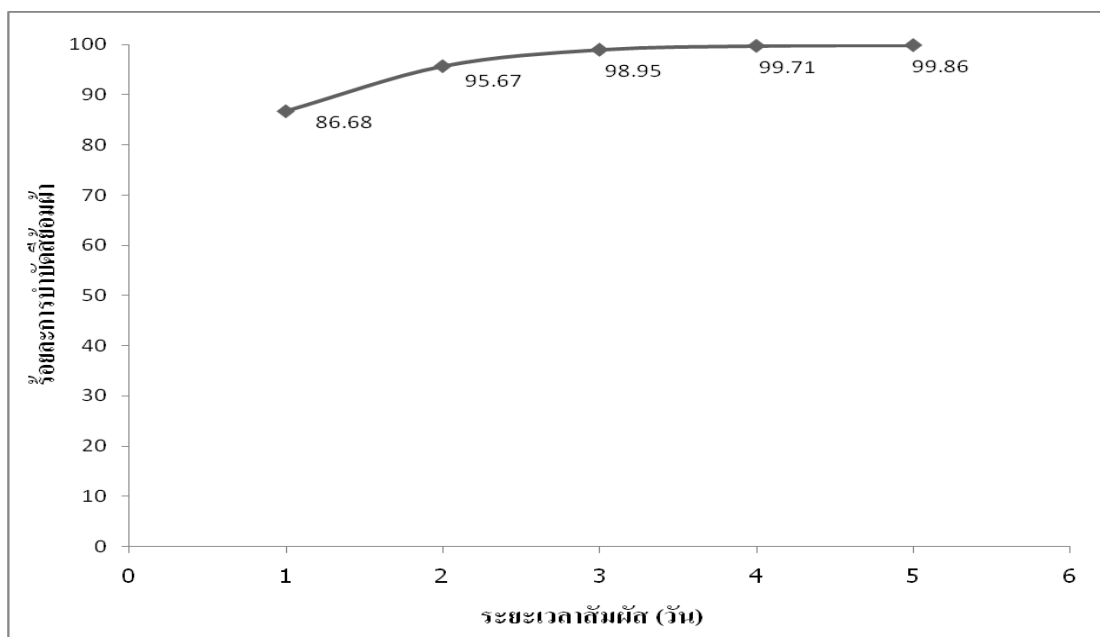


ตารางที่ 8 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่ระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน (วัน)

| ชนิดสี            | 1 วัน | 2 วัน | 3 วัน | 4 วัน | 5 วัน |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2% Yellow LS-R    | 88.11 | 96.79 | 99.06 | 99.77 | 99.94 |
| 2% Yellow LS-4G   | 88.55 | 92.93 | 99.06 | 99.72 | 99.92 |
| 2% Orange Hf-2R   | 87.31 | 96.63 | 99.13 | 99.82 | 99.96 |
| 2% Red LS-B       | 88.93 | 96.47 | 99.01 | 99.82 | 99.89 |
| 2% Black R        | 88.90 | 96.44 | 99.02 | 99.75 | 99.89 |
| 2% Blue LS-3R     | 88.23 | 96.51 | 99.06 | 99.77 | 99.90 |
| 4% Navy LS-G      | 87.91 | 97.01 | 99.28 | 99.77 | 99.90 |
| 2% Turquoise H-GN | 81.41 | 94.32 | 98.51 | 99.49 | 99.67 |
| 2% Blue G         | 80.79 | 93.98 | 98.43 | 99.48 | 99.67 |



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (วัน)

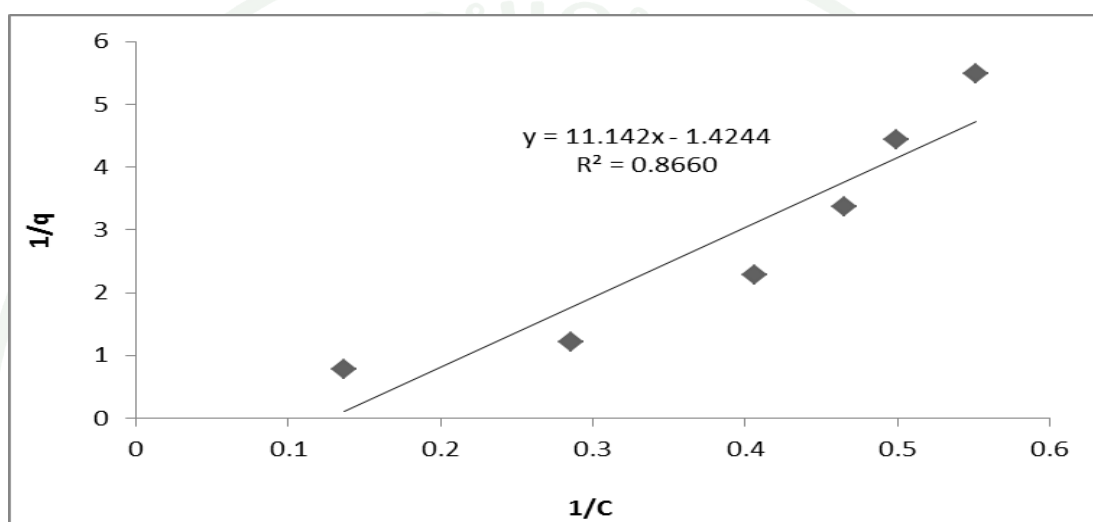


ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีข้อมผ้า 9 ชนิด กับระยะเวลาสัมผัส (วัน)

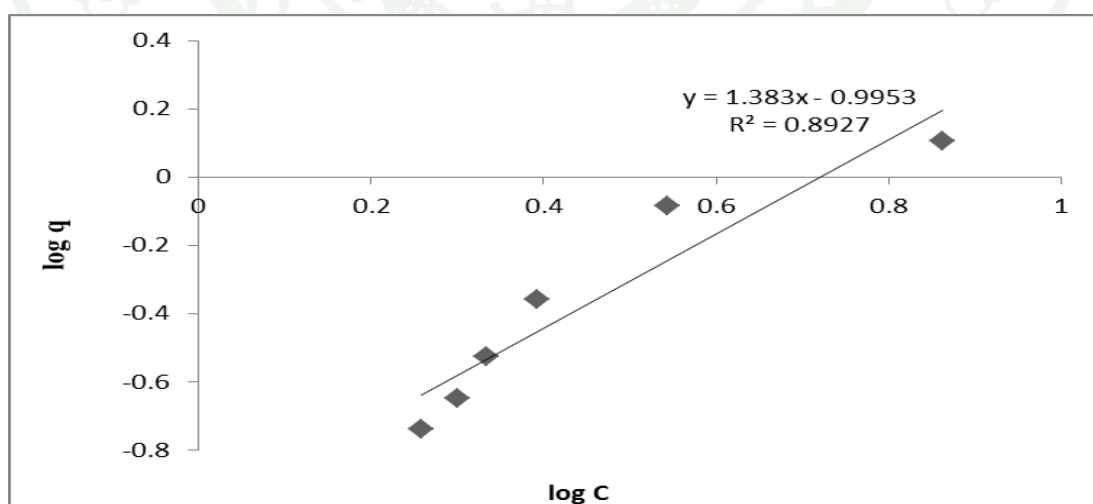
### 3.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับสีข้อมผ้าของถ้ำลอยลิกไนต์

จากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตามวิธีการทดลองข้อที่ 5.4 โดยแปรผันปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 36 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.8660 และ ไอโซเทอร์มฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.8927 ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงว่ากลไกการดูดซับสอดคล้องกับทั้งสมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เนื่องจากถ้ำลอยลิกไนต์มีโครงสร้างที่มีรูพรุน และมีพื้นที่ผิวมาก กลไกการดูดซับจึงเป็นไปได้ทั้ง 2 แบบ คือ สีข้อมผ้าถูกดูดซับแบบชั้นเดี่ยว (แลงเมียร์) หรือจัดเรียงตัวหลายชั้น (ฟรุนดลิช) และเข้าไปในรูพรุนของถ้ำลอยลิกไนต์ได้อีกด้วย ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นที่ผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับที่เหมือนกัน ซึ่งการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดี่ยว และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิว ตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นที่ผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ不会再มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่น

บนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้นจนอิ่มตัว (Johnson, 1989) ส่วนกลไกการดูดซับของฟรอนดิช คือ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 36 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ก.) และฟรอนดิช (ข.) ของการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์

จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ จุดตัดแกน  $y$  มีค่าติดลบ (-1.4244) ทำให้เส้นกราฟตัดแกน  $x$  ที่จุด  $1/c$  มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นหมายถึง  $C$  ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าน้อยนั่นเอง ประกอบกับ ณ จุดนี้  $1/q$  มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง  $q$  ซึ่งคือปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $C$  ที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นได้มาก ประกอบกับการทดลองมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่ จึงส่งผลให้  $C$  มีค่าน้อย และ  $q$  มีค่ามากนั่นเอง

### 3.6 ผลการศึกษาปริมาณดินในการบำบัดสีย้อมผ้า

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 5.5 โดยใช้ปริมาณดินที่แตกต่างกันคือ 10, 20 และ 30 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และระยะเวลา สัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง พบว่าดินไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าของดินปนทราย

| ชนิดสี            | 10 (กรัม) | 20 (กรัม) | 30 (กรัม) |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| 2% Yellow LS-R    | -8.809    | -5.167    | -14.651   |
| 2% Yellow LS-4G   | -7.973    | -4.180    | -11.822   |
| 2% Orange Hf-2R   | -10.898   | -7.241    | -18.211   |
| 2% Red LS-B       | -8.817    | -4.780    | -13.989   |
| 2% Black R        | -8.327    | -4.436    | -13.580   |
| 2% Blue LS-3R     | -5.424    | -1.919    | -9.446    |
| 4% Navy LS-G      | -2.979    | 0.816     | -5.886    |
| 2% Turquoise H-GN | -5.669    | -2.277    | -7.853    |
| 2% Blue G         | -5.707    | -2.783    | -8.585    |
| เฉลี่ยรวม         | -7.178    | -3.552    | -11.558   |

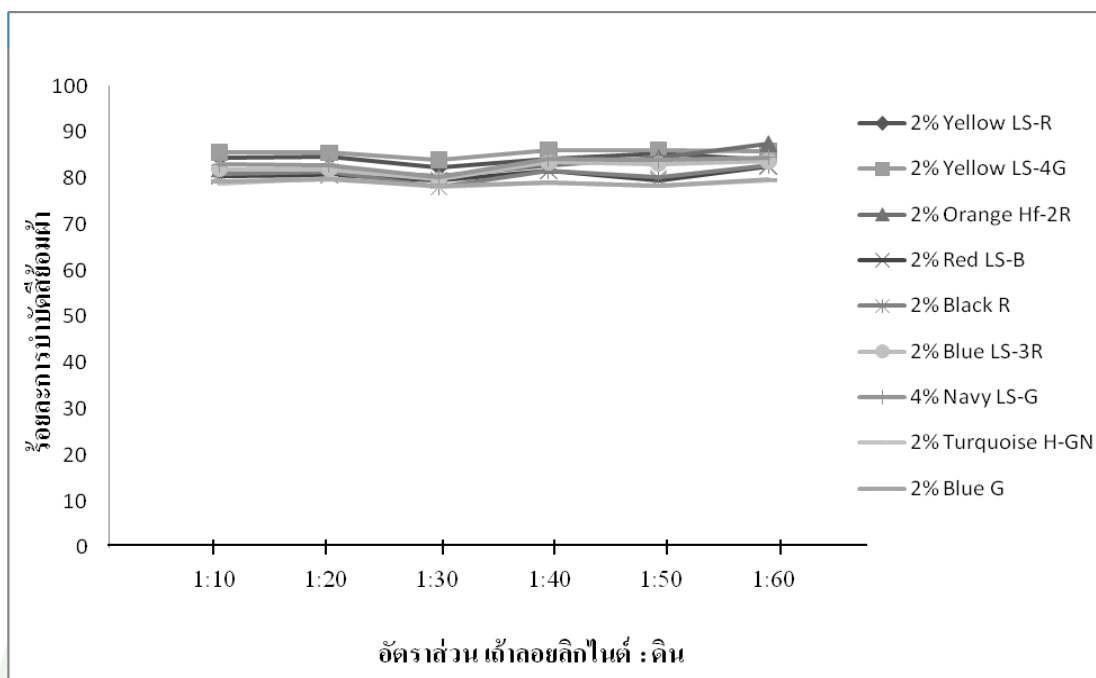
### 3.7 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดิน

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 5.6 โดยแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และระยะสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนดังกล่าว มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัด แสดงดังตารางที่ 10 และภาพที่ 37 พบว่าที่อัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดิน 1:60 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าสูงที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 83.34 โดยที่อัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่แตกต่างกัน มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าโดยเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณดินที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ สีย้อมผ้า แต่ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นตัวดูดซับมีปริมาณคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับไม่เพิ่มขึ้น แม้จะเพิ่มอัตราส่วนดินมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 38

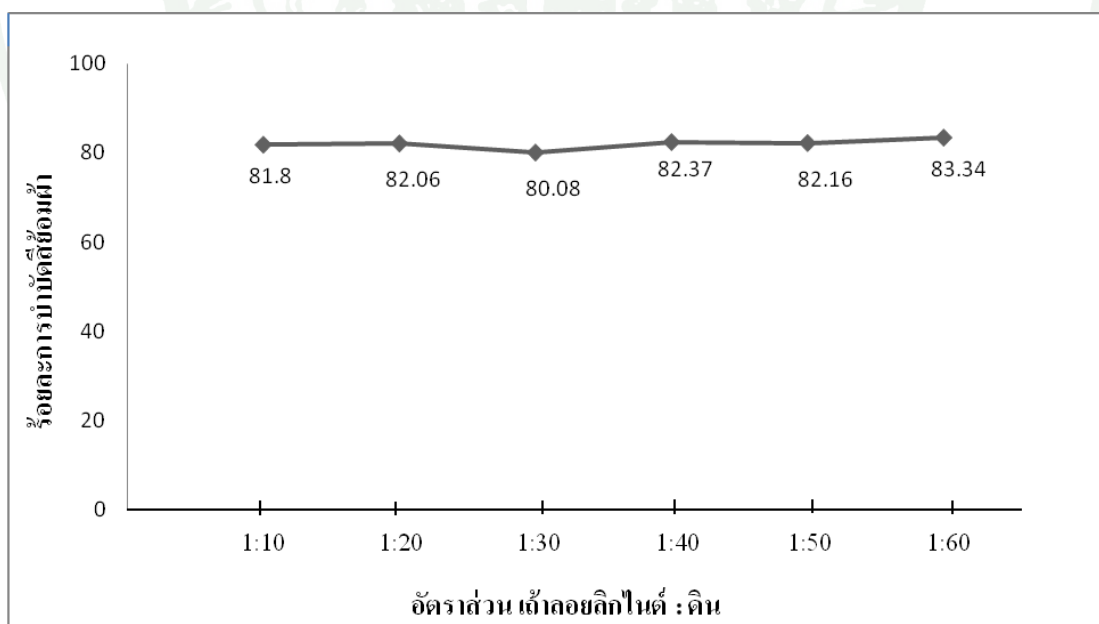
ตารางที่ 10 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิด ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินที่แตกต่างกัน

| ชนิดสี            | 1:10  | 1:20  | 1:30  | 1:40  | 1:50  | 1:60  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2% Yellow LS-R    | 84.48 | 84.69 | 82.38 | 84.08 | 85.42 | 83.96 |
| 2% Yellow LS-4G   | 85.6  | 85.48 | 83.96 | 86.06 | 86.03 | 85.89 |
| 2% Orange Hf-2R   | 81.95 | 81.92 | 80.35 | 82.7  | 84.38 | 87.43 |
| 2% Red LS-B       | 80.38 | 80.58 | 79.53 | 81.51 | 79.61 | 82.56 |
| 2% Black R        | 80.88 | 81.45 | 78.15 | 81.61 | 80.12 | 82.77 |
| 2% Blue LS-3R     | 81.94 | 81.94 | 79.66 | 83.38 | 83.12 | 83.76 |
| 4% Navy LS-G      | 82.98 | 82.87 | 80.15 | 84.11 | 83.96 | 84.54 |
| 2% Turquoise H-GN | 78.79 | 79.88 | 78.22 | 78.95 | 78.38 | 79.52 |
| 2% Blue G         | 79.18 | 79.75 | 78.29 | 78.97 | 78.44 | 79.64 |





ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของสีย้อมผ้าทั้ง 9 สี กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักเกลือลิกไนต์ผสมกับดิน



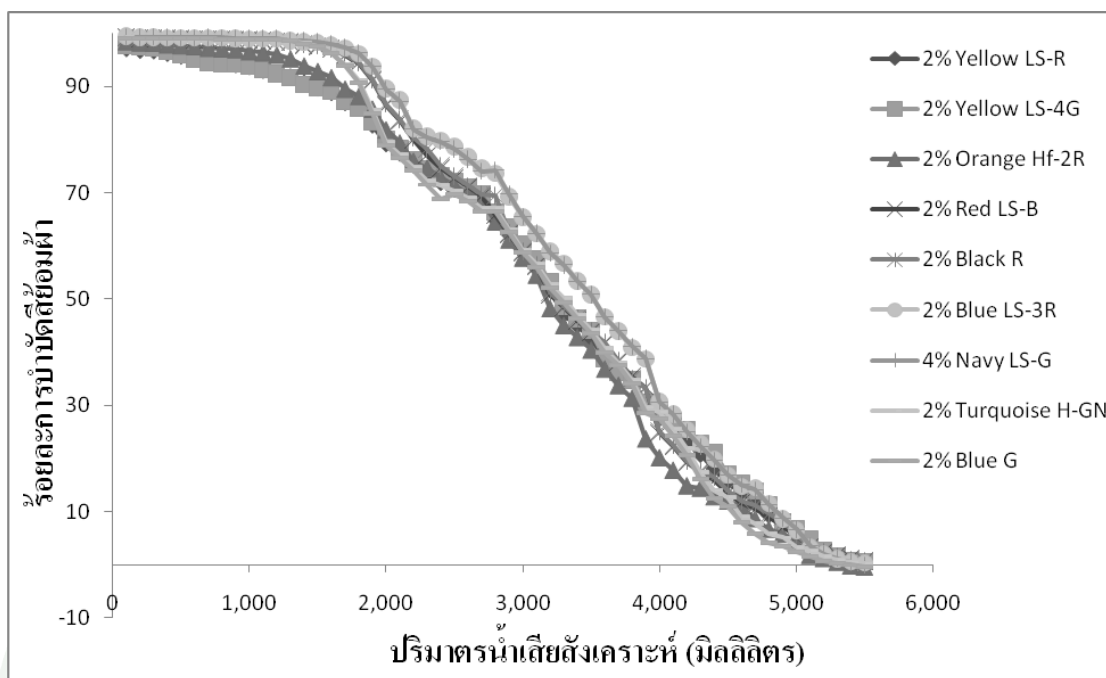
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักเกลือลิกไนต์ผสมกับดิน

#### 4. ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าของถ้ำลอยลึกไนต์ โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์

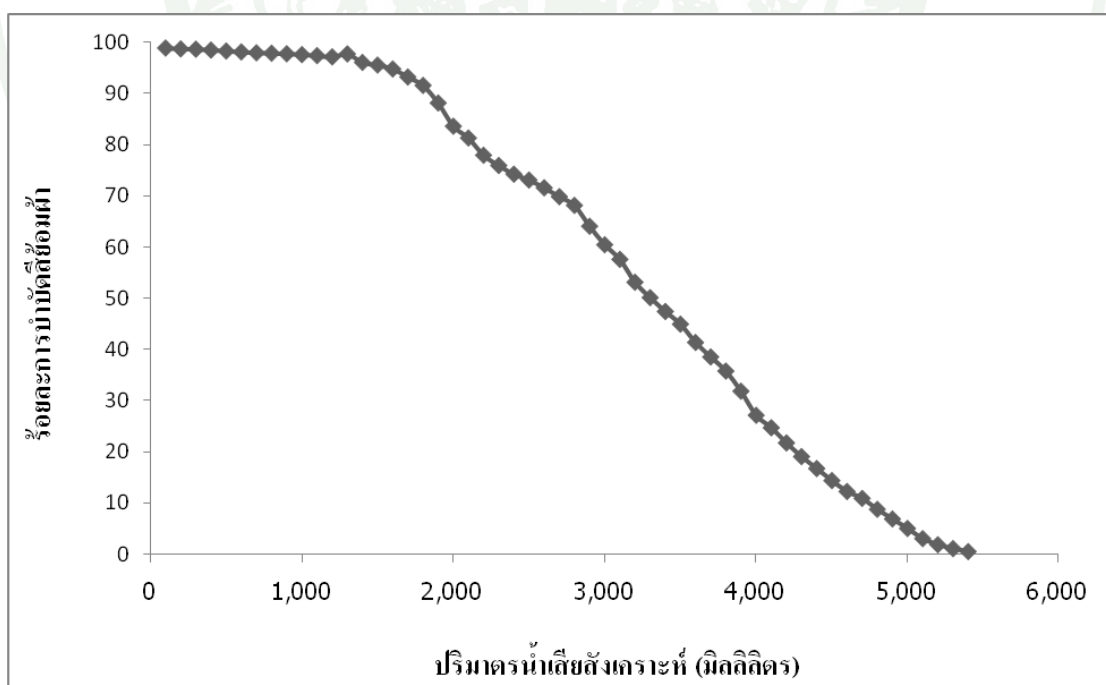
การทดลองแบบคอลัมน์เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของชั้นวัสดุปลูก โดยทำการบำบัดสีย้อมผ้า 3 วิธี คือ แบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง และแบบแช่ขัง 5 วัน ผลการทดลอง ดังนี้

##### 4.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าหลังผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 6.1 ทำการบรรจุวัสดุปลูกลงในคอลัมน์เป็นลำดับชั้น โดยชั้นบนสุดเป็นถ้ำลอยลึกไนต์ผสมดินในอัตราส่วน 1:60 ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 5,500 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากคอลัมน์เท่ากับ  $2.95 \times 10^{-3}$  ลิตร/นาที เก็บน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ทุกๆ 100 มิลลิลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ทั้ง 9 ชนิด แสดงดังภาพที่ 39 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรแรก สามารถบำบัดสีย้อมได้ดีที่สุด มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าเฉลี่ยร้อยละ 98.80 และประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ผ่าน 1,600 มิลลิลิตร ประสิทธิภาพลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์แล้ว 3,300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าเฉลี่ยร้อยละ 50.11 และยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องจนเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์แล้ว 5,500 มิลลิลิตร จึงหมดประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้า ดังภาพที่ 40

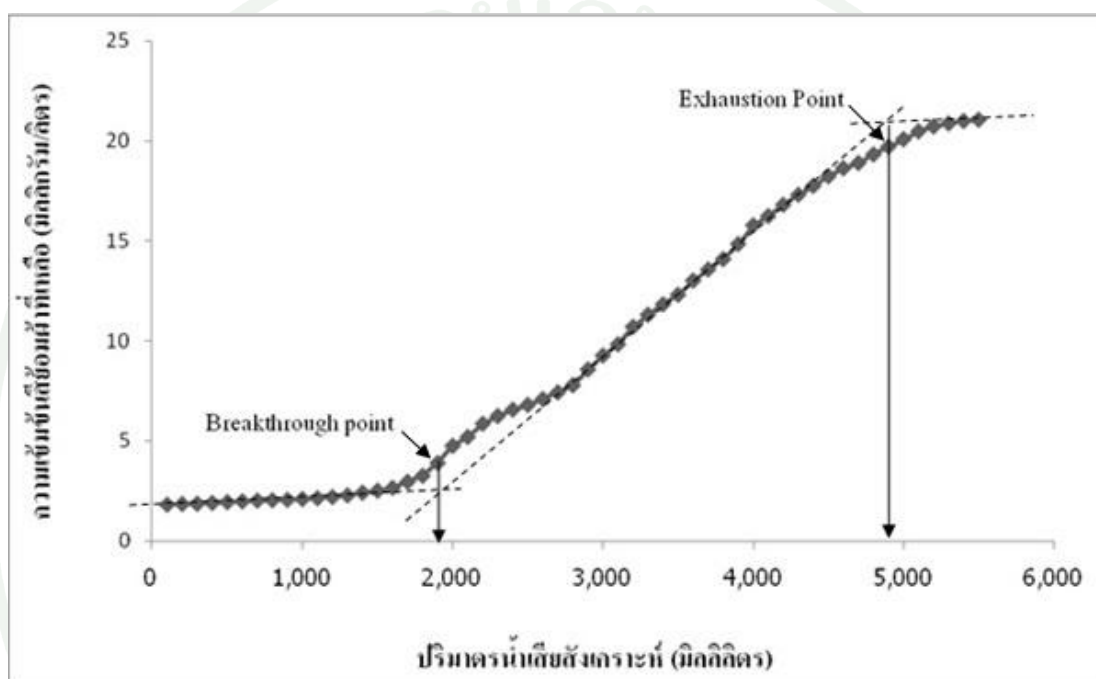


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง



ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีของผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง

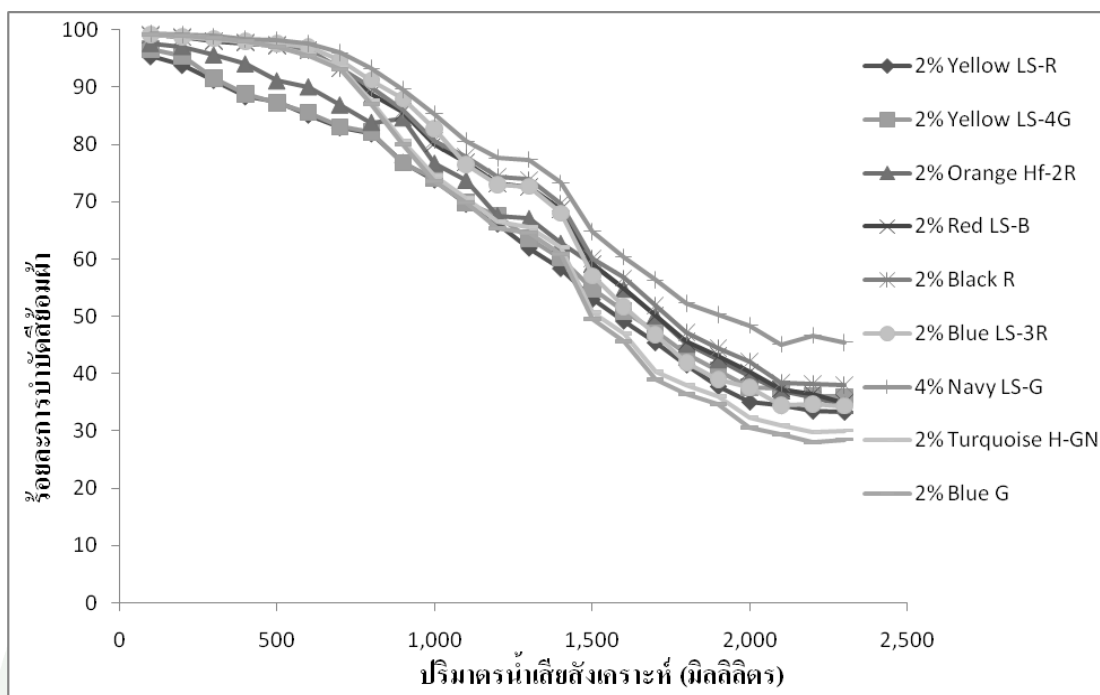
เมื่อคำนวณปริมาณสีย้อมผ้าที่เหลืออยู่ในน้ำที่ไหลออกมาจากคอลัมน์ทุกๆ 100 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ (Breakthrough Curve) พบว่าจุดเบรคทรูจ (Breakthrough Point) อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 1,900 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมผ้าเหลือ 3.90 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 4,900 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมผ้าเหลือ 19.71 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 41



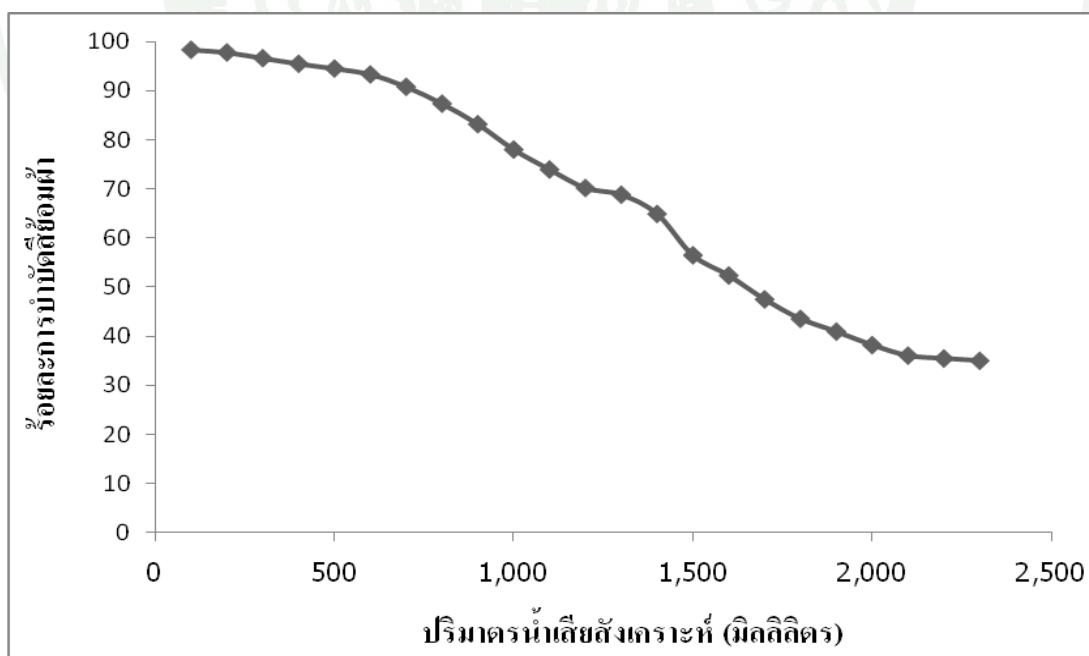
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแบบไหลต่อเนื่อง

#### 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าหลังผ่านคอลัมน์แบบแซ่ซ้ง 4 ชั่วโมง

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 6.2 ทำการทดลองโดยแซ่ซ้งน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรในคอลัมน์เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนปล่อยออกจากคอลัมน์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ทั้ง 9 ชนิด แสดงดังภาพที่ 42 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรแรก มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าได้ดีที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 98.27 และประสิทธิภาพการบำบัดสีเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังภาพที่ 43



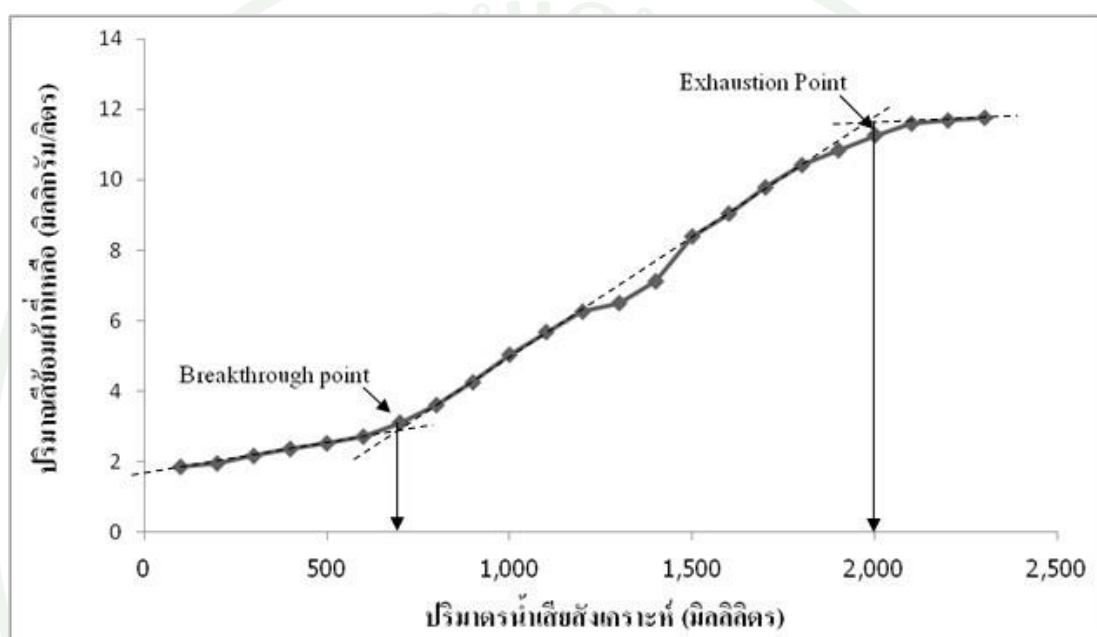
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำเสียของน้ำ 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แบบแซ้ง 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำเสียของน้ำ 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แบบแซ้ง 4 ชั่วโมง



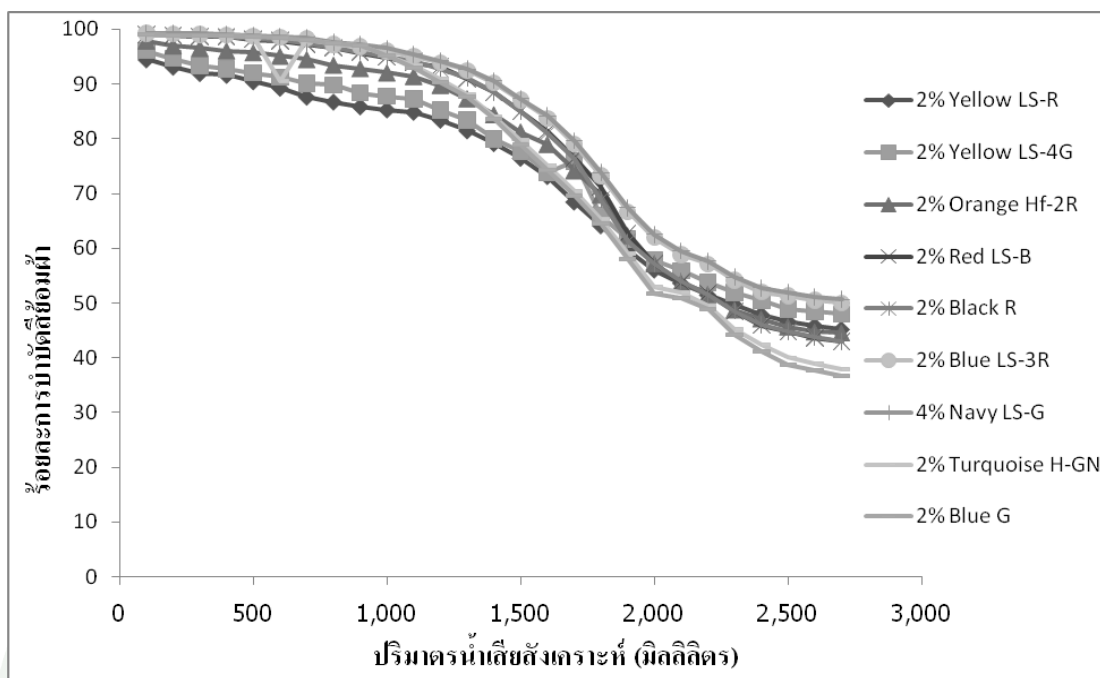
เมื่อคำนวณปริมาณสีย้อมผ้าที่เหลืออยู่ในน้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์ หลังการแช่ขังเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคท루จ์ พบว่าจุดเบรคท루จ์ อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 700 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมผ้าเหลือ 3.11 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 2,000 มิลลิลิตร มีปริมาณสีย้อมผ้าเหลือ 11.26 มิลลิกรัม/ลิตร แสดงดังภาพที่ 44



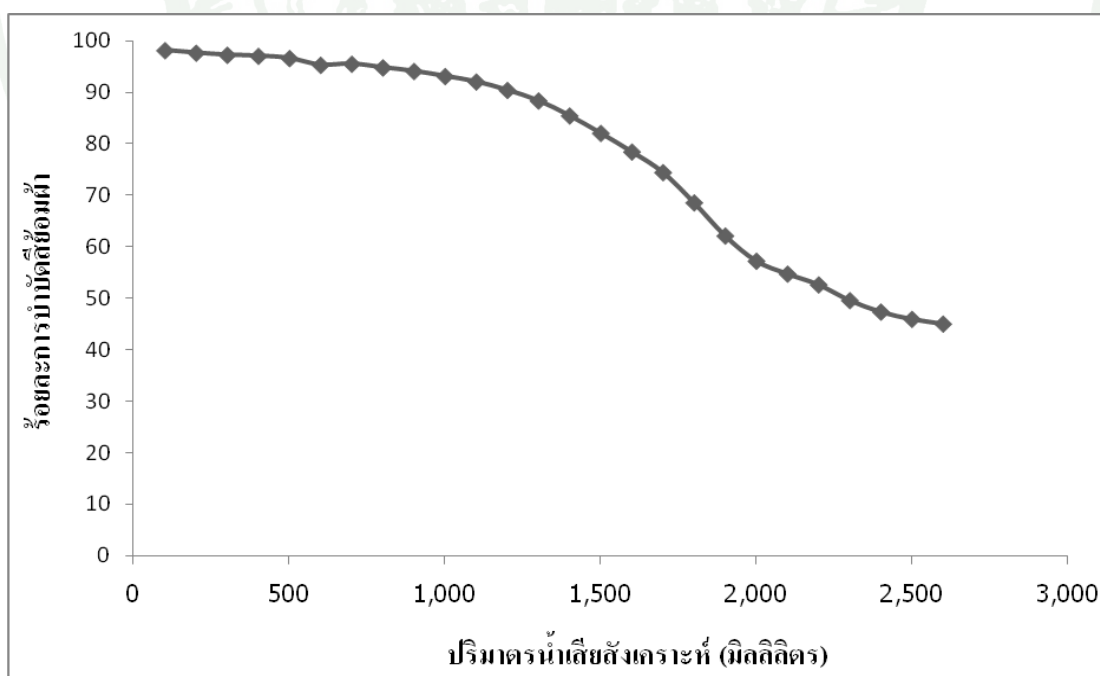
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง

#### 4.3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าหลังผ่านคอลัมน์แบบแช่ขัง 5 วัน

จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 6.3 ทำการทดลองโดยแช่ขังน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรในคอลัมน์เป็นเวลา 5 วัน ก่อนปล่อยออกจากคอลัมน์ และปล่อยให้วัสดุปลูกแห้ง 2 วัน ก่อนการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ครั้งถัดไป พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ทั้งหมด 9 ชนิด แสดงดังภาพที่ 45 โดยประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตรแรก มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าได้ดีที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 98.15 และประสิทธิภาพการบำบัดสีเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังภาพที่ 46

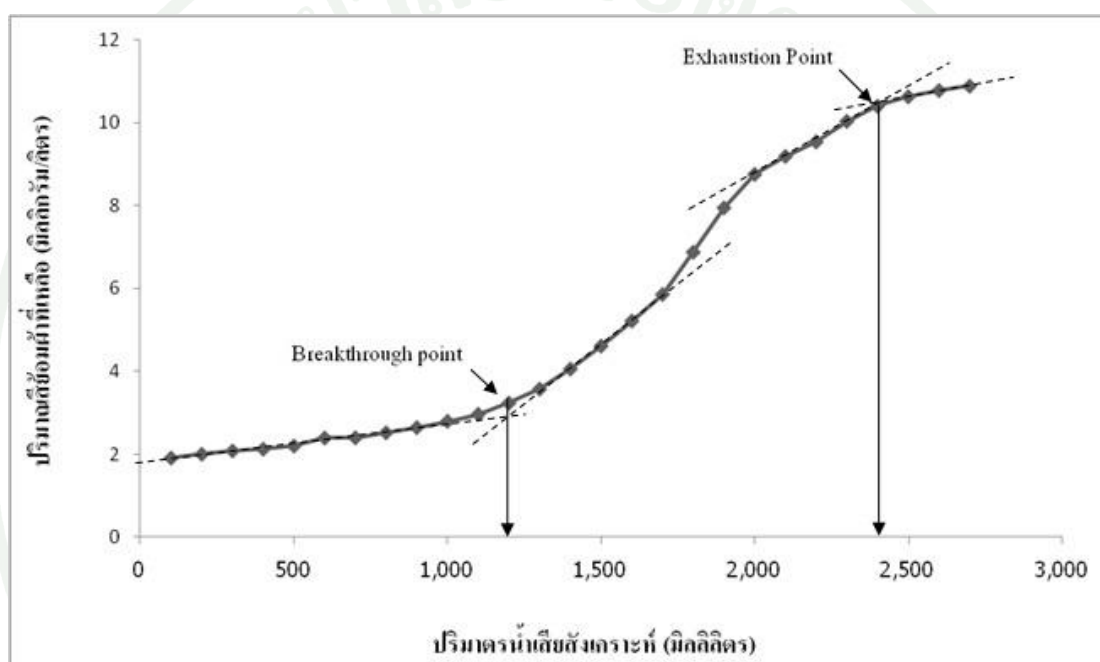


ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแซ่ง 5 วัน



ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแซ่ง 5 วัน

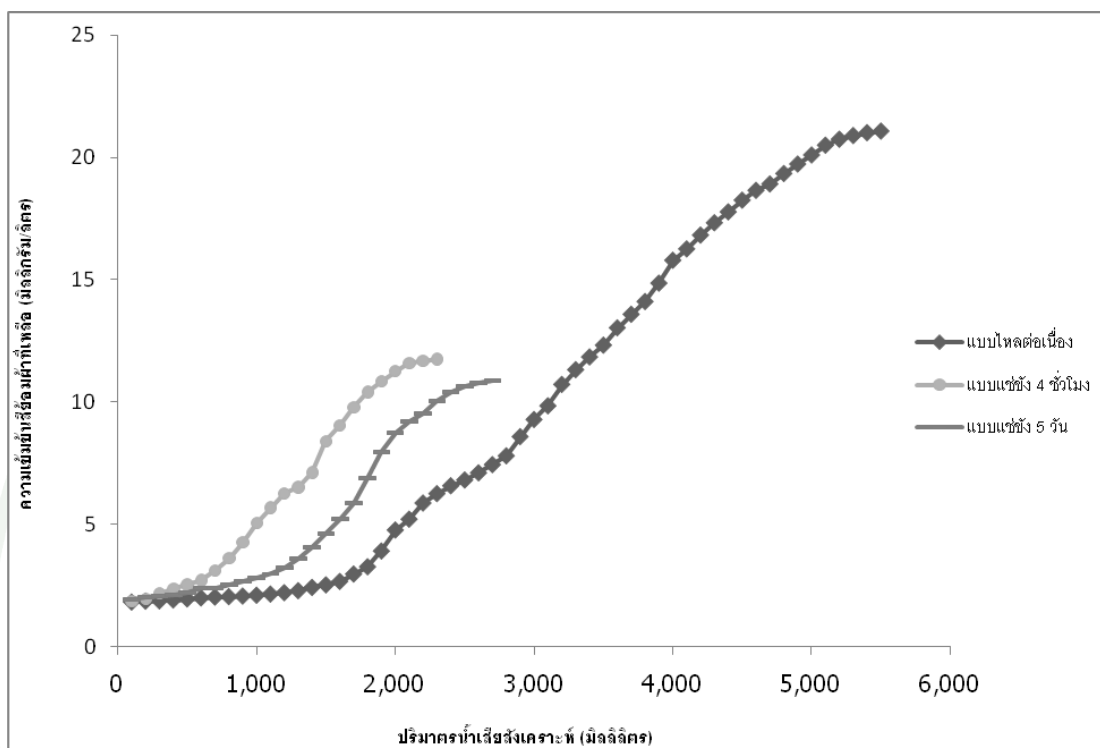
เมื่อคำนวณปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลืออยู่ในน้ำที่ปล่อยออกจากคอลัมน์ หลังจากแช่แข็งเป็นเวลา 5 วัน และปล่อยให้วัสดุปลูกแห้ง 2 วันก่อนใส่น้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ โดยใส่น้ำเสียสังเคราะห์ครั้งละ 100 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ พบว่าจุดเบรคทรูจ อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 1,200 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือ 3.23 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ 2,400 มิลลิลิตร มีปริมาณสีข้อมฟ้าเหลือ 10.40 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีข้อมฟ้าที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบแช่แข็ง 5 วัน

จากการทดลองแบบไหลต่อเนื่องทั้ง 3 วิธี โดยใช้ระยะเวลาที่ตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับแตกต่างกัน คือ แบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่แข็ง 4 ชั่วโมง และแบบแช่แข็ง 5 วัน พบว่าการบำบัดทั้ง 3 วิธีมีแนวโน้มเหมือนกัน คือ บำบัดได้ดีที่สุดใกล้เคียงร้อยละ 98 ในครั้งแรก จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากถ่านลอยลิกไนต์ในช่วงแรกยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆ อยู่มาก จากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีเริ่มลดลงจนเกือบหมดประสิทธิภาพ เนื่องจากตัวดูดซับหรือถ่านลอยลิกไนต์ถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ จนหมด (นิพนธ์ และคณะ, 2550) เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลืออยู่ในน้ำหลังผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ กับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ของการทดลองทั้ง 3 วิธี พบว่าการบำบัดแบบ

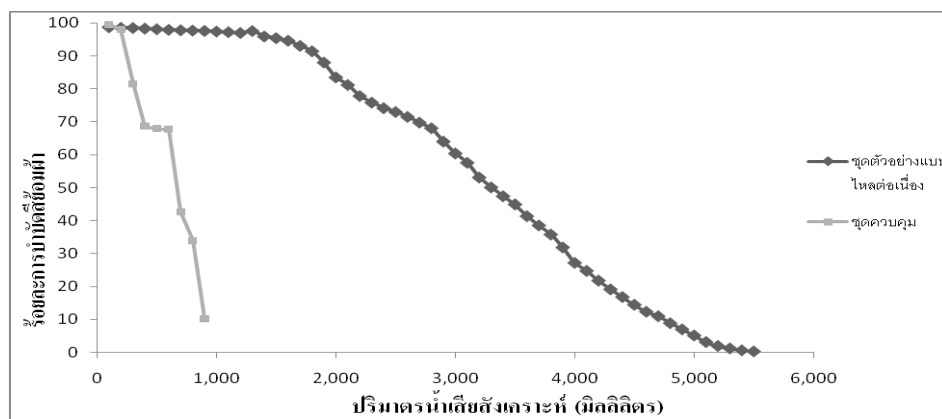
ไหลต่อเนื่องเริ่มหมดสภาพในการบำบัดซ้ำที่สุด แสดงดังภาพที่ 48 ดังนั้นจึงเลือกวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่องมาทำการทดลองในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ต่อไป



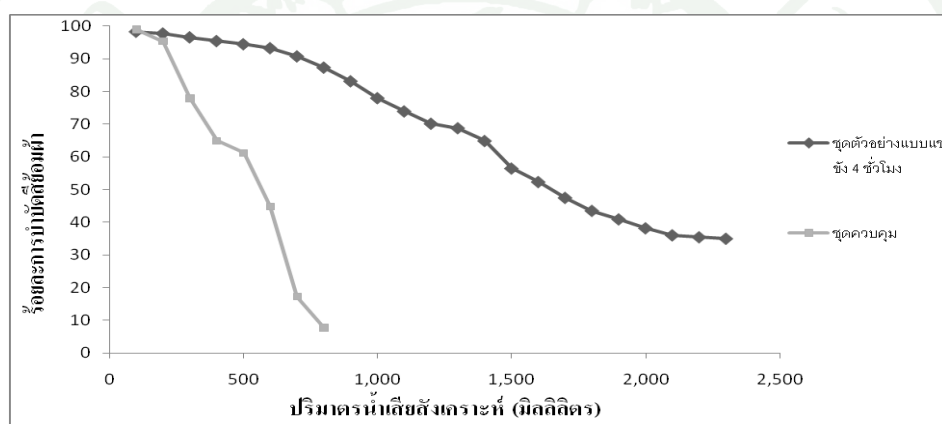
ภาพที่ 48 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีย้อมผ้าที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่บำบัดแล้วในระบบบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง และแบบแช่ขัง 5 วัน

#### 4.4 ชุดควบคุม

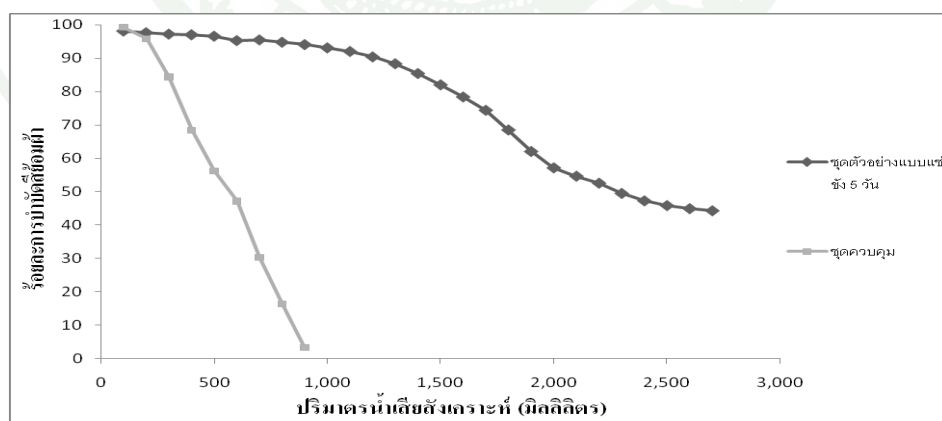
จากการทดลองในวิธีการทดลองข้อที่ 6.4 บรรจุวัสดุปลูกลงในคอลัมน์แก้ว โดยไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมการทดลองแบบไหลต่อเนื่องทั้ง 3 วิธี คือ แบบไหลต่อเนื่อง แบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง และแบบแช่ขัง 5 วัน พบว่าชุดควบคุมที่ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าต่ำกว่าชุดตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูก แสดงว่าเมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมดินในชั้นวัสดุปลูกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ดีขึ้น แสดงดังภาพที่ 49



(ก.)



(ข.)



(ค.)

ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของเสียของ 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียส่งเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง (ก.) แบบแช่ทิ้ง 4 ชั่วโมง (ข.) และแบบแช่ทิ้ง 5 วัน (ค.) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม



## 5. ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยการจำลองระบบบำบัดแบบ พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง

### 5.1 การบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง

ดักกลาง

จำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางในกระเบที่บรรจุวัสดุปลูกที่มีเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดิน โดยปลูกพืช 2 ชนิด คือ ฐปฤยั และหญ้ำแฝก ทำการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ลงในกระเบอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียสังเคราะห์จะซึมลงในแนวตั้งไหลผ่านผิวดักกลางลงมา และไหลออกจากกระเบทางรูเปิดด้านล่าง เก็บน้ำที่ไหลผ่านกระเบทุกๆ 20 ลิตร ผลการทดลองเป็นดังนี้

#### 5.1.1 การบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยการปลูกฐปฤยั

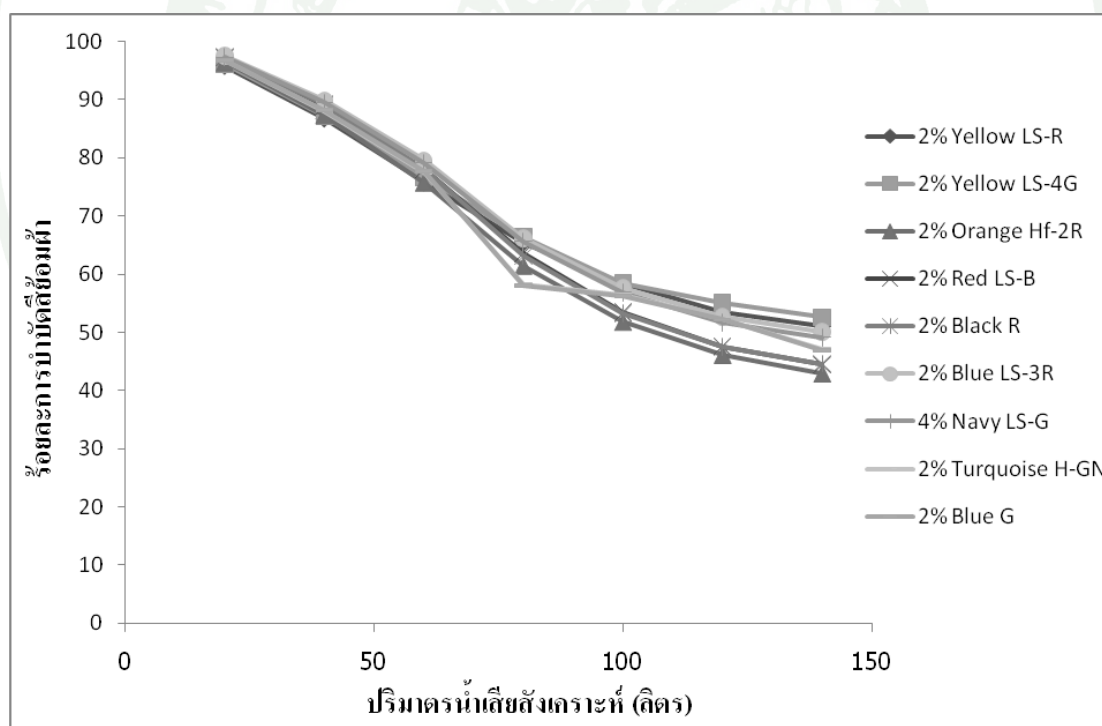
จากการทดลองด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยการปลูกฐปฤยัในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ที่ชั้นบนสุดของวัสดุปลูกเป็นเถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1:60 เมื่อปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ลงในกระเบอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากกระเบเท่ากับ  $1.83 \times 10^{-2}$  ลิตร/นาที่ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแสดงดังตารางที่ 11 และภาพที่ 50 โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าในน้ำ สีสังเคราะห์สูงที่สุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 20 ลิตรแรก คือเฉลี่ยร้อยละ 96.81 จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนประสิทธิภาพลดลงครั้งหนึ่ง แสดงดังภาพที่ 51

ตารางที่ 11 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิดด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยการปลูกฐปฤยั

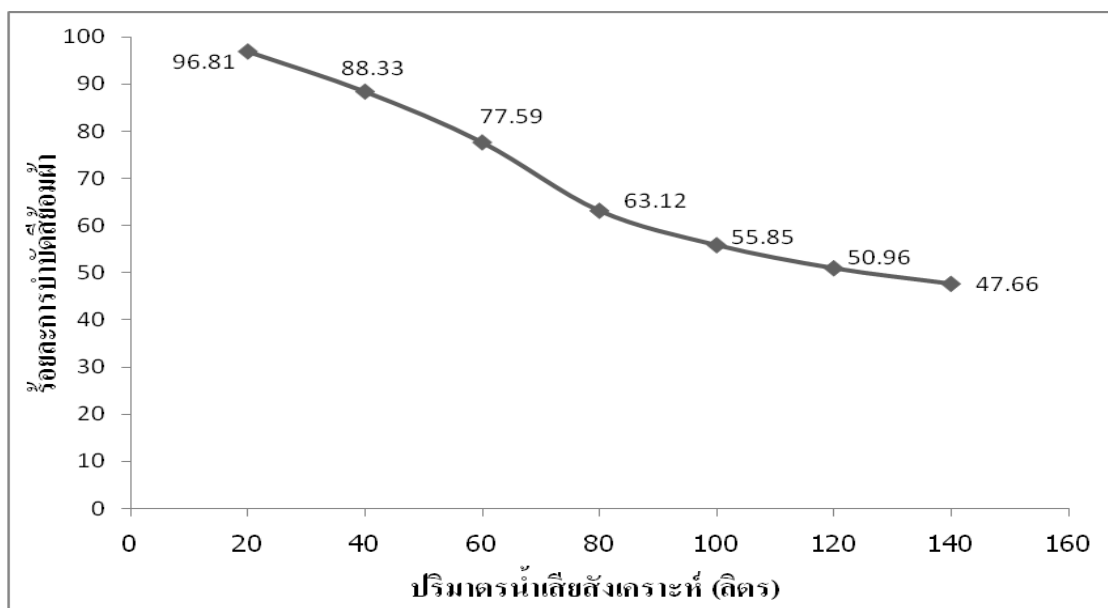
| ชนิดสี          | 20 ลิตร | 40 ลิตร | 60 ลิตร | 80 ลิตร | 100 ลิตร | 120 ลิตร | 140 ลิตร |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 2% Yellow LS-R  | 95.80   | 86.75   | 75.80   | 65.44   | 58.49    | 53.51    | 51.08    |
| 2% Yellow LS-4G | 96.08   | 87.12   | 76.66   | 66.33   | 58.43    | 55.07    | 52.58    |

ตารางที่ 11 (ต่อ)

| ชนิดสี            | 20 ลิตร | 40 ลิตร | 60 ลิตร | 80 ลิตร | 100 ลิตร | 120 ลิตร | 140 ลิตร |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 2% Orange Hf-2R   | 96.46   | 87.40   | 75.78   | 61.45   | 51.81    | 46.13    | 42.92    |
| 2% Red LS-B       | 97.28   | 89.04   | 77.99   | 63.56   | 53.50    | 47.57    | 44.44    |
| 2% Black R        | 97.33   | 89.16   | 78.16   | 63.11   | 53.24    | 47.49    | 44.58    |
| 2% Blue LS-3R     | 97.55   | 89.91   | 79.60   | 66.19   | 57.68    | 52.70    | 50.11    |
| 4% Navy LS-G      | 97.30   | 89.50   | 79.15   | 65.60   | 56.85    | 51.68    | 49.13    |
| 2% Turquoise H-GN | 96.75   | 87.95   | 77.57   | 58.28   | 56.39    | 52.31    | 47.17    |
| 2% Blue G         | 96.73   | 88.17   | 77.61   | 58.08   | 56.28    | 52.16    | 46.99    |



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัด คีลีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียดังเคราะห์ หลังผ่านการบำบัดคีลีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูก รุปลาน้ำ



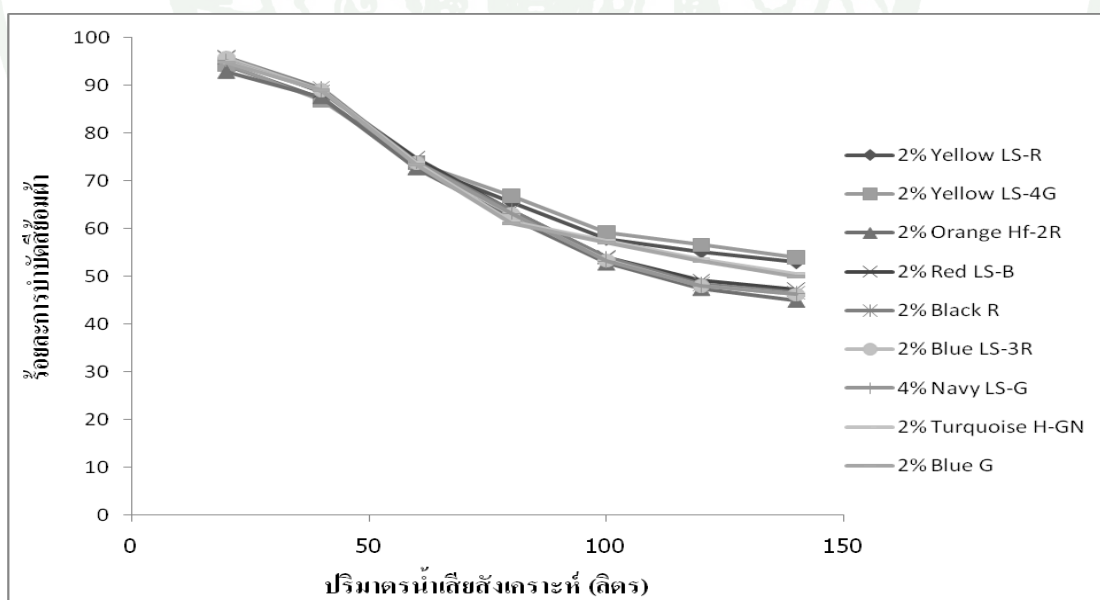
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของเสีย 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดเสียด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกธูปฤาษี

#### 5.1.2 การบำบัดเสียด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก

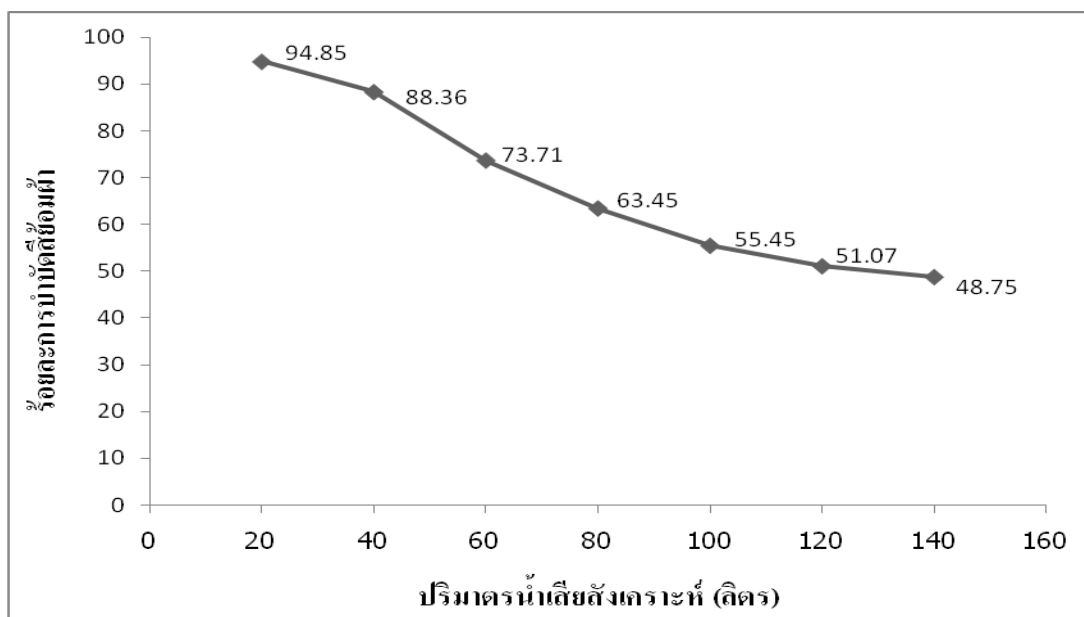
จากการทดลองด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝกในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ที่ชั้นบนสุดของวัสดุ ปลูกเป็นแถวขยลกในตึกผสมกับดินในอัตราส่วน 1:60 เมื่อปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ลงในกระบอกอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากกระบอกเท่ากับ  $1.65 \times 10^{-2}$  ลิตร/นาที่ พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดเสียได้ทั้ง 9 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการบำบัดแสดงดังตารางที่ 12 และภาพที่ 52 โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเสียในน้ำเสียสังเคราะห์สูงสุดในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 20 ลิตรแรก คือเฉลี่ยร้อยละ 94.85 จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดเสียเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่องจนประสิทธิภาพลดลงครึ่งหนึ่งแสดงดังภาพที่ 53

ตารางที่ 12 ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้าแต่ละชนิดด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางโดยการปลูกหญ้าแฝก

| ชนิดสี            | 20 ลิตร | 40 ลิตร | 60 ลิตร | 80 ลิตร | 100 ลิตร | 120 ลิตร | 140 ลิตร |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 2% Yellow LS-R    | 94.11   | 87.22   | 73.45   | 65.57   | 57.88    | 55.21    | 52.98    |
| 2% Yellow LS-4G   | 94.35   | 86.81   | 73.73   | 66.9    | 59.25    | 56.60    | 54.00    |
| 2% Orange Hf-2R   | 92.77   | 87.49   | 72.65   | 62.24   | 52.76    | 47.47    | 44.99    |
| 2% Red LS-B       | 95.90   | 88.63   | 74.71   | 63.80   | 54.06    | 49.11    | 47.25    |
| 2% Black R        | 95.79   | 89.43   | 73.89   | 63.78   | 53.90    | 48.47    | 46.63    |
| 2% Blue LS-3R     | 95.75   | 88.99   | 73.82   | 63.05   | 53.34    | 48.03    | 46.21    |
| 4% Navy LS-G      | 95.20   | 88.83   | 73.91   | 63.12   | 53.22    | 47.98    | 46.33    |
| 2% Turquoise H-GN | 94.99   | 88.92   | 73.70   | 61.56   | 57.51    | 53.66    | 50.48    |
| 2% Blue G         | 94.81   | 88.94   | 73.48   | 61.06   | 57.14    | 53.13    | 49.90    |



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก

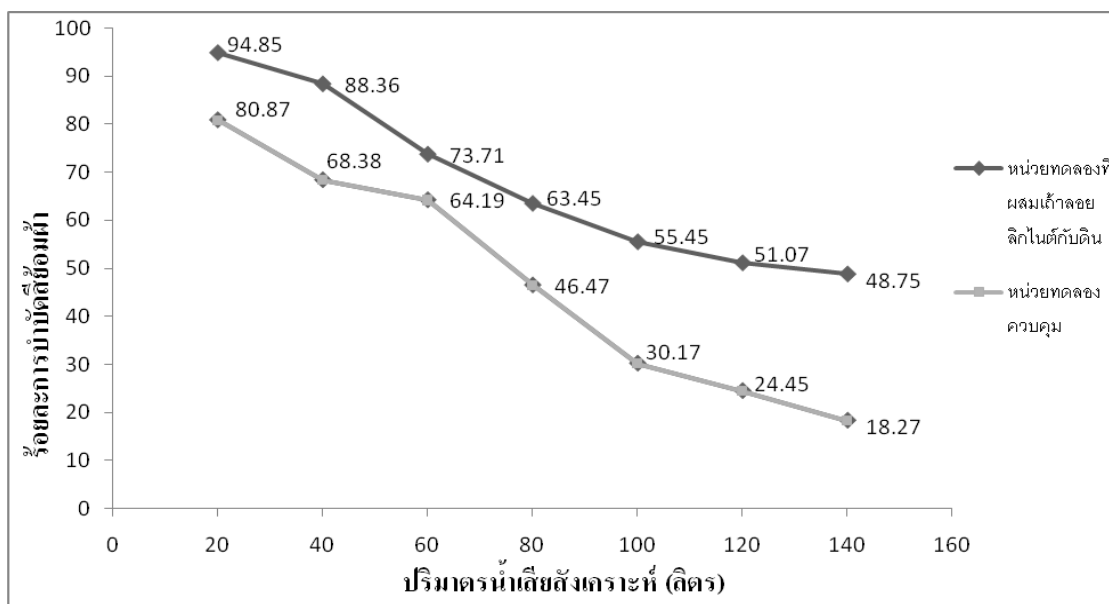


ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของเสียของผ้า 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดเสียด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก

## 5.2 ชุดควบคุม

ทำการทดลองด้วยระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก โดยไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ในดินที่เป็นวัสดุปลูก พบว่าในการบำบัดเสียของผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ 20 ลิตรแรก มีประสิทธิภาพในการกำจัดเสียของผ้าเฉลี่ยร้อยละ 80.87 จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว จนหมดความสามารถในการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่มีถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินโดยการปลูกหญ้าแฝกพบว่า หน่วยทดลองที่มีการผสมถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดเสียของผ้าสูงกว่า และลดลงช้ากว่า แสดงดังภาพที่ 54 แสดงว่าถ้ำลอยลิกไนต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางในการบำบัดเสียของผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ ดังนั้นมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ระบบบำบัดนี้ ร่วมกับการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียที่มาจากโรงงานย้อมผ้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำถ้ำลอยลิกไนต์ไปพัฒนาระบบบำบัดแบบอื่นๆ ได้อีก เช่น ระบบบำบัดแบบถังกรอง เป็นต้น





ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดโดยเฉลี่ยของเสียของ 9 ชนิด กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการบำบัดเสียด้วยระบบการบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยการปลูกหญ้าแฝก เทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

ในการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองแบบเบดซ์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด ส่วนที่สองเป็นการทดลองการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง และส่วนที่สามเป็นการทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก เพื่อพัฒนาระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ ผิดตัวกลาง และสามารนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้ โดยสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การทดลองส่วนแรกเป็นการทดลองแบบเบดซ์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ พบว่าปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 1 กรัม ต่อสารละลายมาตรฐานสี ย้อมผ้า 9 ชนิด ต่อสารละลายสีย้อมผ้าที่มีความเข้มข้น 20 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้าสูงที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 95.68 จึงเลือกใช้ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 1 กรัมในการศึกษาและทดลองปัจจัยอื่นๆต่อไป เมื่อทำการทดลองโดยใช้ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ 1 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากสีย้อมผ้าทั้ง 9 ชนิดที่มีความเข้มข้น 20 ppm ปริมาตร 50 มิลลิลิตร พบว่า ระยะเวลาการสัมผัส 4 ชั่วโมง และ 5 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมผ้าสูงสุด เฉลี่ยร้อยละ 92.45 และ 99.86 ตามลำดับ อัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:60 โดยที่ดินไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้า และกระบวนการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์มีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

การทดลองส่วนที่สองเป็นการบำบัดแบบไหลต่อเนื่องในคอลัมน์แก้วที่บรรจุถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุปลูกอยู่ชั้นบนสุด โดยใช้ระยะเวลาการบำบัดแตกต่างกัน คือ แบบไหลต่อเนื่อง แบบจางแช่ 4 ชั่วโมง และแบบจางแช่ 5 วัน พบว่าระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมคือแบบไหลต่อเนื่อง จึงเลือกการบำบัดแบบไหลต่อเนื่องมาทำการทดลองในส่วนที่สามต่อไป

การทดลองส่วนที่สามเป็น การทดลองแบบไหลต่อเนื่องในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ ผิดตัวกลางที่ทำการทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินเป็นวัสดุปลูกอยู่ชั้นบนสุด ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิด คือ รูปถ่าย และหญ้าแฝก พบว่าในส่วนของต้นรูปถ่ายให้

ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้า สูงที่สุด เฉลี่ยร้อยละ 96.81 และหญ้าแฝก ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมผ้า เฉลี่ยร้อยละ 94.85 ในขณะที่หน่วยบำบัดที่ปลูกหญ้าแฝก และไม่ได้ผสมเถาวัลย์ลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูกให้ประสิทธิภาพต่ำกว่า คือเฉลี่ยร้อยละ 80.87 และหมดประสิทธิภาพอย่างรวดเร็ว

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า เถาวัลย์ลิกไนต์มีประสิทธิภาพสูงสำหรับนำมาเป็นตัวดูดซับสีย้อม เพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบ ไหลได้ผิวดักกลางให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าได้ดียิ่งขึ้น

#### ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการทดลอง พบว่าการบำบัดสีย้อมผ้านี้สามารถใช้เถาวัลย์ลิกไนต์เพียงอย่างเดียวได้ โดยใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมที่อยู่ในน้ำเสียที่มาจากโรงงานย้อมผ้า
2. ควรศึกษาการนำเถาวัลย์ลิกไนต์ไปใช้บำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าร่วมกับระบบบำบัดชนิดอื่นๆ เพื่อเป็นทางเลือกของการบำบัดน้ำเสียที่มาจากโรงงานย้อมผ้าต่อไป
3. ควรศึกษาตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือจากกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ มาใช้ในการดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับและนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า
4. ควรศึกษาการปลูกพืชชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ เช่น ไม้ดอก หรือไม้ประดับ เป็นต้น ร่วมกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโดยใช้เถาวัลย์ลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547. โครงการพัฒนาแนวทาง  
ด้านเทคนิคและสาธิตระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์. สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย,  
กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2536. การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. กอง  
แผนที่และการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอก  
ย้อม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

กิติโรจน์ หวันตาหลา, ชยาภาส ทับทอง และสินสุภา จุ้ยจุลเจิม. 2543. การดูดซับสีย้อมผ้าด้วย  
ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารงานวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลธัญบุรี (2): 104 – 112.

จันทนา ไพรบูรณ์, ไชยดากรณ์ พิมลา, มัทรียา แหะเหยียบ และอนงค์ จีระภัทร์. 2555. การดูดซับสี  
ย้อมเบสิกด้วยสาหร่ายสีเขียว *Spirogyra* sp. วารสารวิทยาศาสตร์ มข. 40 (1).

ดวงพร สุวรรณกุล และ รังสิต สุวรรณเขตนิกม. 2544. วัชพืชในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ดุขฤ์ สุนทรานุ. 2531. การออกแบบลายพิมพ์. พิมพ์ครั้งที่ 5. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

เทพฤทธิ ปิติฤทธิ. 2544. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิ  
กาอะลูมินาที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธีรวัฒน์ สีนศิริ. 2554. ผลกระทบของความละเอียดถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเฟสค์.  
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 9 (1): 40-48.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประนัศดา เจริญราช. 2548. การบำบัดน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมไหมโดยใช้บึงประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ปัญญา เศรษฐา. 2543. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยใช้ถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์. 2546. การบำบัดสีย้อมรีแอคทีฟด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เปล่งศักดิ์ ภู่อจรร. 2546. การใช้เรซินผักตบชวาบำบัดสีจากน้ำเสียย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

รัชนิษฐ์ รุกขชาติ. 2546. สีย้อมและการบำบัดสีในน้ำทิ้ง. แหล่งที่มา:

[http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday\\_data/biology.htm](http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithday_data/biology.htm), 23 พฤษภาคม 2557

ลัทธิ คณานินันท์. 2539. ประสิทธิภาพของกกลมรูปถาญี้อและแห้วทรงกระเทียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

ลิลี โกศัยยานนท์. 2541. คู่มือวิชาการสิ่งทอ. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรรณวิภา ผลาหาญ. 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วรวิมล มัธยันต์. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพบดลือกดินดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



วัชรพงษ์ สุรคุปต์. 2554. ผลของความลึกชั้นตัวกลางต่อการกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวในแนวดิ่ง. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. 25 (3): 71-78.

วิจิตอจันรา สรรพกิจจานง. 2536. ถั่วลอยในงานทาง รายงานฉบับที่ วพ .131, ศูนย์วิจัยและพัฒนา, กรมทางหลวง.

วิฑูร ชินพันธุ์ และ อาทิตย์ สุขเกษม. 2536. การศึกษาเปรียบเทียบหญ้าแฝกในประเทศไทย, น. 30-49. ใน รายงานผลการดำเนินงานโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปี 2536. กองแผนงาน กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

วีระชัย ณ นคร. 2536. การศึกษาอนุกรมวิธานของหญ้าสกุล Vetiveria ในประเทศไทย, น. 30 -36. ใน รายงานผลการดำเนินงานโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปี 2536. กองแผนงาน กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

ศิริพรรณ คำแน่น. 2554. การใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการบำบัดเสียจากน้ำเสียฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสุรนารี.

ศุภวิน วัชรมูล. 2552. การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมโดยชีววิธีเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้า. **Colour Way Thailand's Leading Textile Journal.** (14): 21 – 23

สุวสา กานตวนิชกูร. 2546. การกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินแบบไหลขึ้นตามด้วยแบบไหลลง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 11 (2): 46-55

สกล ศิริรัตน์. 2546. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟและสีย้อมเบสิกจากสารละลายโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเคลือบด้วยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2544. คู่มือการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าและฟอกย้อม. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สุจินต์ เอี่ยมปี. 2544. การบำบัดน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. 2548. การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุรัชย์ มัชฌาชีพ. 2538. วัชพืชบำบัดน้ำเสียในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แพรวพิตยา, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2552. การแก้ไขปัญหาน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติช่วยธรรมชาติ. แหล่งที่มา: <http://www.haii.or.th/wiki84/index.php>, 23 พฤศจิกายน 2556.

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจ ขนาดกลางและขนาดย่อม. 2554. ยุทธศาสตร์และแผนปฏิบัติการส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมรายสาขา. แหล่งที่มา <http://www.sme.go.th/SiteCollectionDocuments/วิจัยSMEs/สาขาเผยแพร่/อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม.pdf>, 23 พฤษภาคม 2557

อัจฉราพร ไสละสุต. 2527. คู่มือการย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์พิมพ์ลักษณ์, กรุงเทพฯ.

AbdurRahman, F.B., M. Akter and M.Z. Abedin. 2013. Dyes Removal from Textile Wastewater Using Orange Peels. **International Journal of Scientific & Technology Research**. 2 (9): 47 -50.

Buckley, C.A. 1992. Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. **Wat, Sci. Tech.** 25(9): 203-209.

Bulc T.G. and Ojstrsek A. 2008. The use of constructed wetland for dye-rich textile wastewater treatment. **J. Hazard Mater.** 155(1-2): 76-82.

- Christie, R. M. 2001. **Colour Chemistry Royal Society of Chemistry**. Cambridge.
- Chulhwan P., Myunggu L., Byunghwan L., Seung W. K., Howard A. C., Jinwon L. and Sangyong K.. 2007. Biodegradation and biosorption for decolorization of synthetic dyes by *Funalia troglodytes*. **Biochemical Engineering Journal**. (36), 59-65.
- Davies, L. C., Carias, C. C., Novais, J. M., and Martins-Dias, S. 2005. Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using *Phragmites australis* in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland. **Ecological Engineering**. 25: 594-605.
- Eren, Z., and Acar, F. N. 2006. Adsorption of reactive black 5 from an aqueous solution: equilibrium and kinetic studies. **Desalination**. 194: 1-10.
- Faust, S. D. and O. M. Aly 1987. **Adsorption Process for Water Treatment**. Butterworths, Boston, MA.
- Grace J.B. and Harrison. 1986. The Biology of Canadian Weeds. 73. *Typhalatifolia* L., *Typha angustifolia* L. and *Typha x glauca* Godr. **Canadian Journal of Plant Science**. 66: 361-379.
- Jing, S.R., Lin Y.F., Lee, D.Y., and Wang, T.W. 2001. Using Constructed Wetland Systems to Remove Solids from Highly Polluted River Water. **Water Science and Technology**. 1 (1): 89-96.
- Johnson, A.T. 1989. The theory of Coloration of Textiles. **Society of Dyes and Colorist**. 90(2): 912-920.
- Mohammed W.T., H.F. Farhood and A.H. Bjaiah Al-Mas'udi. 2007. Removal of Dyes from Wastewater of Textile Industries Using Activated Carbon and Activated Alumina. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**. 9(4): 43-52.

- Nopkhuntod, S., S. Dararat, and J. Yimrattanabovorn. 2012. Removal of reactive dyes from wastewater by shale. **Songklanakarin J. Sci. Technol.** 34 (1), 117-123.
- Ong, S. A., Uchiyama, K., Inadama, D., and Yamagiwa, K. 2009. Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. **J. Hazard Mater.** 165: 696-703
- Rao, B. V. V., and Rao, M. S. 2006. Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by flyash. **Chemical Engineering.** 116: 77-84.
- Shaobin Wang. 2008. A Comparative study of Fenton and Fenton-like reaction kinetics in decolourisation of wastewater. **Dyes and Pigments.** (76), 714-720.
- Sun, D., Zhang, X., Wu, Y., and Liu, X. 2010. Adsorption of anionic dyes from aqueous solution on fly ash. **J. Hazard Mater.** 181: 335-342.
- United States Environmental Protection Agency. 2000. **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters.** Available Source: <http://water.epa.gov/type/wetlands/restore/upload/constructed-wetlands-design-manual.pdf>, October 29, 2013.
- Wilcox, D.A. 1986. The Effects of Deicing Salts on Vegetation in Pinhook Bog, Indiana. **Canadian Journal of Botany.** 64: 865-874.





**ตารางผนวกที่ 1** ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้าผสม 9 ชนิด ที่ความเข้มข้น 10 - 50 มิลลิกรัม/ลิตร

| ชนิดสี         | 10 (มก./ล.) | 20 (มก./ล.) | 30 (มก./ล.) | 40 (มก./ล.) | 50 (มก./ล.) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Yellow LS-R    | 0.872       | 1.674       | 2.532       | 3.33        | 4.038       |
| Yellow LS-4G   | 0.901       | 1.729       | 2.638       | 3.503       | 4.289       |
| Orange Hf-2R   | 0.750       | 1.415       | 2.202       | 3.081       | 3.883       |
| Red LS-B       | 0.737       | 1.386       | 2.185       | 3.051       | 3.834       |
| Blue LS-3R     | 0.741       | 1.413       | 2.207       | 3.083       | 3.885       |
| Black R        | 0.665       | 1.456       | 2.218       | 3.132       | 3.914       |
| Navy LS-G      | 0.683       | 1.465       | 2.241       | 3.135       | 3.922       |
| Turquoise H-GN | 0.568       | 1.134       | 1.952       | 2.714       | 3.569       |
| Blue G         | 0.565       | 1.132       | 1.949       | 2.712       | 3.567       |
| เฉลี่ยรวม      | 0.720       | 1.422       | 2.236       | 3.082       | 3.878       |

**ตารางผนวกที่ 2** อิทธิพลของปริมาณเส้นด้ายทอในต่อสารละลายมาตรฐานสีย้อมผ้า 9 ชนิด

| ชนิดสี         | 0.5 (กรัม) | 1.0 (กรัม) | 2.0 (กรัม) | 3.0 (กรัม) | 4.0 (กรัม) | 5.0 (กรัม) |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Yellow LS-R    | 95.90      | 97.22      | 96.93      | 94.88      | 93.26      | 92.53      |
| Yellow LS-4G   | 93.04      | 94.64      | 95.36      | 93.04      | 91.45      | 90.72      |
| Orange Hf-2R   | 94.59      | 96.80      | 91.89      | 90.66      | 87.96      | 85.74      |
| Red LS-B       | 93.93      | 96.63      | 96.40      | 89.44      | 87.41      | 85.39      |
| Blue LS-3R     | 93.10      | 96.03      | 95.19      | 90.38      | 88.70      | 87.65      |
| Black R        | 88.83      | 91.69      | 92.73      | 87.79      | 84.68      | 82.60      |
| Navy LS-G      | 96.76      | 98.06      | 96.89      | 94.95      | 94.57      | 93.40      |
| Turquoise H-GN | 94.64      | 94.87      | 95.76      | 90.18      | 88.17      | 87.50      |
| Blue G         | 93.48      | 95.17      | 94.93      | 91.06      | 87.68      | 87.44      |
| เฉลี่ยรวม      | 93.81      | 95.68      | 95.12      | 91.37      | 89.32      | 88.11      |

**ตารางผนวกที่ 3** อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยติกไนต์ 1 กรัม ต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร

| ชนิดสี         | Absorbent | ร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า |
|----------------|-----------|-------------------------|
| Yellow LS-R    | 0.551     | 70.19                   |
| Yellow LS-4G   | 0.562     | 71.10                   |
| Orange Hf-2R   | 0.485     | 67.47                   |
| Red LS-B       | 0.393     | 74.22                   |
| Blue LS-3R     | 0.395     | 74.40                   |
| Black R        | 0.431     | 73.84                   |
| Navy LS-G      | 0.462     | 72.03                   |
| Turquoise H-GN | 0.508     | 57.81                   |
| Blue G         | 0.518     | 56.15                   |
| เฉลี่ยรวม      | 0.478     | 68.58                   |

**ตารางผนวกที่ 4** อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นชั่วโมง (1-3 ชั่วโมง)

| ชนิดสี         | 1 ชั่วโมง |                | 2 ชั่วโมง |                | 3 ชั่วโมง |                |
|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
| Yellow LS-R    | 0.463     | 74.90          | 0.201     | 89.09          | 0.282     | 84.70          |
| Yellow LS-4G   | 0.475     | 75.58          | 0.203     | 89.54          | 0.293     | 84.91          |
| Orange Hf-2R   | 0.400     | 73.17          | 0.169     | 88.67          | 0.232     | 84.41          |
| Red LS-B       | 0.308     | 79.78          | 0.136     | 91.05          | 0.162     | 89.35          |
| Blue LS-3R     | 0.307     | 80.07          | 0.137     | 91.12          | 0.161     | 89.53          |
| Black R        | 0.333     | 79.74          | 0.140     | 91.49          | 0.180     | 89.03          |
| Navy LS-G      | 0.360     | 78.22          | 0.138     | 91.62          | 0.199     | 87.96          |
| Turquoise H-GN | 0.400     | 66.76          | 0.172     | 85.73          | 0.248     | 79.42          |
| Blue G         | 0.404     | 65.78          | 0.174     | 85.28          | 0.250     | 78.89          |

ตารางผนวกที่ 5 อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นชั่วโมง (4-6 ชั่วโมง)

| ชนิดสี         | 4 ชั่วโมง |                | 5 ชั่วโมง |                | 6 ชั่วโมง |                |
|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
| Yellow LS-R    | 0.140     | 92.39          | 0.184     | 90.01          | 0.154     | 91.66          |
| Yellow LS-4G   | 0.143     | 92.65          | 0.190     | 90.26          | 0.156     | 91.95          |
| Orange Hf-2R   | 0.114     | 92.32          | 0.151     | 89.87          | 0.122     | 91.78          |
| Red LS-B       | 0.085     | 94.40          | 0.103     | 93.22          | 0.084     | 94.46          |
| Blue LS-3R     | 0.085     | 94.49          | 0.103     | 93.32          | 0.084     | 94.56          |
| Black R        | 0.092     | 94.38          | 0.115     | 93.01          | 0.092     | 94.41          |
| Navy LS-G      | 0.093     | 94.37          | 0.124     | 92.47          | 0.096     | 94.16          |
| Turquoise H-GN | 0.135     | 88.76          | 0.164     | 86.35          | 0.135     | 88.76          |
| Blue G         | 0.138     | 88.32          | 0.166     | 85.91          | 0.137     | 88.41          |

ตารางผนวกที่ 6 อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นวัน (1-3 วัน)

| ชนิดสี         | 1 วัน     |                | 2 วัน     |                | 3 วัน     |                |
|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
| Yellow LS-R    | 0.203     | 88.11          | 0.055     | 96.79          | 0.016     | 99.06          |
| Yellow LS-4G   | 0.207     | 88.55          | 0.128     | 92.93          | 0.017     | 99.06          |
| Orange Hf-2R   | 0.175     | 87.31          | 0.046     | 96.63          | 0.012     | 99.13          |
| Red LS-B       | 0.150     | 88.93          | 0.048     | 96.47          | 0.013     | 99.01          |
| Blue LS-3R     | 0.153     | 88.90          | 0.049     | 96.44          | 0.013     | 99.02          |
| Black R        | 0.182     | 88.23          | 0.054     | 96.51          | 0.014     | 99.06          |
| Navy LS-G      | 0.186     | 87.91          | 0.046     | 97.01          | 0.011     | 99.28          |
| Turquoise H-GN | 0.199     | 81.41          | 0.061     | 94.31          | 0.016     | 98.51          |
| Blue G         | 0.202     | 80.79          | 0.063     | 93.97          | 0.017     | 98.43          |

ตารางผนวกที่ 7 อิทธิพลของระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมเป็นวัน (4-5 วัน)

| ชนิดสี         | 4 วัน     |           | 5 วัน     |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | Absorbent | ร้อยละการ | Absorbent | ร้อยละการ |
|                |           | บำบัด     |           | บำบัด     |
| Yellow LS-R    | 0.004     | 99.77     | 0.001     | 99.94     |
| Yellow LS-4G   | 0.005     | 99.72     | 0.002     | 99.92     |
| Orange Hf-2R   | 0.002     | 99.82     | 0.001     | 99.96     |
| Red LS-B       | 0.002     | 99.82     | 0.002     | 99.89     |
| Blue LS-3R     | 0.003     | 99.75     | 0.002     | 99.89     |
| Black R        | 0.003     | 99.77     | 0.002     | 99.90     |
| Navy LS-G      | 0.003     | 99.77     | 0.002     | 99.90     |
| Turquoise H-GN | 0.005     | 99.49     | 0.003     | 99.67     |
| Blue G         | 0.005     | 99.48     | 0.003     | 99.67     |

ตารางผนวกที่ 8 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินปนทราย (กรัม)  
อัตราส่วน 1:10 ถึง 1:30

| ชนิดสี         | 1:10      |           | 1:20      |           | 1:30      |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | Absorbent | ร้อยละการ | Absorbent | ร้อยละการ | Absorbent | ร้อยละการ |
|                |           | บำบัด     |           | บำบัด     |           | บำบัด     |
| Yellow LS-R    | 0.255     | 84.48     | 0.251     | 84.69     | 0.289     | 82.38     |
| Yellow LS-4G   | 0.250     | 85.6      | 0.252     | 85.48     | 0.278     | 83.96     |
| Orange Hf-2R   | 0.242     | 81.95     | 0.242     | 81.92     | 0.263     | 80.35     |
| Red LS-B       | 0.2425    | 80.38     | 0.24      | 80.58     | 0.253     | 79.53     |
| Blue LS-3R     | 0.238     | 80.88     | 0.231     | 81.45     | 0.272     | 78.15     |
| Black R        | 0.237     | 81.94     | 0.2375    | 81.94     | 0.267     | 79.66     |
| Navy LS-G      | 0.234     | 82.98     | 0.236     | 82.87     | 0.273     | 80.15     |
| Turquoise H-GN | 0.204     | 78.79     | 0.193     | 79.88     | 0.209     | 78.22     |
| Blue G         | 0.199     | 79.18     | 0.194     | 79.75     | 0.208     | 78.29     |

**ตารางผนวกที่ 9** อิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยติกไนต์ต่อดินปนทราย (กรัม)  
อัตราส่วน 1:40 ถึง 1:60

| ชนิดสี         | 1:40      |                | 1:50      |                | 1:60      |                |
|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
|                | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
| Yellow LS-R    | 0.261     | 84.08          | 0.239     | 85.42          | 0.263     | 83.96          |
| Yellow LS-4G   | 0.242     | 86.06          | 0.242     | 86.03          | 0.245     | 85.89          |
| Orange Hf-2R   | 0.232     | 82.7           | 0.209     | 84.38          | 0.168     | 87.43          |
| Red LS-B       | 0.228     | 81.51          | 0.252     | 79.61          | 0.215     | 82.56          |
| Blue LS-3R     | 0.229     | 81.61          | 0.247     | 80.12          | 0.214     | 82.77          |
| Black R        | 0.218     | 83.38          | 0.222     | 83.12          | 0.213     | 83.76          |
| Navy LS-G      | 0.219     | 84.11          | 0.221     | 83.96          | 0.213     | 84.54          |
| Turquoise H-GN | 0.202     | 78.95          | 0.208     | 78.38          | 0.197     | 79.52          |
| Blue G         | 0.201     | 78.97          | 0.206     | 78.44          | 0.195     | 79.64          |

**ตารางผนวกที่ 10** อิทธิพลของปริมาณเถ้าลอยติกไนต์ (0.5 – 5 กรัม) กับร้อยละการบำบัดสีข้อมผ้า

| ชนิดสี         | 0.5 (กรัม) |       |        | 1 (กรัม) |       |        | 2 (กรัม) |       |        |
|----------------|------------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|
|                | ซ้ำ 1      | ซ้ำ 2 | เฉลี่ย | ซ้ำ 1    | ซ้ำ 2 | เฉลี่ย | ซ้ำ 1    | ซ้ำ 2 | เฉลี่ย |
| Yellow LS-R    | 0.595      | 0.538 | 0.566  | 0.152    | 0.178 | 0.165  | 0.074    | 0.081 | 0.077  |
| Yellow LS-4G   | 0.660      | 0.598 | 0.629  | 0.165    | 0.191 | 0.178  | 0.075    | 0.082 | 0.078  |
| Orange Hf-2R   | 0.507      | 0.453 | 0.480  | 0.120    | 0.144 | 0.132  | 0.068    | 0.073 | 0.070  |
| Red LS-B       | 0.330      | 0.294 | 0.312  | 0.101    | 0.115 | 0.108  | 0.071    | 0.076 | 0.073  |
| Blue LS-3R     | 0.334      | 0.298 | 0.316  | 0.104    | 0.115 | 0.109  | 0.070    | 0.074 | 0.072  |
| Black R        | 0.414      | 0.366 | 0.390  | 0.122    | 0.139 | 0.131  | 0.069    | 0.071 | 0.070  |
| Navy LS-G      | 0.489      | 0.430 | 0.460  | 0.119    | 0.139 | 0.129  | 0.055    | 0.065 | 0.060  |
| Turquoise H-GN | 0.493      | 0.447 | 0.470  | 0.202    | 0.225 | 0.213  | 0.070    | 0.073 | 0.071  |
| Blue G         | 0.501      | 0.454 | 0.477  | 0.210    | 0.229 | 0.219  | 0.071    | 0.074 | 0.073  |



ตารางผนวกที่ 11 อิทธิพลของปริมาณถ้ำลอยติกไนต์ (3 – 5 กรัม) กับร้อยละการบำบัดสีย้อมผ้า

| ชนิดสี         | 3 (กรัม) |       |        | 4 (กรัม) |       |        | 5 (กรัม) |       |        |
|----------------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|----------|-------|--------|
|                | ซ้ำ1     | ซ้ำ2  | เฉลี่ย | ซ้ำ1     | ซ้ำ2  | เฉลี่ย | ซ้ำ1     | ซ้ำ2  | เฉลี่ย |
| Yellow LS-R    | 0.048    | 0.053 | 0.050  | 0.037    | 0.038 | 0.037  | 0.029    | 0.025 | 0.027  |
| Yellow LS-4G   | 0.049    | 0.053 | 0.051  | 0.038    | 0.038 | 0.038  | 0.024    | 0.024 | 0.024  |
| Orange Hf-2R   | 0.046    | 0.050 | 0.048  | 0.035    | 0.033 | 0.034  | 0.019    | 0.022 | 0.020  |
| Red LS-B       | 0.048    | 0.048 | 0.048  | 0.035    | 0.033 | 0.034  | 0.017    | 0.023 | 0.020  |
| Blue LS-3R     | 0.044    | 0.052 | 0.048  | 0.036    | 0.035 | 0.035  | 0.015    | 0.021 | 0.018  |
| Black R        | 0.043    | 0.048 | 0.045  | 0.036    | 0.034 | 0.035  | 0.015    | 0.021 | 0.018  |
| Navy LS-G      | 0.036    | 0.041 | 0.038  | 0.027    | 0.025 | 0.026  | 0.014    | 0.013 | 0.013  |
| Turquoise H-GN | 0.043    | 0.053 | 0.048  | 0.036    | 0.037 | 0.036  | 0.015    | 0.020 | 0.017  |
| Blue G         | 0.044    | 0.054 | 0.049  | 0.039    | 0.038 | 0.038  | 0.016    | 0.021 | 0.018  |

ตารางผนวกที่ 12 ไอโซเทอร์มของถ้ำลอยติกไนต์

| ปริมาณถ้ำลอย (กรัม) | Co | C     | V    | q     | 1/q   | 1/C   | log q   | log C |
|---------------------|----|-------|------|-------|-------|-------|---------|-------|
| 0.5                 | 20 | 7.277 | 0.05 | 1.272 | 0.786 | 0.137 | 0.104   | 0.862 |
| 1                   | 20 | 3.492 | 0.05 | 0.825 | 1.212 | 0.286 | -0.084  | 0.543 |
| 2                   | 20 | 2.465 | 0.05 | 0.439 | 2.278 | 0.406 | -0.0358 | 0.392 |
| 3                   | 20 | 2.152 | 0.05 | 0.297 | 3.367 | 0.465 | -0.527  | 0.333 |
| 4                   | 20 | 2.001 | 0.05 | 0.225 | 4.444 | 0.499 | -0.648  | 0.301 |
| 5                   | 20 | 1.813 | 0.05 | 0.182 | 5.495 | 0.552 | -0.740  | 0.258 |

ตารางผนวกที่ 13 อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|----------------|
| 100                           | 0.020     | 1.811                   | 98.80          |
| 200                           | 0.023     | 1.847                   | 98.63          |
| 300                           | 0.024     | 1.857                   | 98.58          |
| 400                           | 0.027     | 1.897                   | 98.40          |
| 500                           | 0.030     | 1.940                   | 98.22          |
| 600                           | 0.033     | 1.980                   | 98.04          |
| 700                           | 0.036     | 2.016                   | 97.88          |
| 800                           | 0.038     | 2.034                   | 97.80          |
| 900                           | 0.039     | 2.055                   | 97.69          |
| 1000                          | 0.042     | 2.091                   | 97.52          |
| 1100                          | 0.046     | 2.137                   | 97.32          |
| 1200                          | 0.050     | 2.193                   | 97.07          |
| 1300                          | 0.057     | 2.276                   | 97.66          |
| 1400                          | 0.068     | 2.410                   | 96.00          |
| 1500                          | 0.076     | 2.513                   | 95.48          |
| 1600                          | 0.087     | 2.654                   | 94.72          |
| 1700                          | 0.111     | 2.956                   | 93.15          |
| 1800                          | 0.135     | 3.254                   | 91.51          |
| 1900                          | 0.186     | 3.896                   | 88.08          |
| 2000                          | 0.255     | 4.754                   | 83.55          |
| 2100                          | 0.290     | 5.198                   | 81.25          |
| 2200                          | 0.343     | 5.858                   | 77.89          |
| 2300                          | 0.373     | 6.242                   | 75.88          |
| 2400                          | 0.399     | 6.565                   | 74.19          |
| 2500                          | 0.418     | 6.799                   | 73.05          |
| 2600                          | 0.441     | 7.093                   | 71.54          |

ตารางผนวกที่ 13 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|----------------|
| 2700                          | 0.468     | 7.429                   | 69.80          |
| 2800                          | 0.497     | 7.788                   | 68.10          |
| 2900                          | 0.559     | 8.571                   | 64.04          |
| 3000                          | 0.615     | 9.272                   | 60.43          |
| 3100                          | 0.660     | 9.832                   | 57.57          |
| 3200                          | 0.730     | 10.706                  | 53.11          |
| 3300                          | 0.778     | 11.308                  | 50.11          |
| 3400                          | 0.819     | 11.830                  | 47.41          |
| 3500                          | 0.858     | 12.310                  | 44.94          |
| 3600                          | 0.914     | 13.019                  | 41.36          |
| 3700                          | 0.958     | 13.573                  | 38.53          |
| 3800                          | 0.999     | 14.093                  | 35.78          |
| 3900                          | 1.060     | 14.843                  | 31.85          |
| 4000                          | 1.135     | 15.781                  | 27.16          |
| 4100                          | 1.171     | 16.243                  | 24.72          |
| 4200                          | 1.217     | 16.807                  | 21.76          |
| 4300                          | 1.257     | 17.311                  | 19.10          |
| 4400                          | 1.292     | 17.757                  | 16.76          |
| 4500                          | 1.330     | 18.236                  | 14.42          |
| 4600                          | 1.363     | 18.638                  | 12.29          |
| 4700                          | 1.383     | 18.898                  | 10.94          |
| 4800                          | 1.417     | 19.325                  | 8.81           |
| 4900                          | 1.448     | 19.713                  | 6.93           |
| 5000                          | 1.478     | 20.083                  | 5.07           |
| 5100                          | 1.510     | 20.481                  | 3.09           |
| 5200                          | 1.529     | 20.726                  | 1.90           |

ตารางผนวกที่ 13 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|----------------|
| 5300                          | 1.541     | 20.876                  | 1.14           |
| 5400                          | 1.551     | 20.995                  | 0.56           |
| 5500                          | 1.556     | 21.058                  | 0.24           |

ตารางผนวกที่ 14 อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบไหลต่อเนื่อง

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|----------------|
| 100                           | 0.008     | 99.48          |
| 200                           | 0.032     | 98.05          |
| 300                           | 0.295     | 81.50          |
| 400                           | 0.489     | 68.65          |
| 500                           | 0.514     | 67.96          |
| 600                           | 0.520     | 67.69          |
| 700                           | 0.909     | 42.66          |
| 800                           | 1.044     | 33.92          |
| 900                           | 1.407     | 10.27          |

ตารางผนวกที่ 15 อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสียอมผ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|------------------------|----------------|
| 100                           | 0.024     | 1.860                  | 98.27          |
| 200                           | 0.031     | 1.956                  | 97.73          |
| 300                           | 0.048     | 2.168                  | 96.57          |
| 400                           | 0.064     | 2.366                  | 95.43          |
| 500                           | 0.077     | 2.524                  | 94.46          |
| 600                           | 0.092     | 2.717                  | 93.26          |
| 700                           | 0.124     | 3.113                  | 90.74          |
| 800                           | 0.163     | 3.610                  | 87.31          |
| 900                           | 0.215     | 4.257                  | 83.13          |
| 1000                          | 0.277     | 5.039                  | 77.97          |
| 1100                          | 0.328     | 5.679                  | 73.92          |
| 1200                          | 0.375     | 6.259                  | 70.16          |
| 1300                          | 0.394     | 6.504                  | 68.79          |
| 1400                          | 0.443     | 7.119                  | 64.88          |
| 1500                          | 0.545     | 8.392                  | 56.46          |
| 1600                          | 0.597     | 9.040                  | 52.34          |
| 1700                          | 0.656     | 9.781                  | 47.49          |
| 1800                          | 0.706     | 10.415                 | 43.53          |
| 1900                          | 0.740     | 10.835                 | 40.93          |
| 2000                          | 0.774     | 11.261                 | 38.19          |
| 2100                          | 0.800     | 11.589                 | 36.05          |
| 2200                          | 0.807     | 11.679                 | 35.46          |
| 2300                          | 0.813     | 11.756                 | 35.00          |



**ตารางผนวกที่ 16** อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 4 ชั่วโมง

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|----------------|
| 100                           | 0.016     | 98.95          |
| 200                           | 0.073     | 95.34          |
| 300                           | 0.351     | 77.85          |
| 400                           | 0.548     | 64.92          |
| 500                           | 0.615     | 61.17          |
| 600                           | 0.860     | 44.84          |
| 700                           | 1.292     | 17.25          |
| 800                           | 1.439     | 7.71           |

**ตารางผนวกที่ 17** อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก และดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 5 วัน

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสีข้อมฟ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|----------------|
| 100                           | 0.027     | 1.907                   | 98.15          |
| 200                           | 0.035     | 2.000                   | 97.66          |
| 300                           | 0.041     | 2.079                   | 97.25          |
| 400                           | 0.045     | 2.123                   | 97.05          |
| 500                           | 0.051     | 2.198                   | 96.61          |
| 600                           | 0.066     | 2.391                   | 95.30          |
| 700                           | 0.066     | 2.396                   | 95.51          |
| 800                           | 0.076     | 2.518                   | 94.80          |
| 900                           | 0.086     | 2.643                   | 94.10          |
| 1000                          | 0.098     | 2.796                   | 93.12          |
| 1100                          | 0.112     | 2.965                   | 92.05          |
| 1200                          | 0.133     | 3.234                   | 90.41          |

ตารางผนวกที่ 17 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ปริมาณสียอมผ้าที่เหลือ | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|------------------------|----------------|
| 1300                          | 0.160     | 3.573                  | 88.36          |
| 1400                          | 0.199     | 4.056                  | 85.44          |
| 1500                          | 0.243     | 4.612                  | 82.05          |
| 1600                          | 0.291     | 5.216                  | 78.42          |
| 1700                          | 0.343     | 5.858                  | 74.42          |
| 1800                          | 0.424     | 6.878                  | 68.53          |
| 1900                          | 0.509     | 7.947                  | 62.08          |
| 2000                          | 0.574     | 8.757                  | 57.17          |
| 2100                          | 0.609     | 9.190                  | 54.67          |
| 2200                          | 0.637     | 9.544                  | 52.57          |
| 2300                          | 0.676     | 10.038                 | 49.51          |
| 2400                          | 0.705     | 10.402                 | 47.28          |
| 2500                          | 0.724     | 10.632                 | 45.87          |
| 2600                          | 0.736     | 10.782                 | 44.95          |
| 2700                          | 0.744     | 10.887                 | 44.31          |

ตารางผนวกที่ 18 อิทธิพลของปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก โดยไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ด้วยวิธีการบำบัดแบบแช่ขัง 5 วัน

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|----------------|
| 100                           | 0.012     | 99.24          |
| 200                           | 0.065     | 95.88          |
| 300                           | 0.251     | 84.42          |
| 400                           | 0.494     | 68.42          |
| 500                           | 0.692     | 56.20          |

ตารางผนวกที่ 18 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (มล.) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|-------------------------------|-----------|----------------|
| 600                           | 0.830     | 47.13          |
| 700                           | 1.092     | 30.34          |
| 800                           | 1.306     | 16.36          |
| 900                           | 1.509     | 3.24           |

ตารางผนวกที่ 19 ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูก และดินผสมแล้วดอยติกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้า

| ปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ (ลิตร) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|--------------------------------|-----------|----------------|
| 20                             | 0.041     | 96.81          |
| 40                             | 0.149     | 88.33          |
| 60                             | 0.286     | 77.59          |
| 80                             | 0.463     | 63.12          |
| 100                            | 0.560     | 55.85          |
| 120                            | 0.622     | 50.96          |
| 140                            | 0.662     | 47.66          |

**ตารางผนวกที่ 20** ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบะที่บรรจุวัสดุปลูก และดินผสมถ้ำลอยติกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก

| ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (ลิตร) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|---------------------------------|-----------|----------------|
| 20                              | 0.068     | 94.85          |
| 40                              | 0.155     | 88.36          |
| 60                              | 0.348     | 73.71          |
| 80                              | 0.480     | 63.45          |
| 100                             | 0.588     | 55.45          |
| 120                             | 0.645     | 51.07          |
| 140                             | 0.675     | 48.75          |

**ตารางผนวกที่ 21** ประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบะที่บรรจุวัสดุปลูกโดยไม่ผสมถ้ำลอยติกไนต์ ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก

| ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (ลิตร) | Absorbent | ร้อยละการบำบัด |
|---------------------------------|-----------|----------------|
| 20                              | 0.241     | 80.87          |
| 40                              | 0.398     | 68.38          |
| 60                              | 0.450     | 64.19          |
| 80                              | 0.681     | 46.47          |
| 100                             | 0.880     | 30.17          |
| 120                             | 0.948     | 24.45          |
| 140                             | 1.020     | 18.27          |

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                                |                                                                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ – นามสกุล                 | นางสาวชลธิชา มณีโชติ                                                                 |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | 31 มกราคม 2533                                                                       |
| สถานที่เกิด                    | จังหวัดระยอง                                                                         |
| ประวัติการศึกษา                | วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | -                                                                                    |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | -                                                                                    |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | -                                                                                    |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | -                                                                                    |