



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**  
**วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)**  
**ปริญญา**

.....  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

.....  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ภาควิชา

**เรื่อง** การบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ  
ด้วยการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์ ร่วมกับเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

Wastewater Treatment from Primary Clarifier Pond of Pulp and Paper Industry by  
Lignite Fly Ash Adsorption in Combination with Filtrated Lysimeter Technique

**نامผู้วิจัย** นายนนทวัชร สิริพัฒนนันท์

**ได้พิจารณาเห็นชอบโดย**

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

( ..... รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. .... )

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

( ..... รองศาสตราจารย์กณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม. .... )

**หัวหน้าภาควิชา**

( ..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D. .... )

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

.....  
รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.

( ..... )

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

วันที่ .....

เดือน .....

พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ด้วยการดูดซับ  
ของเถ้าลอยลิกไนต์ ร่วมกับเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

Wastewater Treatment from Primary Clarifier Pond of Pulp and Paper Industry by Lignite  
Fly Ash Adsorption in Combination with Filtrated Lysimeter Technique

โดย

นายพนทวัชร สิริพัฒนนันท์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556



นนทวัชร สิริพัฒน์ 2556: การบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงาน  
อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ด้วยการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับเทคนิคการกรอง  
ในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)  
สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 94 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุดูดซับ เพื่อบำบัด  
สีและซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ผลการทดลองแบบเบตซ์ พบว่า  
ร้อยละการบำบัดสี 62.06 และร้อยละการบำบัดซีโอดี 30.11 ตามลำดับ ได้จากการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์  
5 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง นอกจากนั้นยังพบว่าถ้ำลอยลิกไนต์  
ผสมกับดินในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:20 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีดีที่สุด รูปแบบ  
การดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของทั้งฟรุนดลิช และแลงเมียร์ ต่อมา  
ได้ทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร  
สูง 30 เซนติเมตร บรรจุกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราฮายา 4.2 เซนติเมตร ทราฮะเลียด 2.8 เซนติเมตร  
และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินอัตราส่วน 1:20 ซึ่งเป็นการจำลองพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่  
ชุ่มน้ำเทียม และระบบหมุนเวียนน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย  
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ (LERD) การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 เก็บตัวอย่างน้ำที่ไหล  
ผ่านคอลัมน์ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง นำไปตรวจวัดสี และค่าซีโอดี ซึ่งเป็นการเลียนแบบระบบบำบัดพื้นที่  
ชุ่มน้ำเทียม ขณะที่การทดลองชุดที่ 2 ถูกออกแบบเพื่อจำลองระบบบำบัดแบบหมุนเวียนน้ำเสีย  
โดยเก็บตัวอย่างน้ำหลังจากปล่อยแช่ในคอลัมน์ 5 วัน ปล่อยให้แห้ง 2 วัน และทำการทดลองซ้ำ  
ผลการทดลองพบว่าระบบหมุนเวียนน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีสูงกว่าระบบพื้นที่  
ชุ่มน้ำเทียม ต่อมาทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยใช้กระบะ  
พลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ที่บรรจุวัสดุปลูกเช่นเดียวกับการทดลอง  
แบบคอลัมน์ ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ กกกลมและหญ้าแฝก ผลการทดลองพบว่าสีและซีโอดี  
ถูกบำบัดไปประมาณร้อยละ 70.00 ถึง 80.00 และ 60.00 ตามลำดับ และให้ประสิทธิภาพสูงกว่า  
การใช้ดินเพียงอย่างเดียวถึงร้อยละ 5.00 ถึง 15.00 และ 20.00 ตามลำดับ

Nontawat Siraphatthananan 2013: Wastewater Treatment from Primary Clarifier Pond of Pulp and Paper Industry by Lignite Fly Ash Adsorption in Combination with Filtrated Lysimeter Technique. Master of Science (Environmental Science),  
Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis  
Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 94 pages.

This research was to investigate the possible use of lignite fly ash as adsorbent in the removal of color and COD contained in pulp and paper industry wastewater. The results from batch experiments showed that the maximum removal percentage of color 62.06 and percentage of COD 30.11 were achieved at 5 g. of lignite fly- ash per 50 ml of wastewater and 4 hr. of contact time. Furthermore, it was found that the best efficiency of color and COD reduction was at the ratio of lignite fly ash and soil 1:20 Also, adsorption model of lignite fly ash was conformed of both Freundlich and Langmuir isotherm. The experiments were also carried out on a continuous basis in a glass column (5 cm i.d. x 30 cm.) and packed with gravel 9.6 cm., coarse sand 4.2 cm., sand 2.8 cm. and mixed lignite fly ash and soil at the ratio 1:20 were constructed as the constructed wetland and the grass filtration system of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project (LERD). Two sets of experiments were conducted in continuous flow columns. In the experiments set 1, every 0.5 hr. after the wastewater passed through the column was collected to examine the color and COD value that similar to the constructed wetland wastewater treatment system. While the experiments set 2 was designed as the grass filtration wastewater treatment system by collecting the wastewater which passed through the tank after filled in the column for 5 days then let growing material dried for 2 days and repeated the experiment. The results indicated that the grass filtration (exp. set 2) had higher color and COD removal efficiency than the constructed wetland (exp. set 1). In addition, the filtrated lysimeter technique were conducted in square plastic tank with size 51x51x54 cm. that containing the growing material as the column experiments and growing *Cyperus alternifolius* Linn. and *Vetiveria zizanioides* in each tank. The results demonstrated that approximate percentage 70.00 to 80.00 and 60.00 of color and COD were removed respectively and had higher removal efficiency than the use of only soil at percentage 5.00 to 15.00 and 20.00 respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วง  
ไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ  
คำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจาก  
พระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์  
สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆนิสิตปริญญาโท วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม รุ่น 35 ที่ให้ความช่วยเหลือ  
ทั้งกำลังใจและกำลังใจตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัววิวัฒน์นันท์ ที่คอยเป็น  
กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้เมตตา อบรม สั่งสอน และคอยให้ความรู้ ตลอดจน  
สนับสนุนทุนการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นนทวัชร วิวัฒน์นันท์  
กันยายน 2556

## สารบัญ

### หน้า

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| สารบัญ                     | (1) |
| สารบัญตาราง                | (2) |
| สารบัญภาพ                  | (5) |
| คำนำ                       | 1   |
| วัตถุประสงค์               | 3   |
| การตรวจเอกสาร              | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ          | 44  |
| อุปกรณ์                    | 44  |
| วิธีการ                    | 45  |
| ผลและวิจารณ์               | 50  |
| สรุปและข้อเสนอแนะ          | 74  |
| สรุป                       | 74  |
| ข้อเสนอแนะ                 | 75  |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง       | 76  |
| ภาคผนวก                    | 79  |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 94  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่            |                                                                                                   | หน้า |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1                   | คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ ของโรงงาน<br>ขนาดกลาง                           | 10   |
| 2                   | สรุปมลพิษและของเสียต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ                                            | 13   |
| 3                   | องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์                                                                | 37   |
| 4                   | คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ                                                    | 52   |
| 5                   | คุณภาพน้ำหลังการทดลอง                                                                             | 73   |
| <br>                |                                                                                                   |      |
| <b>ตารางผนวกที่</b> |                                                                                                   |      |
| 1                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม                             | 80   |
| 2                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่<br>เหมาะสม                     | 80   |
| 3                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)                               | 81   |
| 4                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)                           | 81   |
| 5                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)                                   | 81   |
| 6                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)                               | 82   |
| 7                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินใน<br>อัตราส่วนต่างๆ                   | 82   |
| 8                   | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินใน<br>อัตราส่วนต่างๆ               | 82   |
| 9                   | ไอโซเทอร์มการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์                                                              | 83   |
| 10                  | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน<br>คอลัมน์ทุกครั้งชั่วโมง     | 83   |
| 11                  | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน<br>คอลัมน์ทุกครั้งชั่วโมง | 84   |
| 12                  | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน<br>คอลัมน์ทุกสัปดาห์          | 84   |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                                 | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน<br>คอตมันน์ทุกสัปดาห์                             | 85   |
| 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง          | 85   |
| 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>การปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง   | 86   |
| 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง           | 86   |
| 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง       | 87   |
| 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง        | 87   |
| 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>การปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง | 88   |
| 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง         | 88   |
| 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง     | 89   |
| 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์               | 89   |
| 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกในด้ร่วมกับการ<br>การปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์        | 90   |
| 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์                | 90   |
| 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ<br>ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์            | 91   |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์     | 91   |
| 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์ | 92   |
| 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์      | 92   |
| 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์  | 93   |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                               | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 การเติมน้ำลงในถังกวน                                                               | 4    |
| 2 เครื่องบดเชื้อ                                                                     | 5    |
| 3 ชุดรีดน้ำ                                                                          | 6    |
| 4 ชุดลูกอบแบบ Multi Dryer                                                            | 7    |
| 5 เครื่องขัดผิวหน้ากระดาษ                                                            | 8    |
| 6 เครื่องทำแผ่นกระดาษแบบ Cylinder                                                    | 8    |
| 7 กระบวนการผลิตกระดาษ                                                                | 9    |
| 8 บริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด                                                  | 14   |
| 9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งระบบบำบัดน้ำเสียบริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด            | 15   |
| 10 ระบบบำบัดน้ำเสีย “บริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”                              | 16   |
| 11 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น | 19   |
| 12 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ                                                        | 19   |
| 13 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                         | 21   |
| 14 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว                 | 22   |
| 15 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว  | 23   |
| 16 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว                                                     | 23   |
| 17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                                   | 26   |
| 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน                                                     | 29   |
| 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง                                                     | 30   |
| 20 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$                                          | 31   |
| 21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช                                   | 32   |
| 22 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์                                         | 33   |
| 23 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว                          | 33   |
| 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์                                        | 34   |
| 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท                                           | 35   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า                                                                                                       |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 26     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท 36                                                                    |
| 27     | การแบ่งประเภทของถ้ำลอย 38                                                                                  |
| 28     | ลักษณะโครงสร้างของถ้ำลอยลึกไนต์ ถ้ำถ่านหินรูปร่างกลม (ก.) ถ้ำถ่านหินกลวง (ข.) ถ้ำถ่านหินรูปร่างพูน (ค.) 39 |
| 29     | ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม 40                                         |
| 30     | ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย 41                                             |
| 31     | ถ้ำลอยลึกไนต์ 50                                                                                           |
| 32     | กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ 51                                                                  |
| 33     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีกับปริมาณถ้ำลอยลึกไนต์ 53                                     |
| 34     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีกับระยะเวลาสัมผัส เป็น ชั่วโมง (ก.) และวัน (ข.) 54            |
| 35     | ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ้ำลอยลึกไนต์ ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ก.) และไอโซเทอร์มฟรุนดิช (ข.) 55                 |
| 36     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดี ของถ้ำลอยลึกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ 57                    |
| 37     | คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย 58         |
| 38     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกครั้งชั่วโมง 59     |
| 39     | ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์ 60          |
| 40     | การทดลองชุดควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.) 61     |
| 41     | การทดลองชุดควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.) 62     |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                                                                                                                                       | หน้า |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 42     | กระเบบบรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ<br>เทียม และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย                                                                                                | 63   |
| 43     | กระเบบเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบ<br>หญ้ากรองน้ำเสีย ดันกกกลม (ก.) และหญ้าแฝก (ข.)                                                                                | 64   |
| 44     | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกกกลม ระหว่างกระเบบที่ใช้ถ้ำลอย<br>ลิกไนต์ผสมดินปลูกพีช กับกระเบบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ<br>เทียม การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดชีโอดี (ข.)   | 65   |
| 45     | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของหญ้าแฝก ระหว่างกระเบบที่ใช้ถ้ำลอย<br>ลิกไนต์ผสมดินปลูกพีช กับกระเบบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ<br>เทียม การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดชีโอดี (ข.) | 66   |
| 46     | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกกกลม ระหว่างกระเบบที่ใช้ถ้ำลอย<br>ลิกไนต์ผสมดินปลูกพีช กับกระเบบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบหญ้ากรอง<br>น้ำเสีย การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดชีโอดี (ข.)       | 68   |
| 47     | เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของหญ้าแฝก ระหว่างกระเบบที่ใช้ถ้ำลอย<br>ลิกไนต์ผสมดินปลูกพีช กับกระเบบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบหญ้ากรอง<br>น้ำเสีย การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดชีโอดี (ข.)     | 69   |
| 48     | การทดลองชุดควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.)<br>และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)                                                                                                | 71   |
| 49     | การทดลองชุดควบคุม โดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.)<br>และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)                                                                                                | 72   |

การบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ  
ด้วยการดูดซับของถ่านลอยลิกไนต์ ร่วมกับเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

Wastewater Treatment from Primary Clarifier Pond of Pulp and Paper Industry  
by Lignite Fly Ash Adsorption in Combination with Filtrated Lysimeter  
Technique

คำนำ

การพัฒนาประเทศในปัจจุบันทำให้อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเกิดการขยายตัวในขณะเดียวกัน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษก็มีปริมาณเพิ่มขึ้น เป็นปัญหามลพิษทางน้ำที่สำคัญ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการแช่และล้างชิ้นไม้สับ การต้มเยื่อ การฟอกเยื่อ การย้อมสีและการทำแผ่น เป็นต้น โดยน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะมีสีน้ำตาลเข้ม โดยโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจะมีการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ซึ่งสามารถบำบัดความสกปรกของน้ำเสียได้ แต่อาจไม่เพียงพอในเรื่องของสีและค่าซีโอดีที่ยังคงมีปริมาณสูง และเมื่อปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลด้านลบต่อสิ่งแวดล้อมและจิตวิทยาของชุมชนใกล้เคียงพื้นที่โรงงานได้

เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบพืชกรองน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยการปลูกพืชน้ำ 3 ชนิด คือ กกกลม ฐปฤย และหญ้าแฝกอินโดนีเซีย ร่วมกับการประยุกต์ใช้ตัวดูดซับบำบัดน้ำเสีย สามารถลดค่าซีโอดีและสีของน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษได้ ดังนั้นเราสามารถนำถ่านลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยถ่านลอยลิกไนต์ของโรงงานผลิตกระดาษ SCG Paper มีปริมาณมากถึง 49,000 ตัน/ปี ซึ่งในแต่ละปีถ่านลอยลิกไนต์เหล่านี้ จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการฝังกลบถมที่ดิน หรือการนำไปขายเป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งยังมีถ่านลอยลิกไนต์อีกปริมาณมากที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์จากเหตุผลข้างต้นระบบบำบัดน้ำเสียทั้งสองระบบ มีความเป็นไปได้ที่จะบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาระบบดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการใช้เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบ-

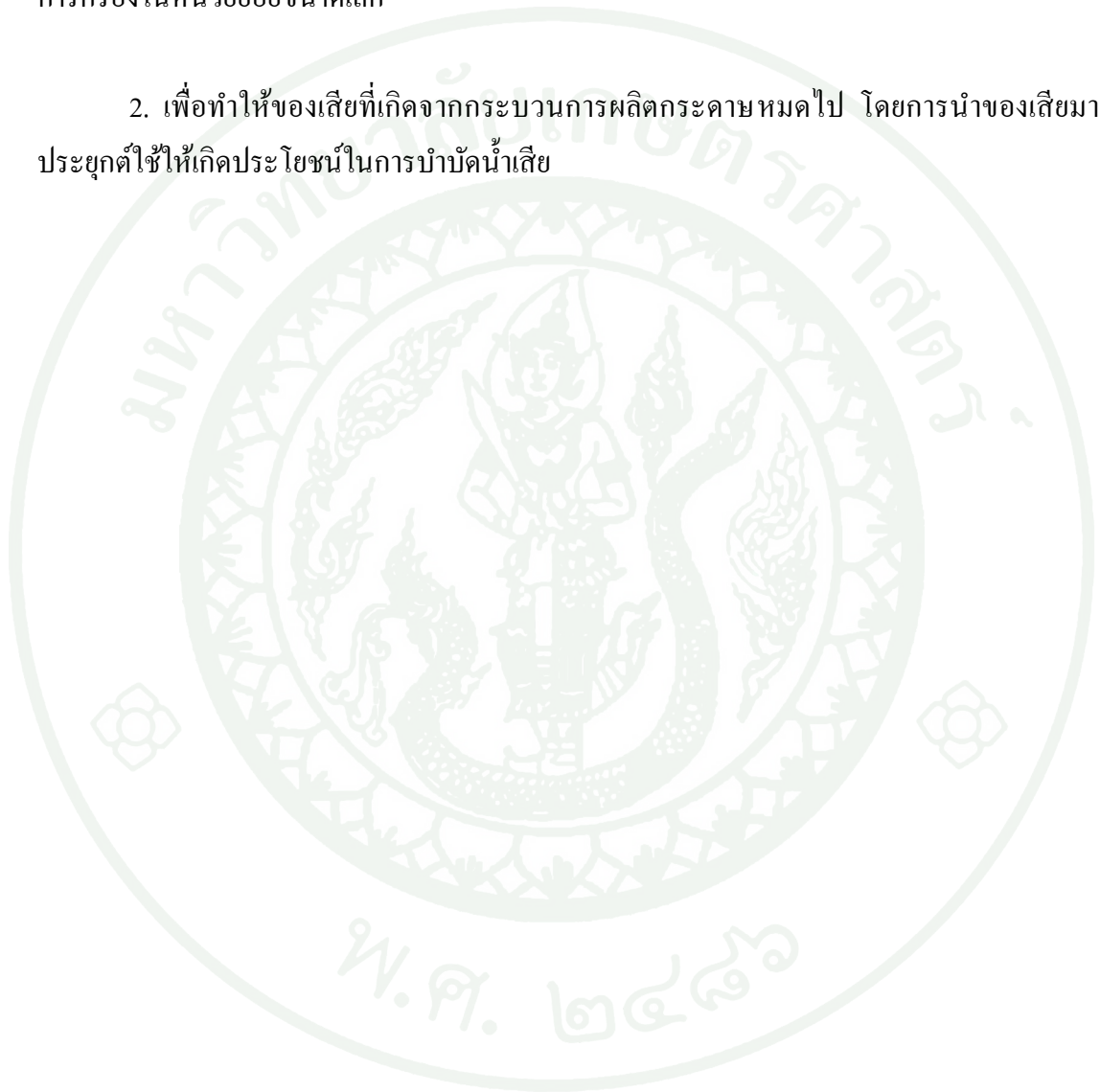


หญ้ากรองน้ำเสีย ร่วมกับการใช้ถ้ำลอยลึกในดักที่มีปริมาณมากมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษ โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อมุ่งการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพสามารถลดค่าซีไอดีและสีของน้ำเสียโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษ และทำให้ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษหมดไป



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้น โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ ร่วมกับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหญ้ากรองน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก
2. เพื่อทำให้ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษหมดไป โดยการนำของเสียมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย



## การตรวจเอกสาร

### 1. กระบวนการผลิตกระดาษ

กระบวนการผลิตกระดาษแต่ละประเภทแม้จะต่างกันที่ชนิดและสัดส่วนของเยื่อแต่ละประเภท รวมถึงสารเคมีเติมแต่งต่างๆ แต่โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตกระดาษทุกประเภทจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักที่เหมือนกัน คือ

#### 1.1 การเตรียมน้ำเยื่อ

1.1.1 การตีเยื่อกระดาษ (Defibering) การผลิตกระดาษเริ่มจากการนำเยื่อแห้ง (ความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 5-50) หรือเศษกระดาษมาตีผสมกับน้ำในถังตีเยื่อ (Hydrapulper) ดังภาพที่ 1 โดยเยื่อจะถูกใบกวนกั้นถึงตีจนเส้นใยกระจายตัว และมีอุปกรณ์ช่วยกำจัดเศษเชือกพลาสติก ลวดออกจากเยื่อ



ภาพที่ 1 การเติมน้ำลงในถังกวน

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.1.2 การบดเยื่อ (Refining) เยื่อที่ผ่านการตีจนเส้นใยกระจายตัวดีแล้วจะผ่านการบดด้วยเครื่องบดเยื่อ (Refiner) ดังภาพที่ 2 ให้แตกตัวออกมาเป็นเส้นใยย่อยๆ จนมีสมบัติเหมาะสมกับการผลิตกระดาษ โดยเยื่อจะเสียดสีกับ Refiner Plate ทำให้เยื่อมีขนาดเล็กลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เส้นใย

อุ้มน้ำได้ดีขึ้น และเกิดพันธะระหว่างกันได้ง่ายขึ้น มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใย (Tensile Strength) สูงขึ้น



ภาพที่ 2 เครื่องบดเชื้อ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.1.3 การผสมเชื้อ (Propotioning) การผลิตกระดาษใช้วัตถุดิบหลายประเภททั้งเชื้อใหม่ที่เป็นเยื่อใยยาว เยื่อใยสั้น เชื้อจากเศษกระดาษ และเชื้อจากน้ำไต้ตะแกรงลวดเดินแผ่น ขั้นตอนนี้เป็น การนำเชื้อตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันในถังผสม (Mixing Chest) และเติมสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษ เมื่อการผสมเสร็จสิ้น น้ำเชื้อจะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 3-3.5 ซึ่งมีคุณสมบัติพร้อมที่จะนำไปทำแผ่นต่อไป

1.1.4 การทำความสะอาดเชื้อ (Stock Cleaning) ในขั้นนี้เชื้อจะถูกเหวี่ยงในภาชนะทรงกรวยเรียกว่า Centrifugal Cleaner ส่วนที่เบา เช่น เส้นใยและสารเคมีที่เติมลงไป (Filler) จะลอยขึ้นสู่ด้านบน ส่วนที่หนักซึ่งเป็นสิ่งเจือปน เช่น กรวด และทราย จะตกลงมาข้างล่างและถูกแยกออกไป หรือการทำความสะอาดอีกแบบหนึ่ง คือ บี้เชื้อผ่านตะแกรงกรองเพื่อแยกสิ่งแปลกปลอมออกก่อน เรียกว่า Pressure Screen จากนั้นบี้เชื้อสะอาดขึ้นสู่ Head Box ต่อไป

1.1.5 การกำจัดหมึก (Deinking) ในกรณีที่มีการนำเศษกระดาษเก่าที่มีการพิมพ์มาใช้เป็นวัตถุดิบจะต้องผ่านกระบวนการกำจัดหมึก หลังจากทำความสะอาดเชื้อในขั้นแรกแล้ว ซึ่งการกำจัดหมึกจะเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาให้หมึกแยกตัวออกมาจากเยื่อกระดาษ สารเคมีที่ใช้กำจัดหมึก ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลเฟต ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สบู่หรือกรดไขมัน และ

Chelating Agent การกำจัดหมึกมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มความขาวสว่างให้กับเยื่อกระดาษ และกำจัดกาวหรือยางสนที่เจือปนอยู่ในเศษกระดาษ

## 1.2 การทำแผ่นกระดาษ

1.2.1 การทำแผ่นกระดาษจากน้ำเยื่อ หลังจากเตรียมน้ำเยื่อเรียบร้อยแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งไปยังถังจ่ายเยื่อ ซึ่งทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น เพื่อให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษ

1.2.2 การรีดน้ำออกจากแผ่นกระดาษเปียก (Sheet Pressing) หลังจากที่ย่อยประสานตัวกันเป็นแผ่นเปียกในช่วงทำแผ่นแล้ว จะผ่านการรีดน้ำออกโดยลูกกลิ้งรีดน้ำ ดังภาพที่ 3 โดยน้ำส่วนหนึ่งจะถูกผ้าสักหลาด ของชุดรีดน้ำซับไว้ และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านรูลมดูดสูญญากาศของลูกกลิ้งลูกล่างซึ่งมีรูพรุนตลอดทั้งลูก ทำให้กระดาษที่ผ่านการรีดน้ำออกแห้งลง ชุดลูกกลิ้งรีดน้ำอาจมี 2-4 ชุด ตามความเหมาะสม



ภาพที่ 3 ชุดรีดน้ำ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.2.3 การอบแห้งกระดาษ (Sheet Drying) แผ่นกระดาษที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้ว จะมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 50 จะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้แห้งด้วยชุดลูกอบ ดังภาพที่ 4 เพื่อให้เหลือความชื้นในแผ่นกระดาษร้อยละ 5-10 โดยจะจ่ายไอน้ำอ้อมตัวความดันต่ำเข้าไปในลูกอบเพื่อให้ผิวลูกอบร้อนขึ้นสำหรับทำให้แผ่นกระดาษแห้ง





ภาพที่ 4 ชุดลูกอบแบบ Multi Dryer

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.2.4 การฉาบผิวกระดาษ (Size-Pressing) กระดาษที่ผ่านส่วนอบแห้งชุดแรกจะถูกฉาบด้วยน้ำแป้งต้มสุกทั้ง 2 ข้าง ทำให้ผิวกระดาษแข็งแรงขึ้นและทำให้กระดาษมีความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น เพราะน้ำแป้งจะไปอุดรูที่ผิวกระดาษ ถัดจากเครื่องฉาบผิวจะเป็นส่วนให้ความร้อนแบบลมร้อน และส่วนอบแห้งชุดหลังเพื่อให้กระดาษแห้ง อาจมีการเติมสารเติมบางอย่างลงในน้ำแป้งด้วย เช่น สารฟอกขาว เป็นต้น

1.2.5 การเคลือบผิวกระดาษ (Coating) เป็นขั้นตอนการเคลือบผิวกระดาษด้วยตัวเติมเพื่อช่วยให้กระดาษมีผิวหน้าที่เรียบขึ้นทำให้สภาพพิมพ์ได้ของกระดาษดีขึ้น กระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวมีชื่อเรียกว่า “กระดาษเคลือบผิว” (Coated paper) ซึ่งการเคลือบผิวอาจเป็นแบบ “เคลือบด้านเดียว” หรือ “เคลือบสองด้าน” ของกระดาษและอาจ “เคลือบด้าน” หรือ “เคลือบมัน” ใดๆก็ได้

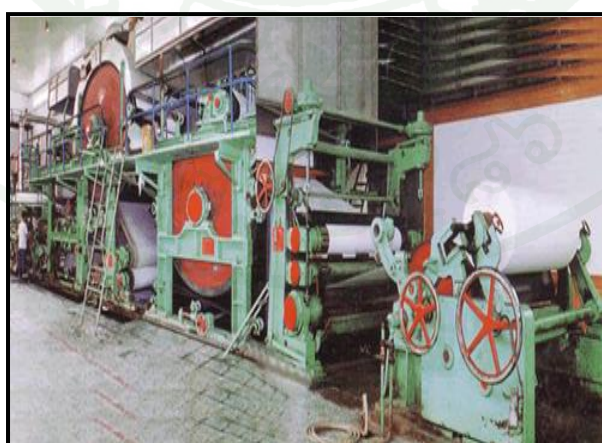
1.2.6 การขัดผิวหน้ากระดาษ (Calendering) กระดาษพิมพ์เขียนซึ่งต้องการความเรียบของผิวหน้า จะต้องผ่านเครื่องขัด ดังภาพที่ 5 เพื่อขัดผิวหน้าให้เรียบขึ้นและมีความหนาสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น



ภาพที่ 5 เครื่องตัดผิวหน้ากระดาษ

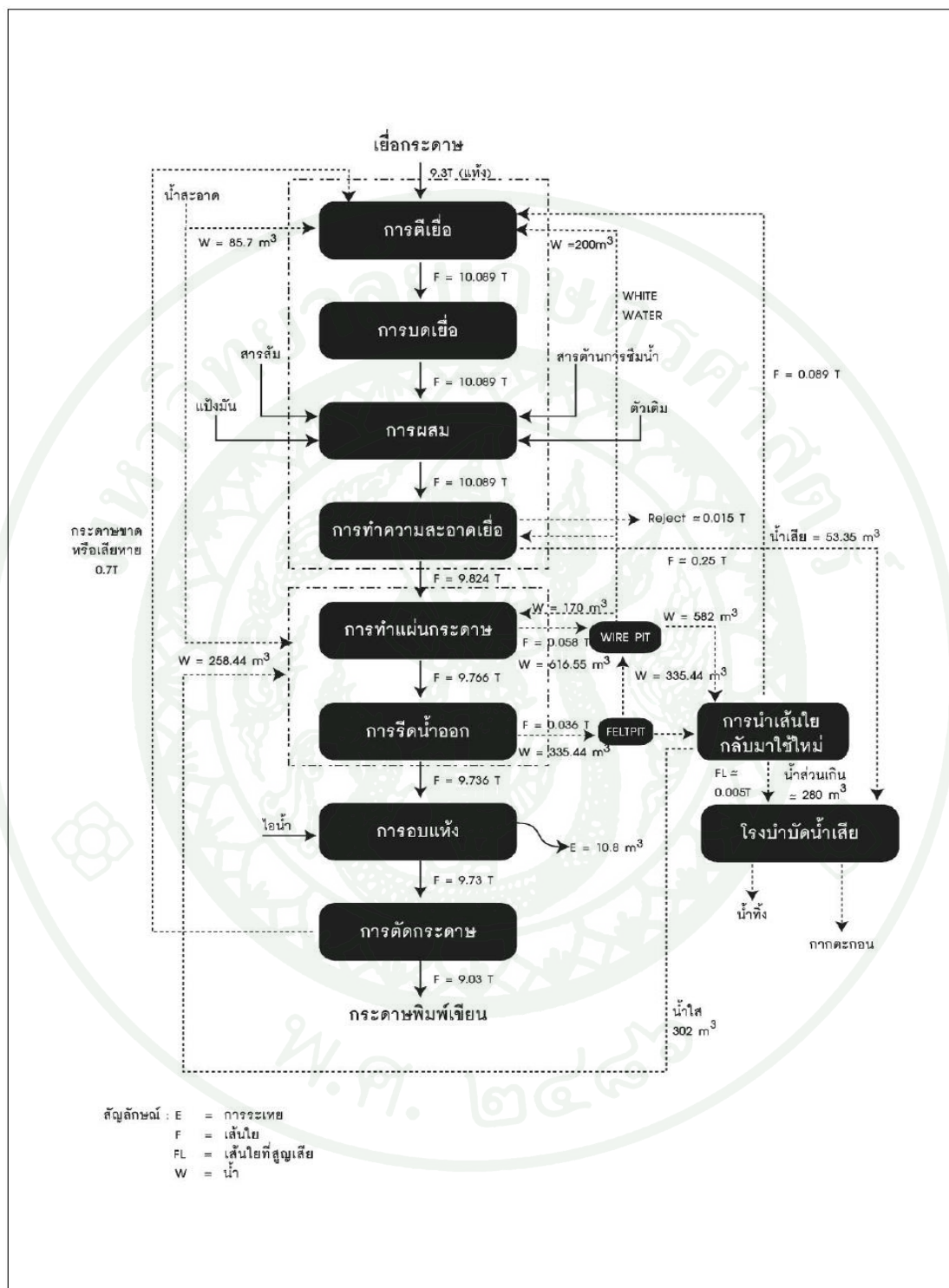
ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.2.7 การเข้าม้วนกระดาษและการตัดกระดาษตามขนาดมาตรฐาน ในขั้นนี้จะนำกระดาษมาเข้าม้วนเพื่อรอส่งต่อไปเพื่อทำผลิตภัณฑ์หรือจำหน่าย และบางส่วนจะมีการตัดเป็นแผ่นตามขนาดที่ต้องการ ดังภาพที่ 6 ซึ่งแผ่นกระดาษจะผ่านเครื่องตัดให้มีขนาดตามมาตรฐานให้เหมาะสำหรับการใช้งานพิมพ์เขียน ซึ่งส่วนใหญ่นิยมขนาด 24x35 นิ้ว, 25x36 นิ้ว และ 31x43 นิ้ว ส่วนกระดาษที่นิยมใช้กับเครื่องถ่ายเอกสารคือขนาด A4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)



ภาพที่ 6 เครื่องทำแผ่นกระดาษแบบ Cylinder

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)



ภาพที่ 7 กระบวนการผลิตกระดาด

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

## 2. มลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษ

### 2.1 น้ำเสีย

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก พารามิเตอร์คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าปริมาณสารที่ละลายได้ และค่าปริมาณสารแขวนลอย คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของกำลังการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต และคุณภาพของกระดาษผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในบางส่วนของกระบวนการผลิตตามความสะอาดของน้ำเสีย น้ำเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จะต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ ของโรงงานขนาดกลาง

| ชนิดของโรงงาน        | ปริมาณน้ำเสีย<br>(ลบ.ม./ตัน) | คุณสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร) |                    |                    |                     |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|                      |                              | บีโอดี                               | ซีโอดี             | ของแข็ง<br>แขวนลอย | ของแข็ง<br>ละลายน้ำ |
| โรงงานผลิตกระดาษ     |                              |                                      |                    |                    |                     |
| หนังสือพิมพ์         | 34.54                        | $0.8 \times 10^3$                    | $3.0 \times 10^3$  | $3.5 \times 10^3$  | $2.7 \times 10^3$   |
| โรงงานผลิตกระดาษ     |                              |                                      |                    |                    |                     |
| คราฟท์               | 17.00                        | $0.76 \times 10^3$                   | $1.27 \times 10^3$ | $0.16 \times 10^3$ | $3.07 \times 10^3$  |
| โรงงานผลิตกระดาษแข็ง | 29.40                        | $0.51 \times 10^3$                   | $1.04 \times 10^3$ | 0.825              | $2.19 \times 10^3$  |
| โรงงานผลิตกระดาษ     |                              |                                      |                    |                    |                     |
| อนามัย               | 42.40                        | $0.63 \times 10^3$                   | $2.6 \times 10^3$  | $2.4 \times 10^3$  | $2.4 \times 10^3$   |

ที่มา: สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)



## 2.2 สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เกิดจากลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินและโพลีเมอร์ของแทนนิน ซึ่งลิกนินเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารในองค์ประกอบหลักของพืชทุกชนิด โดยลิกนินพบมากในผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืช หน้าที่ทางกายภาพของสารประกอบลิกนินเป็นสารสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของเนื้อไม้ โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของลิกนินในพืชนานาชนิด (อัมไพวรรณ, 2550)

## 2.3 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD)

การวิเคราะห์หาค่าของ COD ใช้สำหรับประมาณปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป โดยที่สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์โดยปริมาณที่มากเกินพอของสารเคมีประเภทออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ในสภาพของความเข้มข้นสูง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Silver Sulfate โดยทั่วไปแล้วค่าของ COD จะมีค่ามากกว่าค่าของ  $BOD_5$  เสมอและใช้เวลาในการหาประมาณ 3 ชม. ซึ่งรวดเร็วกว่าการหาค่า  $BOD$  และปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางชีวภาพ หรือกล่าวได้ว่า 20 ปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในเทอมของ COD เป็นการวัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทั้งที่ย่อยสลายได้ ย่อยสลายได้ช้า และย่อยสลายไม่ได้ด้วยจุลินทรีย์) เช่น กลูโคส ลิกนิน และเซลลูโลส น้ำมัน ไขมันจากเนย พืชและสัตว์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังมีสารอนินทรีย์อื่น ๆ เช่น เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ), แมงกานีส(II)ไอออน ( $Mn^{2+}$ ), คลอไรด์ไอออน ( $Cl^-$ ), ซัลไฟด์ไอออน ( $S^{2-}$ ) สารประกอบในรูปคอลลอยด์ที่แขวนลอยและสารละลายในน้ำเสียของสารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ  $K_2Cr_2O_7$  ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในขณะที่  $BOD$  เป็นการวัดสารอินทรีย์เฉพาะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เท่านั้น การที่ค่า COD สูงกว่า  $BOD$  เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยไม่ต้องอาศัยการดูดซึมทางชีวโดยจุลินทรีย์ เช่น เซลลูโลส และลิกนิน จะถูกออกซิไดส์อย่างแรง และถ้ามีสารที่ไม่สามารถถูกย่อยทางชีวอยู่ด้วย เช่น เซลลูโลส จะทำให้ค่า COD ยิ่งสูงกว่าค่า  $BOD$  มากขึ้น (พรัตน์, 2547)



## 2.4 มลพิษและของเสียต่างๆ

2.4.1 น้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษจะเกิดในขั้นตอนการทำความสะอาดเยื่อ และการบีบน้ำออกจากด้วยชุดลูกกลิ้ง

2.4.2 มลพิษอากาศจะเกิดการฟุ้งกระจายของฝุ่นและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำ (กรณีใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง)

2.4.3 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมกระดาษ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ ของเสียจากกระบวนการเฉพาะ และของเสียจากกระบวนการสนับสนุน ซึ่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วทั้งสองกลุ่มมีวิธีการจัดการที่แตกต่างกันไปตามประเภทของของเสียที่เป็นอันตรายหรือไม่เป็นอันตราย

1) ของเสียจากกระบวนการเฉพาะ เป็นกากของเสียที่เกิดขึ้นเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ เช่น กากตะกอนจากขั้นตอนการกำจัดหมึกพิมพ์ ส่วนที่เหลือทิ้งจากการแยกเยื่อจากเศษกระดาษและเศษกระดาษแข็ง เศษเส้นใย กากตะกอนเส้นใย สารเพิ่มเนื้อและสารเคลือบผิวจากการแยกเชิงกล และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

2) ของเสียจากกระบวนการสนับสนุน คือ ของเสียทั่วไป ส่วนใหญ่แล้วสามารถเกิดขึ้นได้จากโรงงานทุกประเภท เช่น ภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ใช้แล้ว ผ้าหรือวัสดุปนเปื้อน น้ำมันใช้แล้ว เป็นต้น โดยสรุปมลพิษและของเสียต่างๆ ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษแสดงในตารางที่ 2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

ตารางที่ 2 สรุปมลพิษและของเสียต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดาษ

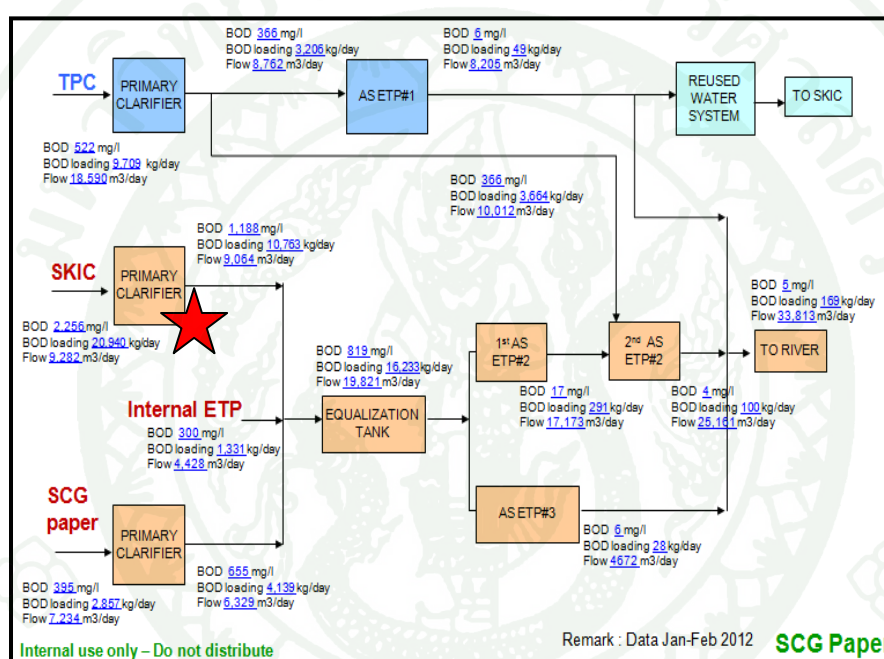
| มลพิษ                                                       | จุดที่เกิด                              | ลักษณะ                                                                                  | ปริมาณ                                             | อัตราการเกิดต่อตัน<br>ผลผลิต       |                     |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
|                                                             |                                         |                                                                                         |                                                    |                                    |                     |
| 1. มลพิษน้ำ                                                 |                                         |                                                                                         | ประเภทกระดาษ                                       | ม <sup>3</sup> /วัน                | ม <sup>3</sup> /ตัน |
| 1.1 การทำความสะอาด<br>สะอาดเยื่อ                            | เครื่องจักร<br>(Centrifugal<br>Cleaner) | น้ำเสียที่มีสิ่ง<br>ปนเปื้อน เช่น<br>กรวดทราย<br>โฟม ฯลฯ                                | กระดาษพิมพ์<br>เขียน<br>กระดาษแข็ง<br>กระดาษกราฟท์ | 200<br>1,250-1,500<br>1,200-10,000 | 7<br>20-31<br>5-60  |
| 1.2 กระบวนการ<br>บีบเอาน้ำออก<br>จากแผ่นด้วยชุด<br>ลูกกลิ้ง | ชุดลูกกลิ้ง<br>รีดน้ำ                   | น้ำเสียที่มีการ<br>ปนเปื้อนของ<br>เส้นใย                                                | -                                                  | -                                  | -                   |
| 2. มลพิษอากาศ                                               |                                         |                                                                                         | ประเภทกระดาษ                                       | กก./วัน                            | กก./ตัน             |
| 2.1 ลานเก็บ<br>เชื้อเพลิง                                   | ลานเก็บ<br>เชื้อเพลิง                   | การฟุ้ง<br>กระจายของ<br>ถ่านหินหรือ<br>เชื้อเพลิงที่ใช้<br>ใน<br>กระบวนการ<br>ผลิตไอน้ำ | -                                                  | -                                  | -                   |
| 2.1 กระบวนการ<br>ผลิตไอน้ำ                                  | หม้อน้ำ                                 | มีฝุ่นและก๊าซ<br>ซัลเฟอร์ได-<br>ออกไซด์<br>(SO <sub>2</sub> )                           | กระดาษ<br>หนังสือพิมพ์                             | 80                                 | 0.3                 |

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)



### 3.1 น้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”

ทางบริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด มีหลักการและแนวทางในการปฏิบัติเกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆของบริษัทฯ เช่น ผลกระทบด้านน้ำ ผลกระทบด้านอากาศ ผลกระทบทางเสียงและผลกระทบจากกากของเสีย อันเนื่องมาจากการบวนการผลิต สินค้าและบริการ ตลอดจนการดำเนินการด้านอื่นๆ อาทิ พื้นที่จัดเก็บถ่านหินลิกไนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

หมายเหตุ: ★ คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัด

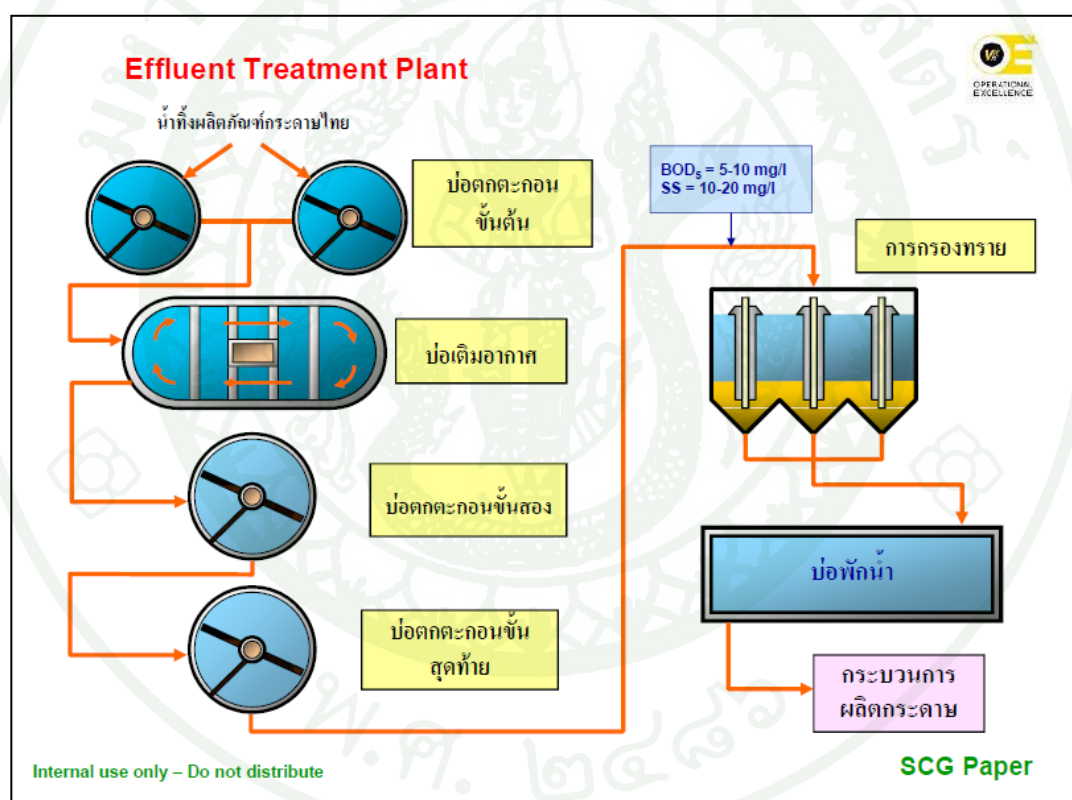
ที่มา: บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556)

3.1.1 วิเคราะห์และประเมิน เพื่อป้องกัน ลดและควบคุมมลพิษ ที่เป็นสาเหตุในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำ อากาศและดินให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ การดำเนินการป้องกัน ลดและควบคุมมลพิษนั้น จะต้องกระทำโดยวิธีที่ปลอดภัยเป็นไปตามกฎหมายและด้วยความรับผิดชอบ หากจำเป็นต้องปล่อยมลสารออกจากโรงงาน จะต้องมีการควบคุมมลภาวะให้ได้ตามเกณฑ์ที่วางไว้ ซึ่งอาจเทียบเท่าหรือดีกว่ามาตรฐานของทางราชการ



3.1.2 มุ่งมั่นในการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า กากของเสียต่างๆและน้ำเสียที่ต้องบำบัด หรือทิ้งนั้น ให้พยายามหาวิธีหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด หรือส่งให้กับอุตสาหกรรมอื่น นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมถึงการใช้พลังงานให้คำนึงถึงการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ทั้งนี้ตั้งแต่การเลือกใช้วัตถุดิบ กระบวนการออกแบบ กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ ตามหลักเทคโนโลยีสะอาด รวมถึงการฟื้นฟู และปรับปรุงทรัพยากรธรรมชาติ เพื่อให้มีระบบนิเวศที่ดี (บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด, 2556)

### 3.2 ระบบบำบัดน้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”



ภาพที่ 10 ระบบบำบัดน้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”

ที่มา: บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556)



#### 4. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อย-

สลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

#### 4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

4.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

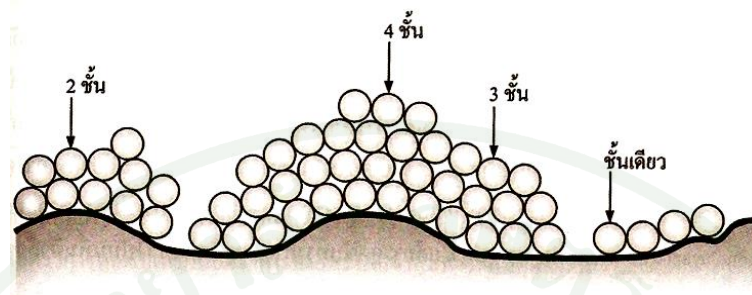
4.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

#### 4.2 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

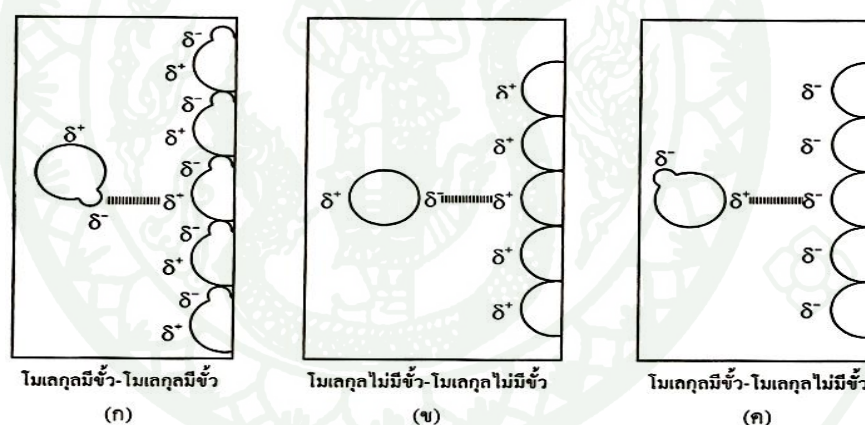
4.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical Adsorption หรือ Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้า และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็น

แรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 12 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่ ม า : นิ พ น ธ์ แ ล ะ ค ณ ิต า ( 2550)

4.2.2 การดูดซับทางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และกนิดา, 2550)

#### 4.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

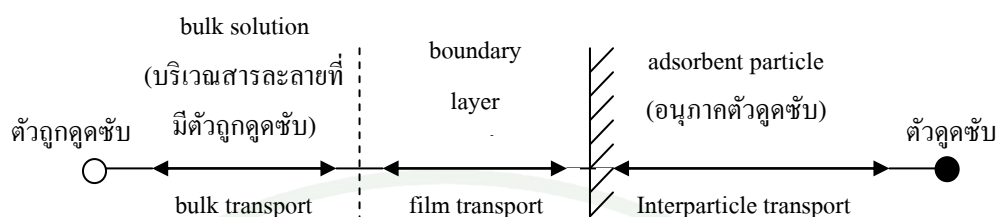
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

4.3.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่พื้นผิวของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

4.3.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

4.3.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน





ภาพที่ 13 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

#### 4.4 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี ในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

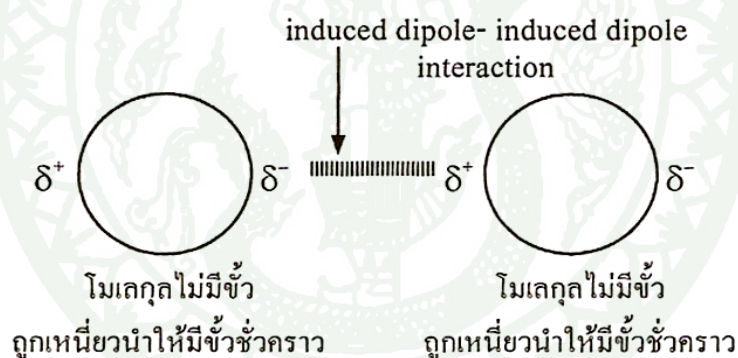
4.4.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุล



มีขั้วชั่วคราว (Induce Dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

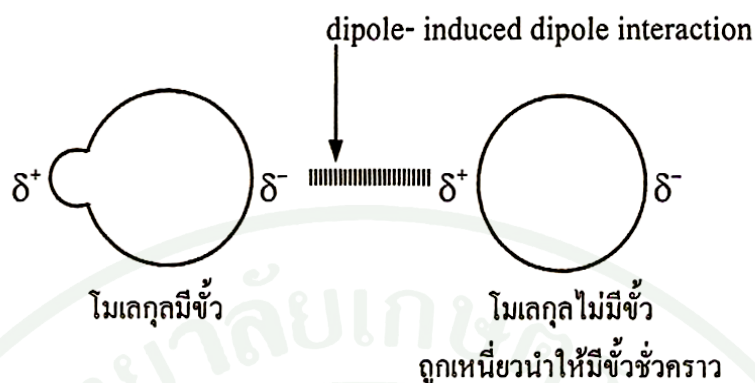
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นไปด้วย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



ภาพที่ 14 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

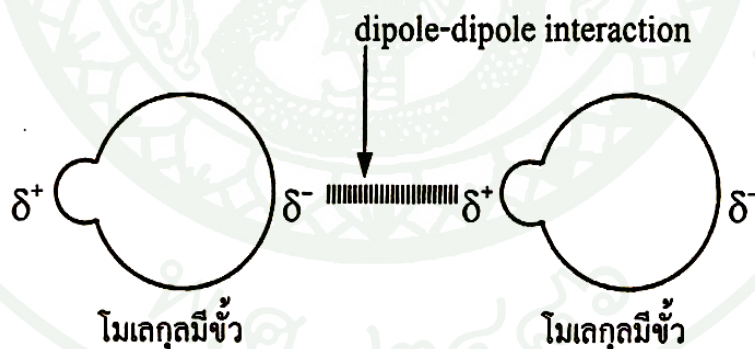
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 15 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล



ภาพที่ 16 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่มีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่

มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน

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

4.4.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ จึงไม่เกิดการคาย

#### 4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.5.1 ความดัน ความดัน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความดันสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

4.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น

คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

4.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

4.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

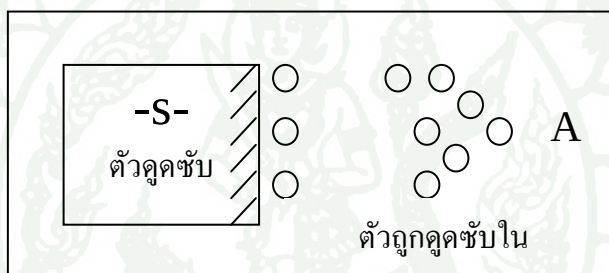
4.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

4.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

4.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

#### 4.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

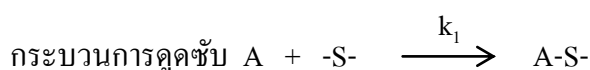
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมลต่อลิตรในการละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

$q$  เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1 - q)$  เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ





$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ  $C$  และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

เมื่อ  $q$  เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม หรือ โมลต่อกรัม

$W$  เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัม หรือ กิโลกรัม

$V$  เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

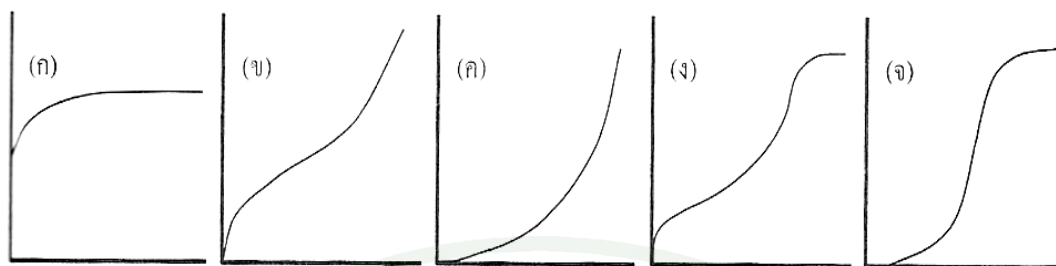
$C_i$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลาร์

$C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลาร์

#### 4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 18 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

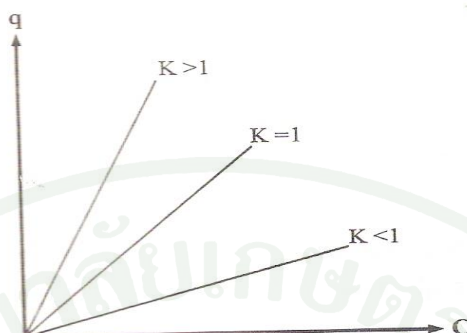
4.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และ  $C$

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

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำดังภาพที่ 19

150



ภาพที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

$K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

4.7.2 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

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

$K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป  $1/n$  จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

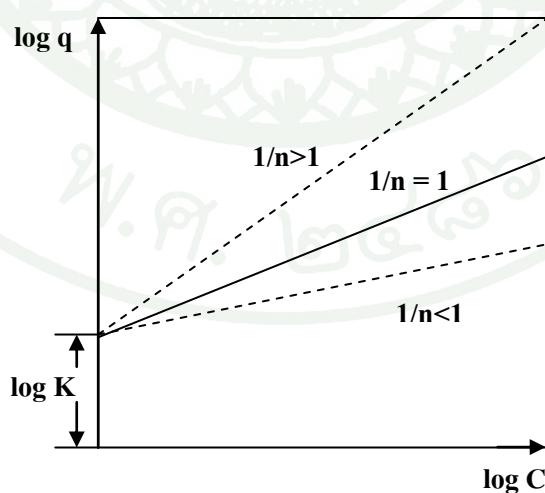
เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$  คือ ความชันของกราฟ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K$  ดังภาพที่ 20



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

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

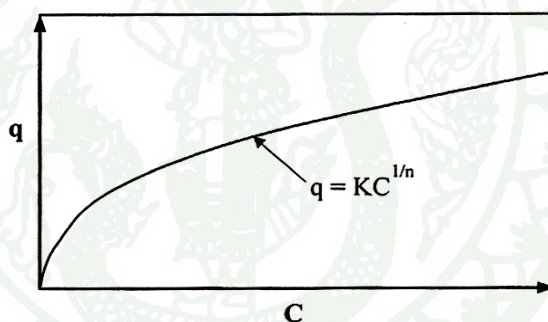


ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

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

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

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

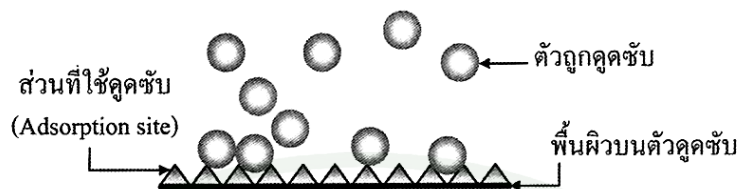


ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

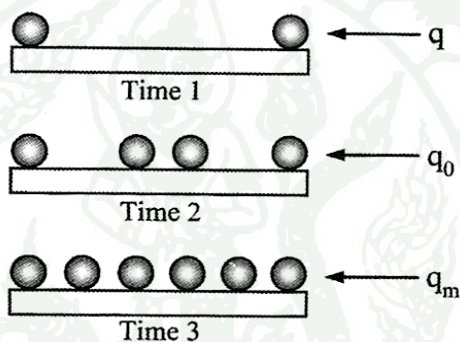
4.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูก

ปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 23 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

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

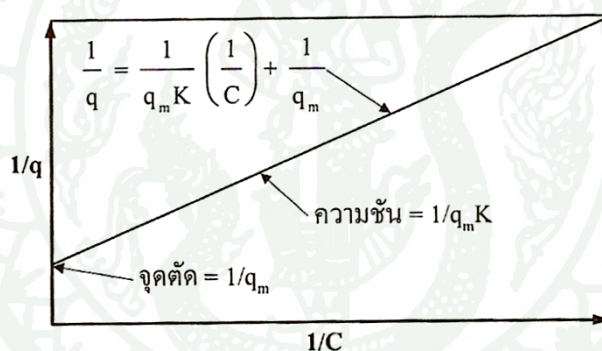
$q_m$  คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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

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



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

4.7.4 สมการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

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

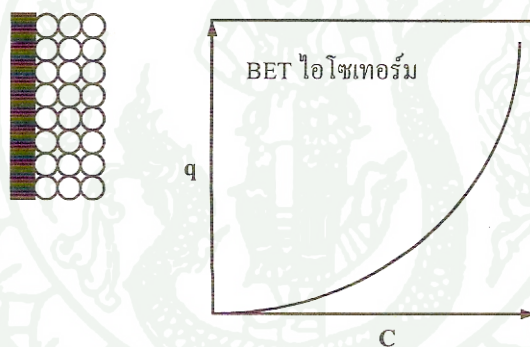
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตส์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง  $q$  กับ  $C$  เป็นดังนี้



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบต

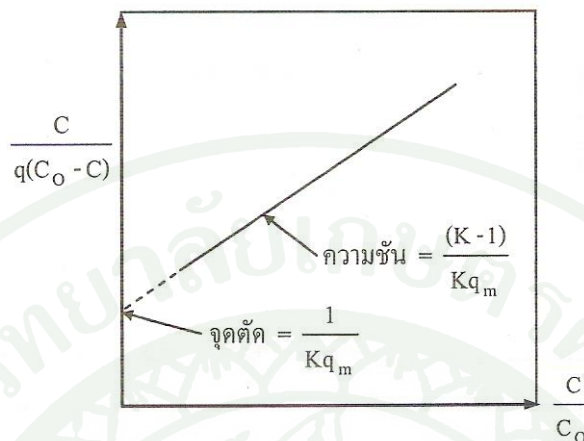
ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $\frac{C}{q(C_0 - C)}$  กับ ค่า  $\frac{C}{C_0}$  จะได้กราฟเส้นตรงมี

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



ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

## 5. ถ้ำลอยลิกไนต์

### 5.1 สภาพของถ้ำลอยลิกไนต์

ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด โดยถ้ำลิกไนต์จะมี 2 สภาพ คือ

5.1.1 ถ้ำหนัก (Bottom Ash หรือ Wet Ash) เป็นถ้ำที่ได้จากการปะทะของอนุภาคถ้ำในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมถ้ำที่จะปะทะกันเป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของถ้ำปะทะกับผนังเตาและหลอมติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

5.1.2 ถ้ำลอย (Fly Ash ,Pulverized Fuel Ash หรือ Dry Ash) เป็นถ้ำที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ถ้ำจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดไปสู่ปล่องควัน และถูกจับไว้



ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บจี๊เข้าปริมาณของเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านลิกไนต์จะมีประมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักถ่านหินที่เผา (วิจิตอำจนา, 2536)

## 5.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

จากการส่งตัวอย่างของเถ้าลอยลิกไนต์ไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่าในเถ้าลอยลิกไนต์ประกอบด้วย ซิลิกอนออกไซด์ร้อยละ 40.89 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 14.54 โดยน้ำหนัก อะลูมินัมออกไซด์ร้อยละ 10.33 โดยน้ำหนัก และองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

| องค์ประกอบทางเคมี              | เถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ) |
|--------------------------------|-------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40.89                   |
| CaO                            | 14.54                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10.33                   |
| 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> | 18.79                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.57                    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.48                    |
| LOI                            | 0.35                    |

หมายเหตุ LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: วรวิทย์ และคณะ (2553)

### 5.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

โครงสร้างทางกายภาพเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้จะสันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศร่อนไปได้ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงมีทรงกลม เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุน ที่ผิวอาจมีปริมาณของคาร์บอนสูง อนุภาคของเถ้าถ่านหินมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน เถ้าถ่านหินประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างใน เรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Chemosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหินกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในโพรงเรียกว่า พลีโอสเฟีย (Plerosphere) เถ้าถ่านหินกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน ความกลวงทำให้ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินต่ำกว่าปกติ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินแม่เกาะอยู่ที่ 2.0-2.2 องค์กรประกอบทางเคมี เถ้าถ่านหินมีองค์ประกอบหลักทางเคมีเป็นออกไซด์ของ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ), อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) อัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน, อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ Class C และ Class F โดยที่เถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวน้อยกว่าร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักโดยส่วนใหญ่แล้วถ่านหินซับบิทูมินัส และถ่านหินลิกไนต์ เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class C เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ และบิทูมินัส เมื่อเผาแล้วจะให้เถ้าถ่านหิน Class F เป็นส่วนใหญ่ ดังภาพที่ 27



Class C



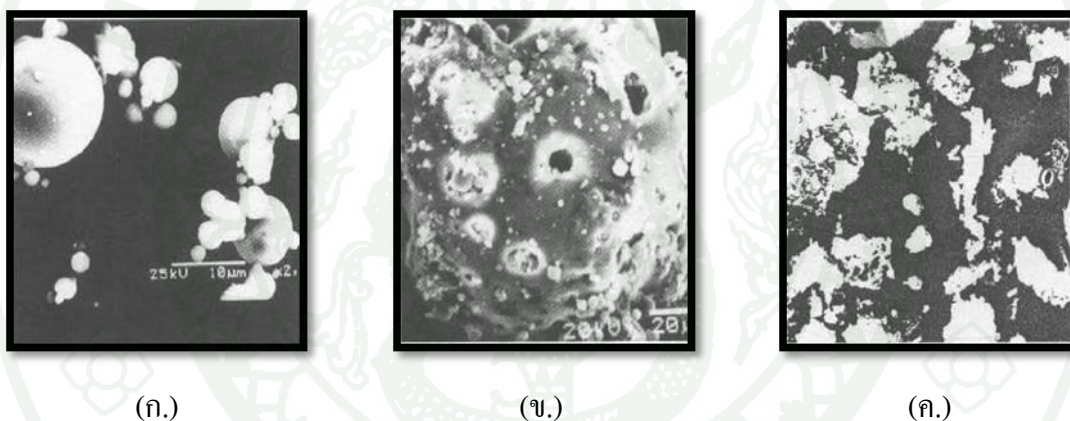
Class F

ภาพที่ 27 การแบ่งประเภทของเถ้าลอย

ที่มา: ชีรวัดน์ (2554)

#### 5.4 ลักษณะรูปร่างของเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย

รูปร่างของเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 0.15 ไมโครเมตร ซึ่งจะพบว่าเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน ดังภาพที่ 2 เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่อาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน เรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำได้ ดังภาพที่ 3 และเถ้าถ่านหินอีกลักษณะหนึ่งคือ เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างเหลี่ยมและพรุน ส่วนใหญ่นำไปผสมเพื่อทำคอนกรีต และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินชนิดนี้ต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นซึ่งทำให้กำลังของคอนกรีตตกลงได้ (ชีรวัดน์, 2554) ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ลักษณะโครงสร้างของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าถ่านหินรูปร่างกลม (ก.) เถ้าถ่านหินกลวง (ข.) เถ้าถ่านหินรูปร่างพรุน (ค.)

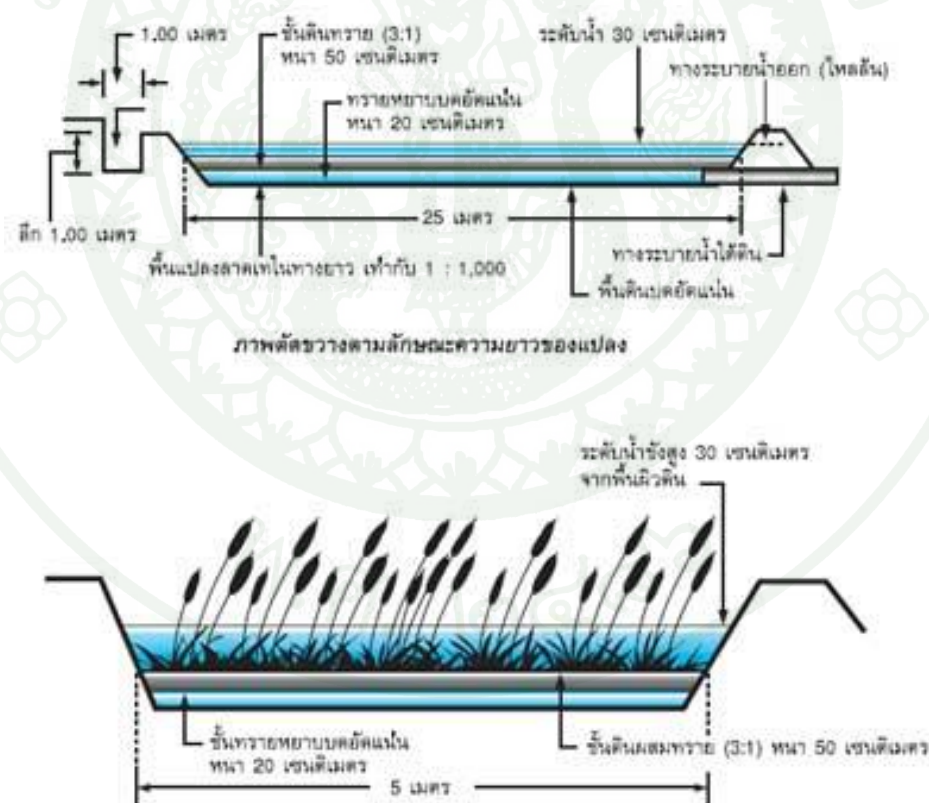
ที่มา: ชีรวัดน์ (2554)

## 6. เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติ

### 6.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

รูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (LERD) ที่ศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้น

ได้ยึดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและ/หรือทำบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่รวบรวมได้จากชุมชน และปลูกพืชน้ำที่ผ่านการคัดเลือกแล้วว่าเหมาะสมที่สุด 2 ชนิด คือ กกกลม(กกจันทบูรณ์) และธูปฤๅษี ช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และระยะเวลาการกักพักเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะการให้น้ำเสีย หรือระบายน้ำเสีย 2 ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ในระดับหนึ่ง และมีการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง (ระบบเปิด) น้ำเสียใหม่เข้าไปคั่นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบให้ไหลเส้นทางระบายน้ำ และ/หรือทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีระยะเวลาในการกักพักน้ำเสีย 1 วัน เมื่ออายุของพืชครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดพืชนั้นออกเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับพืชได้ พืชที่ตัดออกเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นผลพลอยได้อีกอย่างอื่นต่อไปด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบโดยสังเขปของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)



## 6.2 การบำบัดด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

รูปแบบเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้น ชีดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและ/หรือบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่ได้จากชุมชน และปลูกหญ้าอาหารสัตว์ที่ผ่านการคัดเลือกว่าเหมาะสม 3 ชนิด คือ หญ้าสตาร์ หญ้าคาลา และหญ้าโคสกรองสช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการกรองน้ำเสียขณะที่ไหลผ่านแปลง หญ้าและการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย และการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ในดิน เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจะมีลักษณะการให้น้ำเสียหรือระบายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ 5 วัน และปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง 2 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์ในดินมีโอกาสดักจับตัว และระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบโดยปล่อยระบายน้ำทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เมื่ออายุของหญ้าครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดหญ้านั้นออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับระบบ หญ้าที่ตัดออกเหล่านี้สามารถนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ ซึ่งรูปแบบโดยสังเขปของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย และลักษณะพืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2543) ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย



ที่มา: มุลนิธิชัยพัฒนา (2543)

## 7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ

ต่อพงศ์ (2544) ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแอ็คติเวเต็ดคาร์บอน 3 ชนิด คือ ไม้ยางพารา, กะลามะพร้าวจากบริษัทคาร์โบกาญจน์จำกัด และถ่านลอยจากปล่องโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 สารดูดซับทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสแล้วเก็บในโถสุญญากาศ ก่อนนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย TOC (Total Organic Carbon) และ COD (Chemical Oxygen Demand) จากโรงงานเยื่อและกระดาษภายหลังการบำบัดน้ำเสียขั้นตอนที่สองด้วยระบบตะกอนเร่ง พบว่าแอ็คติเวเต็ดคาร์บอนจากไม้ยางพาราและกะลามะพร้าวมีการดูดซับที่ดีกว่าถ่านลอยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนสูง

นนทพงษ์ (2548) ศึกษาถึงการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการโอโซนเนชันโดยใช้น้ำเสียก่อนและหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียชนิดระบบตะกอนเร่ง พบว่า ที่อุณหภูมิห้องน้ำเสียภายหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชันที่สภาวะเหมาะสม คือ pH เท่ากับ  $7.5 \pm 0.5$  อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9.0 กรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาการสัมผัสโอโซน 30.0 นาที สามารถลดปริมาณสีในหน่วย Pt - Co และหน่วย ADMI ได้เท่ากับร้อยละ 91.54 และ 95.46 ตามลำดับ และลดปริมาณ COD, BOD และ TOC ได้เท่ากับร้อยละ 62.00, 27.26 และ 37.98 ตามลำดับ สามารถสลายโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกได้แต่ยังคงมีโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกตกค้างอยู่ภายหลังกระบวนการโอโซนเนชันนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพอีกด้วย โดยที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 30.0 นาที อัตราส่วนระหว่าง BOD : COD มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.16 ถึง 0.31 และค่า KT (Rate of Biochemical Oxidation) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.21 ถึง 0.35 ตามวิธีการของ Thomas Slope Method

Nabel *et al.* (1974) ได้ทดลองนำโอโซนมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Effluents) จากโรงงานเยื่อและกระดาษ 4 โรงงาน พบว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้และยังลดค่า COD, BOD และค่าความขุ่นได้

Esposito *et al.* (1991) and Lee *et al.* (1994) รายงานถึงประสิทธิภาพการลดความเข้มข้นของเชื้อราเส้นใยสีขาว (White Rot Fungi) กับน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกขาวเยื่อโดยปราศจากการเติม

ธาตุอาหารมีการคัดเลือก Ligninolytic fungi *Lentinus edodes* และรา KS-62 พบว่าสามารถลดความเข้มข้นได้ร้อยละ 70-80 ภายในระยะเวลา 5-7 วัน โดยปราศจากการเติมธาตุอาหารซึ่งภายในสภาพเดียวกัน *P.chrysosporium* และ *T.versicolor* กำจัดความเข้มข้นได้ร้อยละ 13-29 ตามลำดับ

Wanpen and Anussorn (2002) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยศึกษาการกำจัดสีและ COD โดยใช้โถทดสอบและดินที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ทับถมกันแล้วนำดินที่ได้จากการขุดลงไปที่มีความลึก 1 เมตร นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดรูเปิด 0.075 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยดินเหนียวร้อยละ 18 – 35 โดยน้ำหนัก น้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบภายหลังการบำบัดขึ้นที่สองด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานเยื่อและกระดาษ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ pH เท่ากับ 8 และใช้ดินเหนียว 90 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดสีเท่ากับร้อยละ 46 และลด COD เท่ากับร้อยละ 57

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion Block) พร้อมหลอดย่อยสาร (Digestion Vessels)
- 1.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย DO-Meter, pH-Meter, Turbidity-Meter, Digital TDS-Meter and EC-Meter
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501
- 1.5 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 1.6 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.7 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.8 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman
- 1.9 กระบะปลูก

#### 2. สารเคมี

- 2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate;  $K_2Cr_2O_7$ ) Grade AR
- 2.2 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate (FAS);  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ) Grade AR
- 2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric Acid;  $H_2SO_4$ ) Grade AR
- 2.4 สารละลายอินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferroin) Grade AR
- 2.5 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric Sulfate;  $HgSO_4$ ) Grade AR
- 2.6 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) Grade AR
- 2.7 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline Monohydrate;  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ ) Grade AR
- 2.8 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) Grade AR
- 2.9 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (FAS) Grade AR

### 3. แก๊สลอยลิกไนต์

เป็นแก๊สลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด โดยใช้แก๊สลอยลิกไนต์ที่ได้จากเตาเผาเบอร์ 16 ซึ่งเป็นแก๊สลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผา 100 %

### 4. วัสดุปลูก

ได้แก่ ดินนาผสมทราย จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย, กรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด

### 5. พืชที่ใช้ปลูก

ได้แก่ ต้นกกกลม และหญ้าแฝก

### 6. น้ำเสีย

จากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ ที่ผ่านบ่อปรับสภาพเริ่มต้น บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

## วิธีการ

### 1. การเตรียมสารละลาย

#### 1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

อบโพแทสเซียมไดโครเมต ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งอย่างละเอียด 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

#### 1.2 กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์

ชั่งซิลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆ จนซิลเวอร์ซัลเฟต ละลายหมด

#### 1.3 สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

#### 1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

ชั่งเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเสกซะไฮเดรต 39.2 กรัม เติมน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่าไปใช้

## 2. การเตรียมตัวดูดซับ

นำถ่านลอยลิกไนต์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ทิ้งถ่านลอยให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เพื่อไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

## 3. การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์

3.1 ปิเปตสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 และ 20.0 มิลลิกรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตรแต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ ความเข้มข้น 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0 และ 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

3.2 นำสารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ จากข้อ 3.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายสีมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ (แกนนอน)

## 4. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ

นำน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนการตกตะกอนมาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำ ดังต่อไปนี้ พีเอช, สี, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ, การนำไฟฟ้า, ความขุ่น, ความเค็ม, บีโอดีและซีโอดี เป็นต้น ส่วนพารามิเตอร์ที่มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด คือ สีและซีโอดี



4.1 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เจือจางน้ำเสีย 3 เท่าด้วยน้ำกลั่น วัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสง ไปเทียบหาความเข้มข้นของสีจากกราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ ที่เตรียมไว้ได้ในข้อที่ 3

4.2 การวิเคราะห์ค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เจือจางน้ำเสีย 10 เท่าด้วยน้ำกลั่น นำน้ำเสียที่เจือจางแล้ว 2.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ 3.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดย่อยสาร เขย่าและปิดฝา ให้แน่น นำเข้าเครื่องย่อยสลาย 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เทใส่ขวดรูปชมพู่ และกลั่นหลอด ด้วยน้ำกลั่น เติมสารเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียม ซัลเฟต จนถึงจุดยุติจะเห็นสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง คำนวณหาค่าซีโอดี

5. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ และไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการทดลองแบบเบตซ์

#### 5.1 ศึกษาปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่เหมาะสม

ชั่งเถ้าลอยลิกันต์ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ตามวิธีการข้อ 4.1 และวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดี ตามวิธีการข้อ 4.2 และคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดี

#### 5.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม

เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยลิกันต์บำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตรต่อปริมาณเถ้าลอยลิกันต์ที่ศึกษาได้ในข้อ 5.1 ทุกการทดลองแปรผันระยะเวลาดำเนินการเป็นชั่วโมง (1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง) และเป็นวัน (1, 2, 3, 4 และ 5 วัน) ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

#### 5.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนข้อ 5.1 แต่ใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้อ 5.2 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มและสมการการดูดซับของแลงเมียร์และ ฟรุนดลิช

#### 5.4 ศึกษาอัตราส่วนเถ้าลอยลิกันต์ผสมดินที่เหมาะสม

เพื่อหาอัตราส่วนเถ้าลอยลิกันต์ผสมดินที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร แปรผันอัตราส่วนเถ้าลอยลิกันต์ผสมดินเป็น (1:1, 1:5, 1:10, 1:20 และ 1:40) ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้น กรวด 9.6 เซนติเมตร ทราบหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2.8 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินที่ได้จากการศึกษาข้อที่ 5.4

#### 6.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 1,500 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีจนประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือมีสภาวะคงที่

#### 6.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหล้ากรองน้ำเสีย

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ปล่อยขังทิ้งไว้ 5 วัน เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในวันที่ 5 และปล่อยแห้ง 2 วัน นำน้ำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือมีสภาวะคงที่

#### 6.3 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 6.1 และ 6.2 แต่เปลี่ยนจากการใช้น้ำเสีย เป็นน้ำกลั่นแทนในการทดลองเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลอง ของวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

ทำการทดลอง โดยใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราบหยาบ 3 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินที่ได้จากการศึกษาข้อที่ 5.4 ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ ต้นกกกลมและหญ้าแฝก

#### 7.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

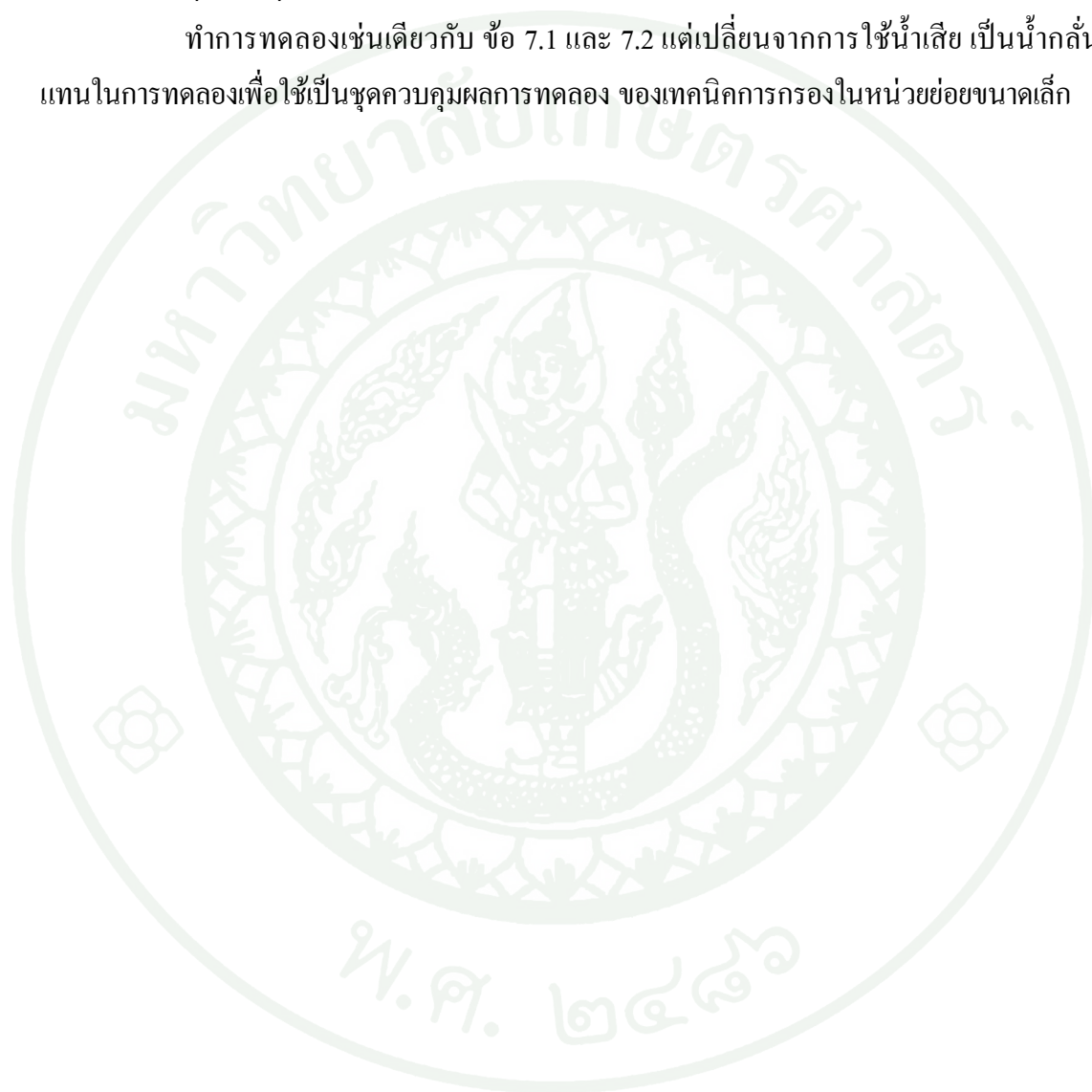
ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 150 ลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากกระบะทุกๆ ครึ่งชั่วโมง นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดี ทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือมีสภาวะคงที่

## 7.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 20 ลิตร ปล่อยทิ้งไว้ 5 วัน เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากกระเบในวันที่ 5 และปล่อยแห้ง 2 วัน นำน้ำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดี ทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง หรือมีสภาวะคงที่

## 7.3 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 7.1 และ 7.2 แต่เปลี่ยนจากการใช้น้ำเสีย เป็นน้ำกลั่น แทนในการทดลองเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลอง ของเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก



## ผลและวิจารณ์

การบำบัดน้ำเสียจากบ่อกักตะกอนเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ ด้วยการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับเทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก โดยทำการทดลองแบบแบดซ์เพื่อศึกษา ปริมาณของตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ และระยะเวลาบำบัด และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้ไปใช้ในการทดลองการบำบัดสี และสีโอดีแบบการไหลต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ และเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่จำลองระบบบำบัดน้ำเสียการกรองน้ำเสีย และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมต่อไป โดยนำถ้ำลอยลิกไนต์มาผสมกับดินเป็นวัสดุปลูก และปลูกพืช คือ ต้นกกกลมและหญ้าแฝก ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

### 1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

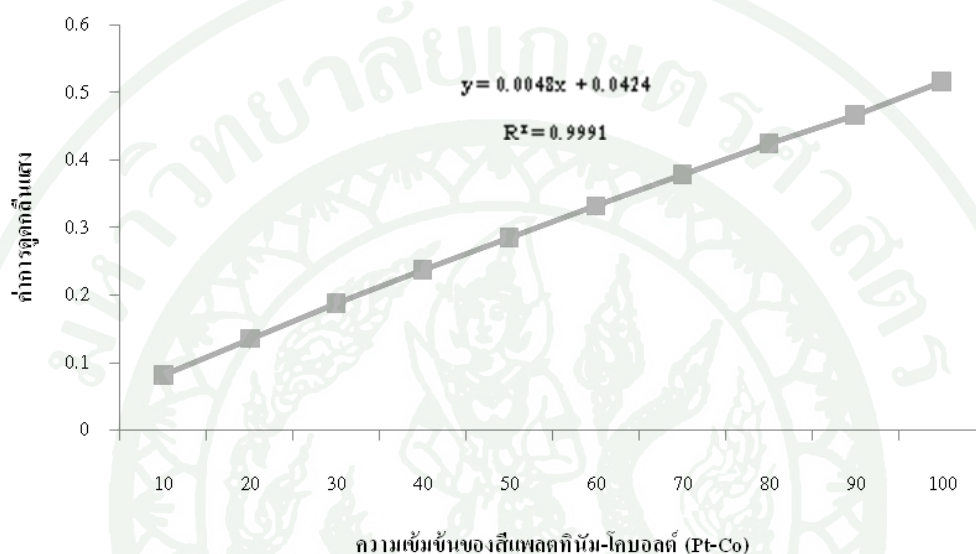
ถ้ำลอยลิกไนต์ เป็นถ้ำลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อกระดาษ บริษัทสยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้จากเตาเผาเบอร์ 16 ซึ่งเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผา 100 % วิธีการเก็บคือ นำถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น ทั้งถ้ำลอยเย็นในตัวดูดความชื้น เพื่อไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ถ้ำลอยลิกไนต์

## 2. ผลการเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ที่เตรียมจากการทดลองข้อที่ 3 ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์

## 3. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้น (Primary Clarifier Pond) พบว่าค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 4 และนิคมอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งซีไอดีมีค่า 2,880 mg/L ซึ่งเกินค่ามาตรฐานอย่างมาก และสีมีค่า 112 PtCo Unit ซึ่งเกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำที่กำหนดให้ไม่เกินค่า 5-15 PtCo Unit (การประปาส่วนภูมิภาค, 2553)



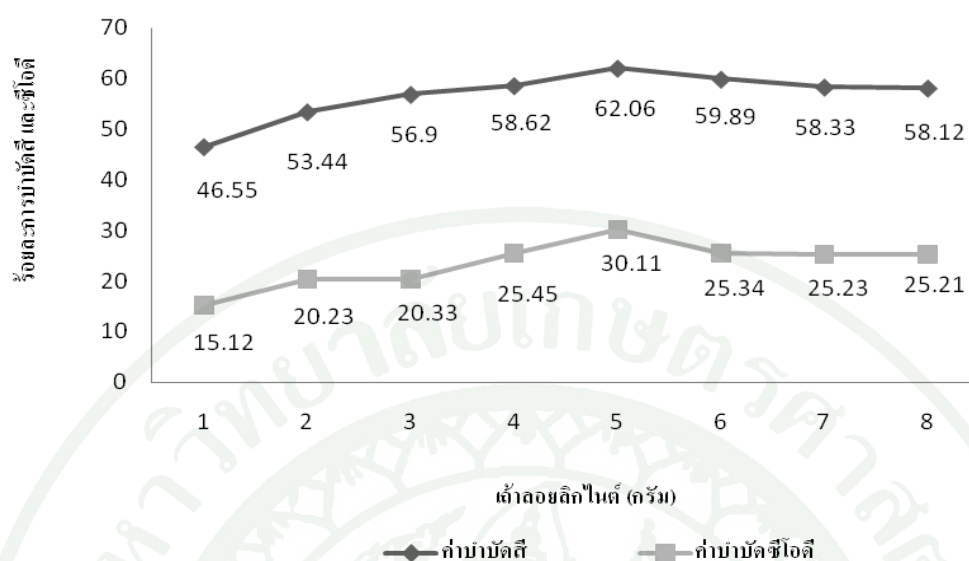
ตารางที่ 4 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

| พารามิเตอร์                     | น้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้น<br>(Primary Clarifier Pond) |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| พีเอช                           | 7.3                                                       |
| EC ( $\mu\text{S}/\text{cm.}$ ) | 2,050                                                     |
| TDS (mg/L)                      | 1,309                                                     |
| ความเค็ม (ppt.)                 | 0.9                                                       |
| ความขุ่น(NTU)                   | 8.9                                                       |
| ซีโอดี (mg/L)                   | 2,880                                                     |
| บีโอดี (mg/L)                   | 1,188                                                     |

#### 4. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ และไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการทดลองแบบเบตซ์

##### 4.1 ศึกษาปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

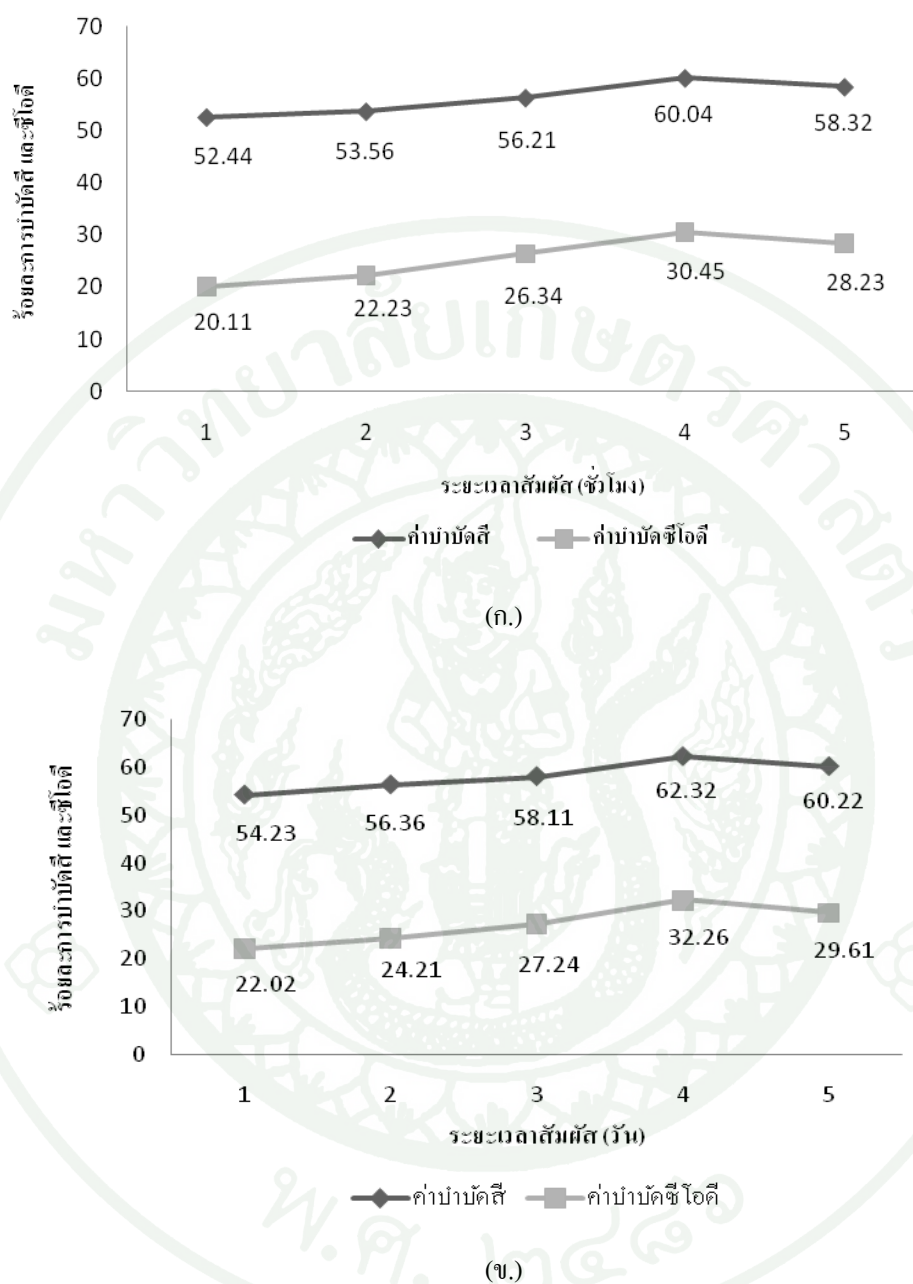
จากการทดลองข้อที่ 5.1 ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีเพิ่มขึ้น และเริ่มมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่างๆ แต่ปริมาณมลสารที่เถ้าลอยลิกไนต์ดูดซับได้ในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ จึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการคายซับ ร่วมด้วย จึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์และกณิตา, 2550) ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์ 5 กรัม สามารถบำบัดค่าสี และซีโอดีได้สูงที่สุด คือ ร้อยละ 62.06 และ 30.11 ตามลำดับ ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีกับปริมาณเกลือคลอไรด์

#### 4.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสม

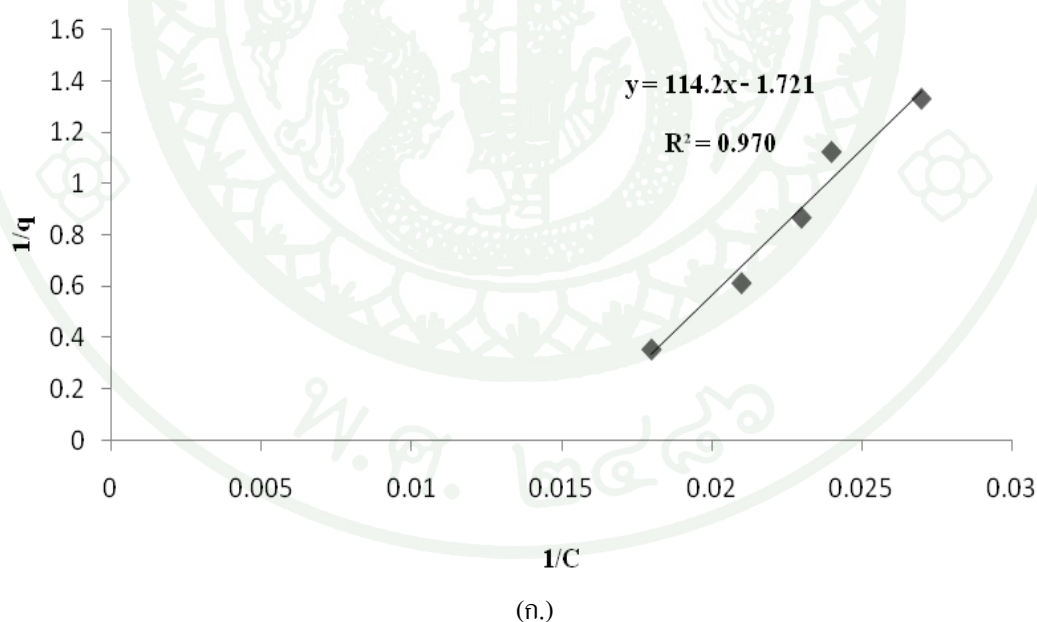
จากการทดลองข้อที่ 5.2 ใช้เกลือคลอไรด์ 5 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตรและทำการแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงและเป็นวัน พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงที่ 4 ชั่วโมงให้ร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีดีที่สุด คือ ร้อยละ 60.04 และ 30.45 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วันให้ร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีดีที่สุด คือ ร้อยละ 62.32 และ 32.26 ตามลำดับ ดังภาพที่ 34 อธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาทำให้มีผลสารมีโอกาสสัมผัส หรือถูกดูดซับด้วยเกลือคลอไรด์มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับหรือเกลือคลอไรด์มีปริมาณจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่และอาจมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการคายซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีไอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



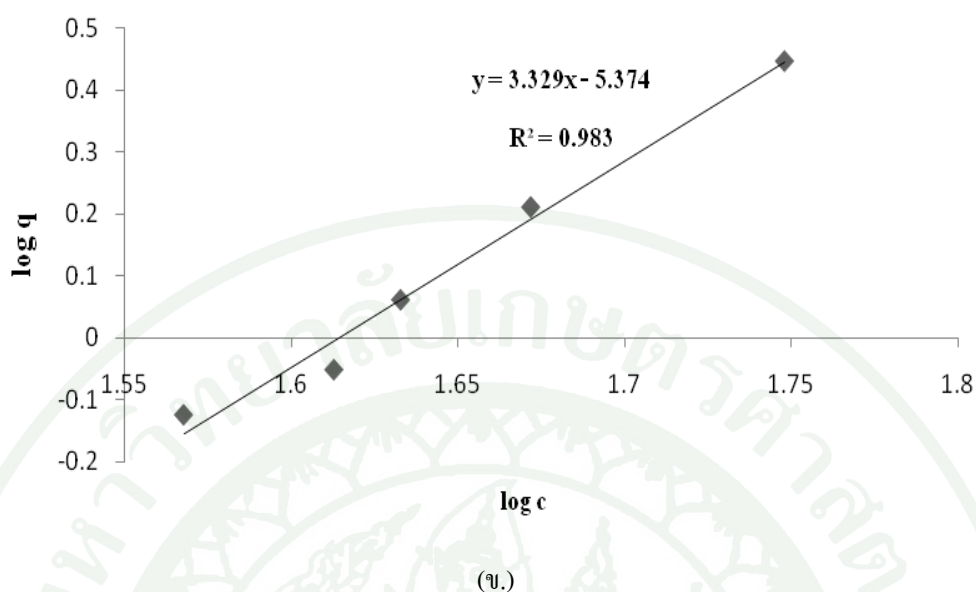
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบัพคี่ และไอ้กับระยะเวลาสัมพัทธ์ เป็นชั่วโมง (ก.) และวัน (ข.)

#### 4.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการทดลองที่ 5.3 นำผลการทดลองจากการศึกษาการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ โดย แปรผันปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ ต่อ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และระยะสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง มาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ได้ดังภาพที่ 35 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากลไกการดูดซับสอดคล้องกับทั้งสมการดูดซับของแลงเมียร์ และ ฟรุนดลิช ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด โดยมีกลไกของการดูดซับที่เหมือนกัน ซึ่งการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน (Johnson, 1989) ส่วนกลไกการดูดซับของ ฟรุนดลิช คือ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 35 ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ก.) และไอโซเทอร์มฟรุนดลิช (ข.)

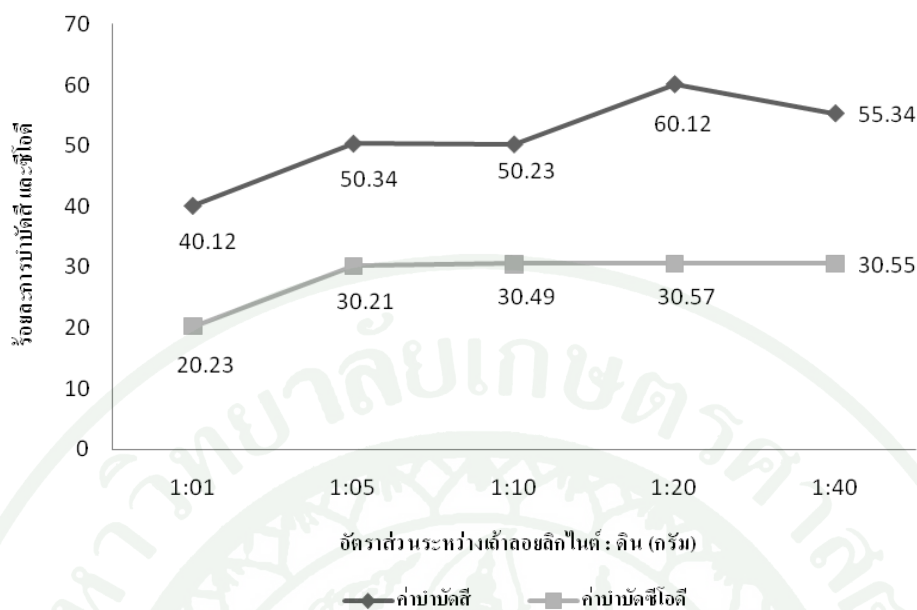


ภาพที่ 35 (ต่อ)

#### 4.4 ศึกษาอัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม

จากการทดลองข้อที่ 5.4 ใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินเป็น 1:1, 1:5, 1:10, 1:20 และ 1:40 เหย้าแล้วตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลา 4 ชั่วโมง ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีของดินที่อัตราส่วนต่างๆกัน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณดินประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดี สูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 60.12 และ 30.57 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับใช้เถ้าลอยลิกไนต์เพียงอย่างเดียว ดังผลการทดลองที่ 4.1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกที่อัตราส่วน 1:20 เพื่อการเจริญเติบโตของพืชที่จะทำการทดลองในขั้นต่อไป ดังภาพที่ 36





ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำและน้ำมัน ของถั่วเหลืองในดินผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

##### 5. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

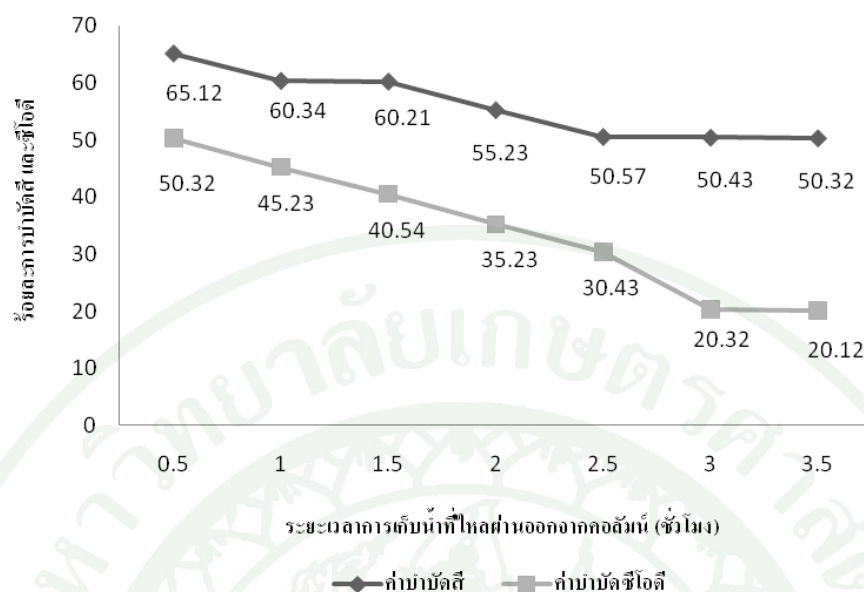
ลักษณะคอลัมน์ที่ได้จากการบรรจุชั้นวัสดุปลูกเช่นเดียวกับ โครงการศึกษา วิจัยและพัฒนา สิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย โดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้น กรวด 9.6 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราวยละเอียด 2.8 เซนติเมตร และถั่วเหลืองในดินผสมดินที่อัตราส่วน 1:20 ความสูง 16.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบ  
หน่วยกรองน้ำเสีย

#### 5.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

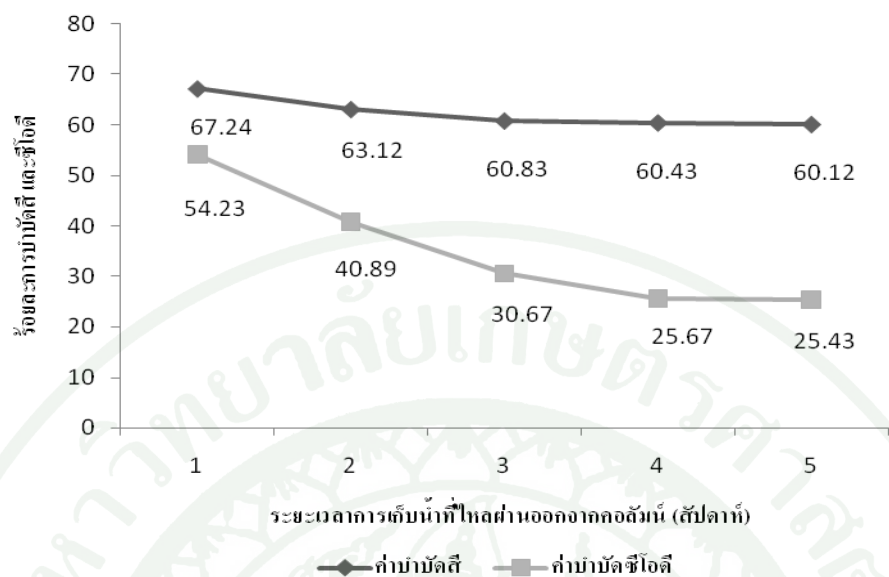
จากการทดลองที่ 6.1 ผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม คือ ปล่อยน้ำเสีย 1,500 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีในครึ่งชั่วโมงแรก สามารถบำบัดสี และซีโอดีได้ดีที่สุด ร้อยละ 65.12 และ 50.32 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล (Esposito et al., 1991) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในถังครึ่งชั่วโมงแรก ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีได้ดี เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆ ยังมีพื้นที่มาก และเมื่อระยะเวลาหนึ่ง ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนคงที่ เพราะตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์ถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังภาพที่ 38



**ภาพที่ 38** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอดัมน์ทุกครึ่งชั่วโมง

## 5.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนเวียนน้ำเสีย

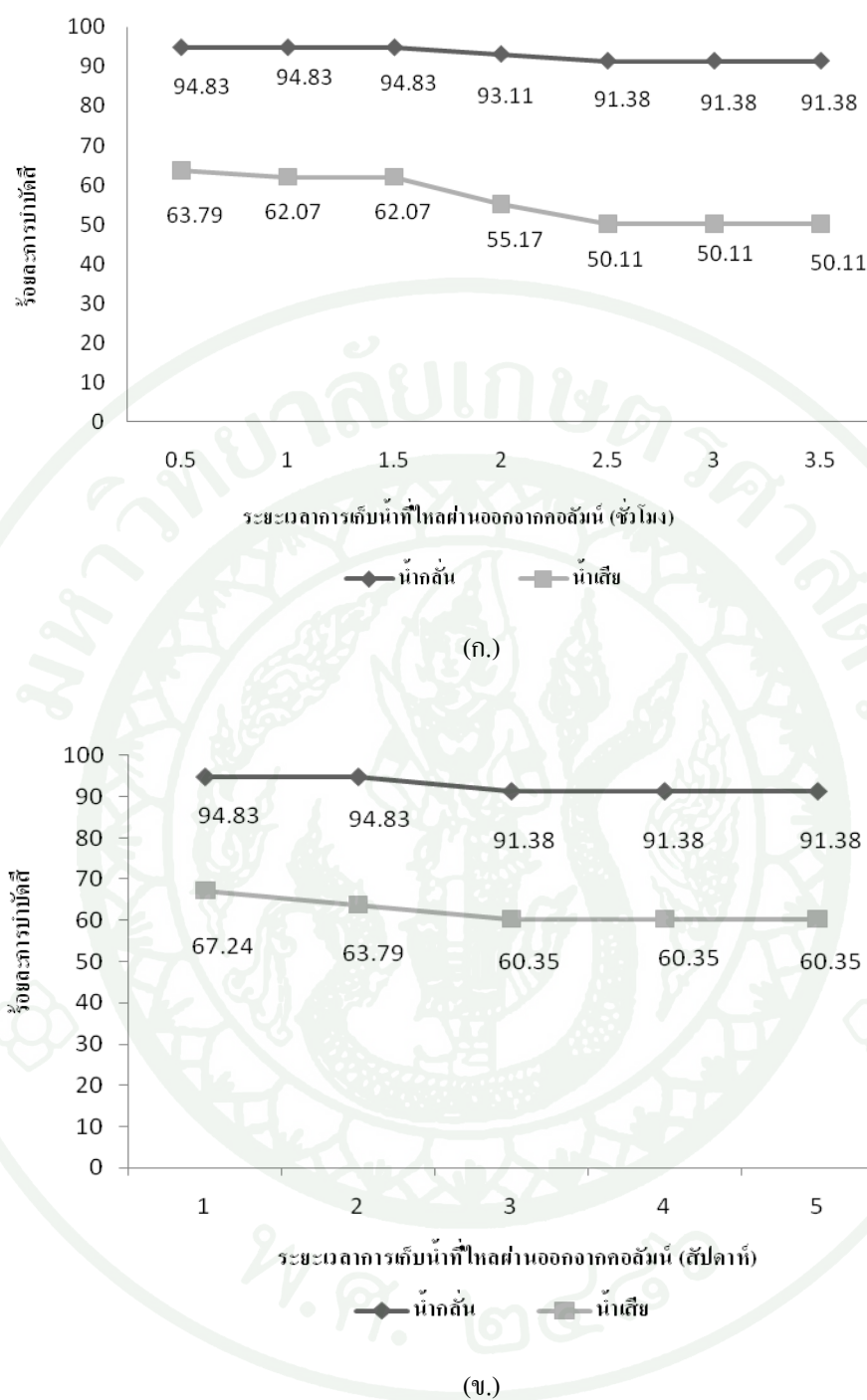
จากการทดลองที่ 6.2 ผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนเวียนน้ำเสีย คือ ปล่อยน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ปล่อยทิ้งไว้ 5 วัน เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากรอคอดัมน์ในวันที่ 5 และปล่อยแห้ง 2 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีในสัปดาห์แรก สามารถบำบัดสี และซีโอดีได้ดีที่สุด ร้อยละ 67.24 และ 54.23 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังภาพที่ 39 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 5.1



ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดดี และซีไอดี กับระยะเวลารับน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์

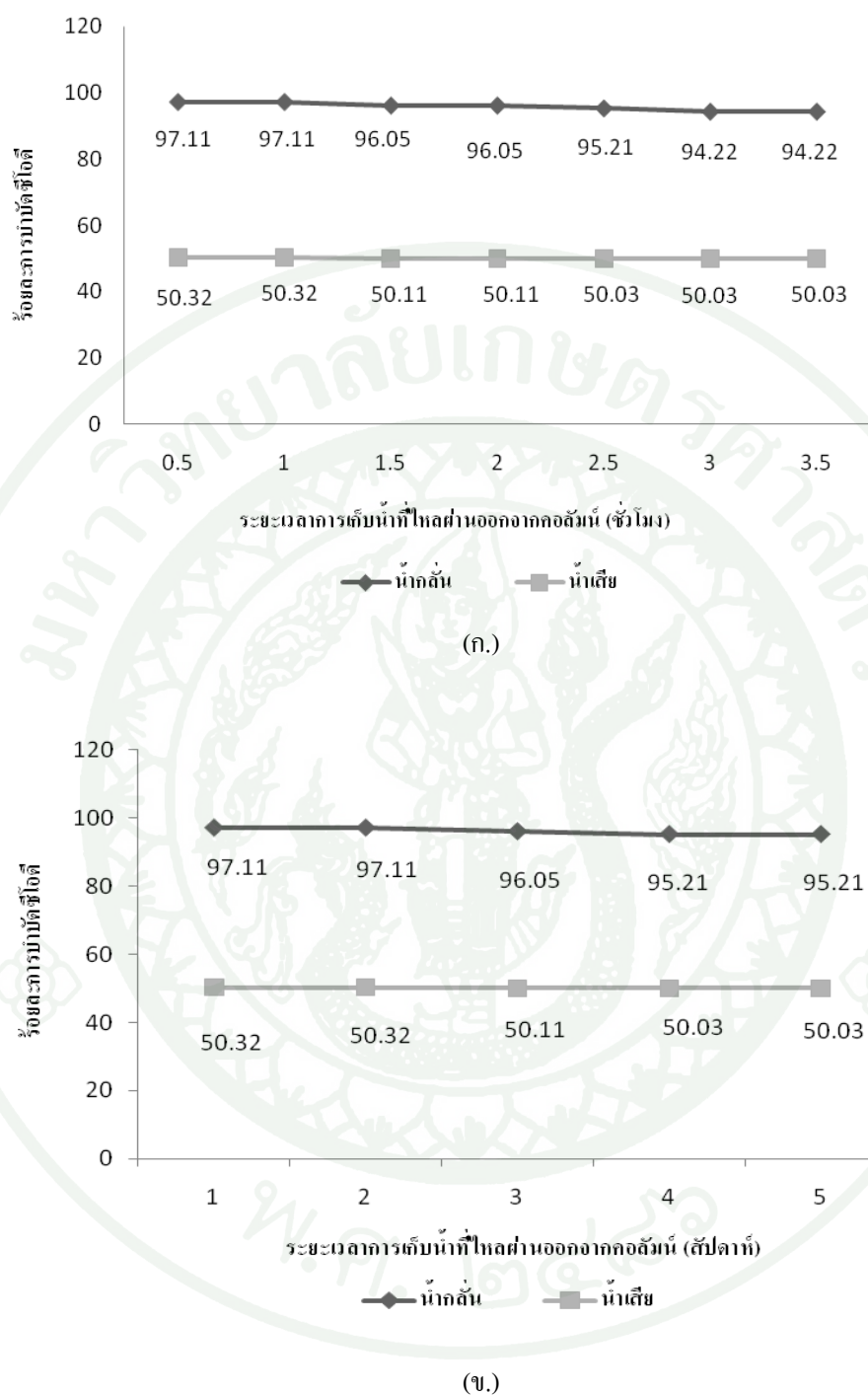
### 5.3 ชุดควบคุม

จากการทดลองที่ 6.3 การทดลองชุดควบคุม ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ พบว่า ร้อยละการบำบัดดี และซีไอดีมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 แสดงว่าน้ำกลั่นที่ผ่านวัสดุที่ใช้เพาะปลูกในการทดลอง ไม่ได้ชะสี และสารอินทรีย์ออกมา ดังภาพที่ 40 และ 41 ดังนั้นสี และซีไอดีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด เป็นสีและซีไอดีที่มาจากน้ำเสียซึ่งไม่ถูกบำบัด



ภาพที่ 40 การทดลองชุดควบคุม โดยใช้ น้ำกลั่น แทน น้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และ ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)

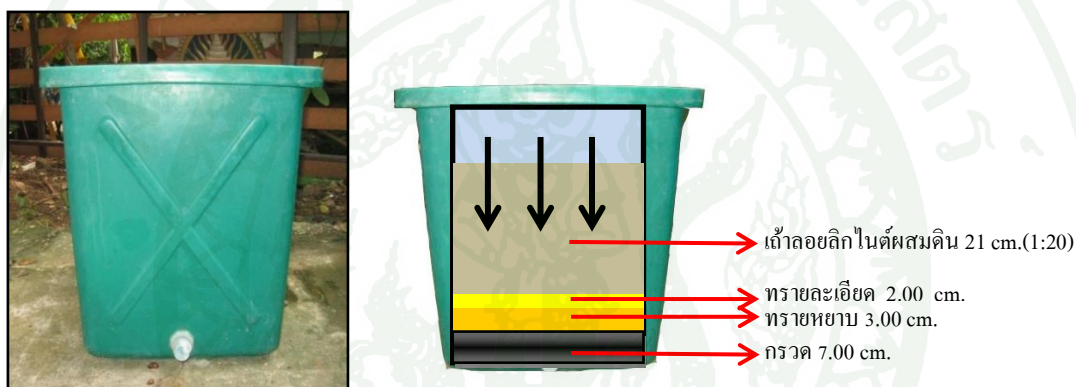




**ภาพที่ 41** การทดลองชุดควบคุม โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และ ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดดี และซีโอทีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

ลักษณะกระบะที่ได้จากการบรรจุชั้นวัสดุปลูกเช่นเดียวกับ โครงการศึกษา วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย ใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราขยหยาบ 3 เซนติเมตร ทราขละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินที่อัตราส่วน 1:20 ความสูง 21 เซนติเมตร ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ ต้นกกกลมและหญ้าแฝก ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กระบะบรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย



(ก.)

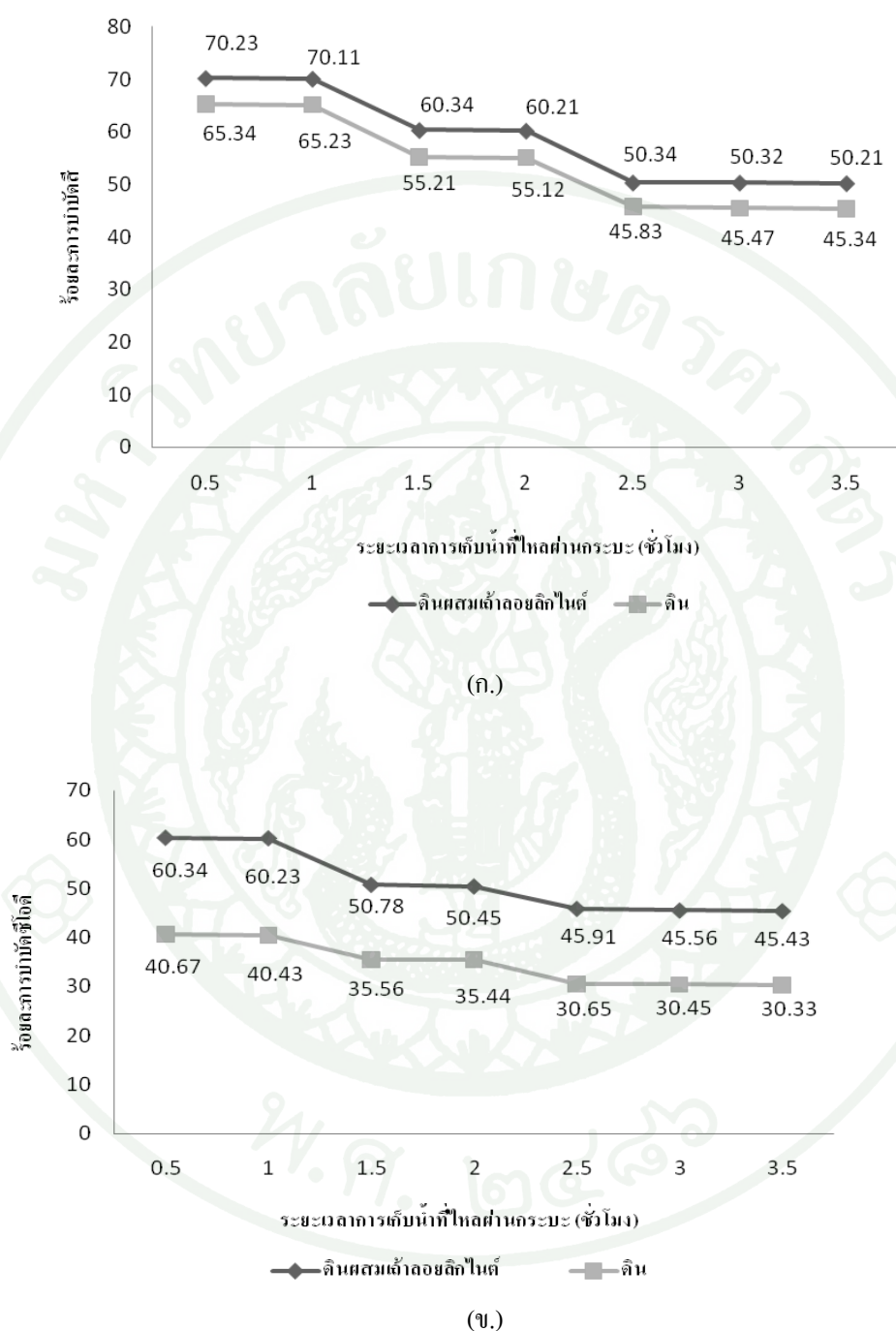
(ข.)

**ภาพที่ 43** กระบะเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย ดันกกกลม (ก.) และหญ้าแฝก (ข.)

#### 6.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

##### 6.1.1 ดันกกกลม

จากการทดลองข้อที่ 7.1 จำลองการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยปลูกดันกกกลม ดังภาพที่ 43 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบะที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมปลูกพืชกับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว พบว่า กระบะผสมถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดีได้มากกว่า กระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 5.00 และ 20.00 ตามลำดับ เนื่องจาก ถ้ำลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆ ที่มาจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษได้ดี เมื่อนำมาผสมในดินปลูกร่วมกับพืช (กกกลม) ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (สุชาดา และคณะ, 2537) ดังภาพที่ 44

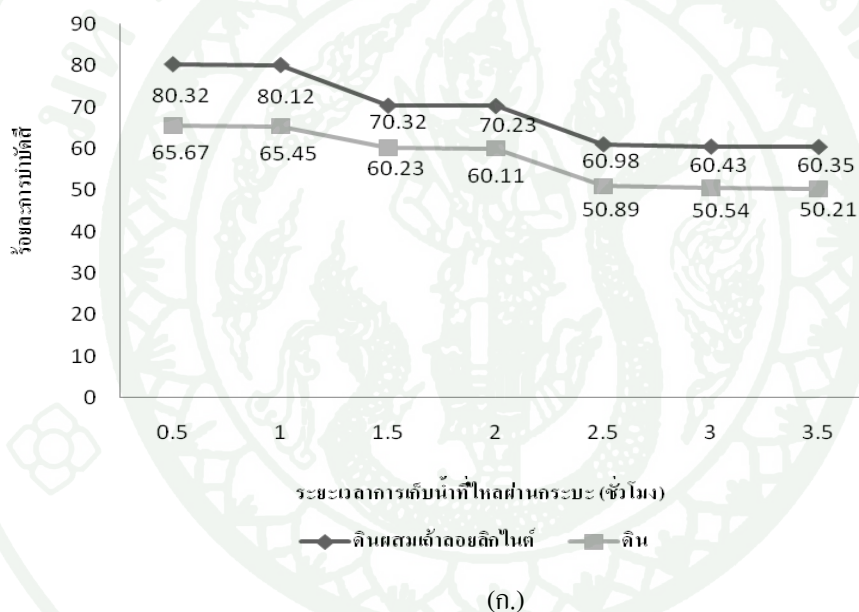


**ภาพที่ 44** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของกกกลม ระหว่างกระบะที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดชีโอดี (ข.)

### 6.1.2 หล้าแฝก

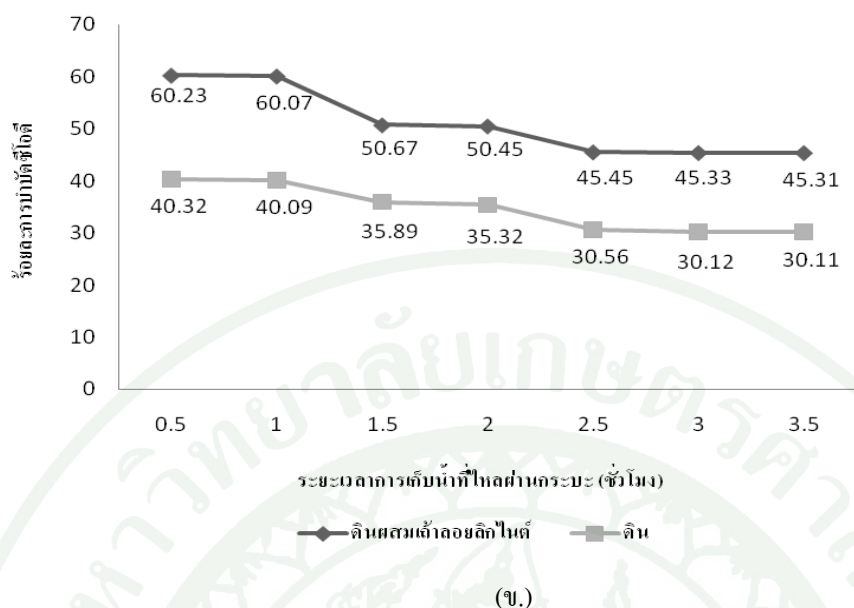
จากการทดลองที่ 7.1 จำลองการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยปลูกหล้าแฝก ดังภาพที่ 43 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบะที่ใช้เถาลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว พบว่า กระบะที่ผสมเถาลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดี ได้มากกว่ากระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 15.00 และ 20.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 45 อธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1

เมื่อเปรียบเทียบกับกระบะที่ปลูกต้นกกกลม พบว่า หล้าแฝกทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้น ร้อยละ 10.00 และประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีลดลงใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 45 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของหล้าแฝก ระหว่างกระบะที่ใช้เถาลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดซีไอดี (ข.)



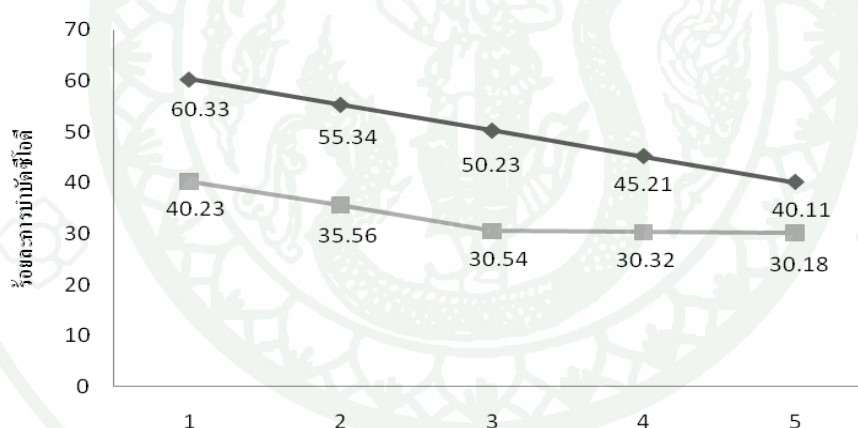
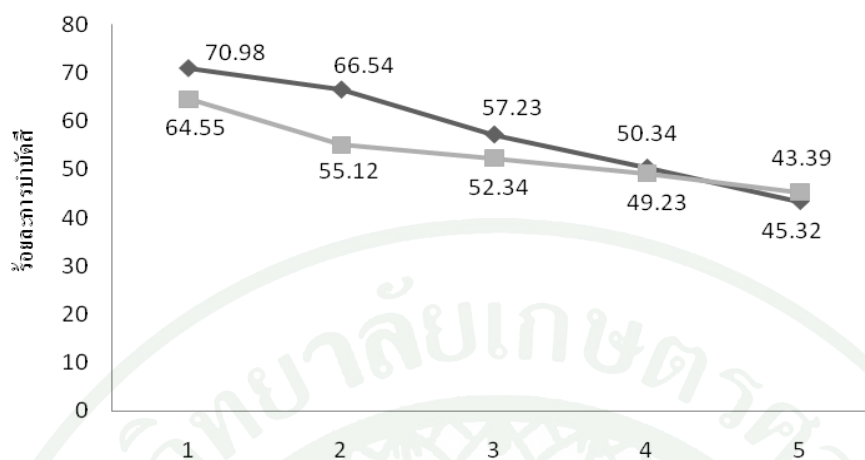


ภาพที่ 45 (ต่อ)

## 6.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

### 6.2.1 ต้นกกกลม

จากการทดลองที่ 7.2 จำลองการบำบัดน้ำเสียของระบบหมุนำกรองน้ำเสีย ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยปลูกต้นกกกลม ดังภาพที่ 43 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบะที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว พบว่า กระบะผสมถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดีได้มากกว่ากระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 5.00 และ 20.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 46 อธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1



(ก.)

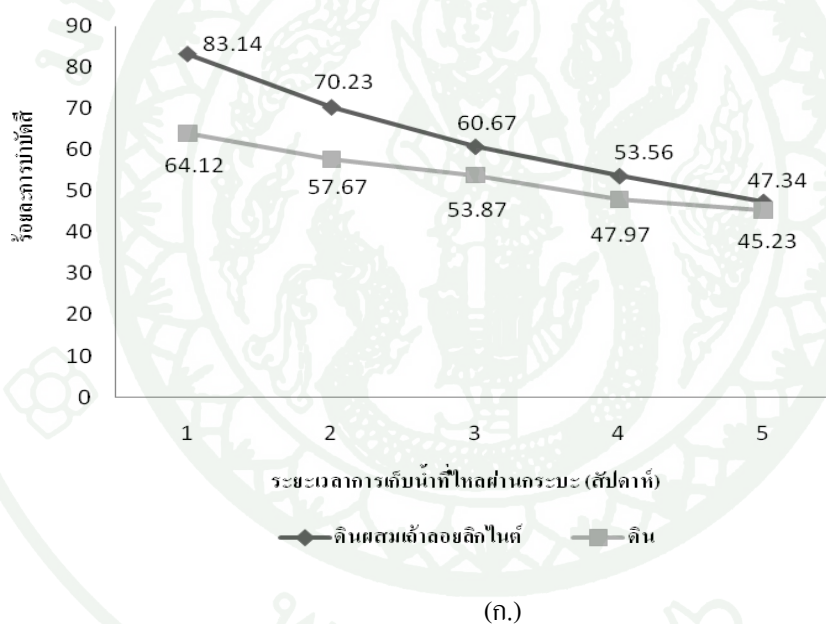
(ข.)

**ภาพที่ 46** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการงอกของกกกลม ระหว่างกระบะที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบหมุนน้ำเลี้ยงการงอก (ก.) และการงอกซีโอดี (ข.)

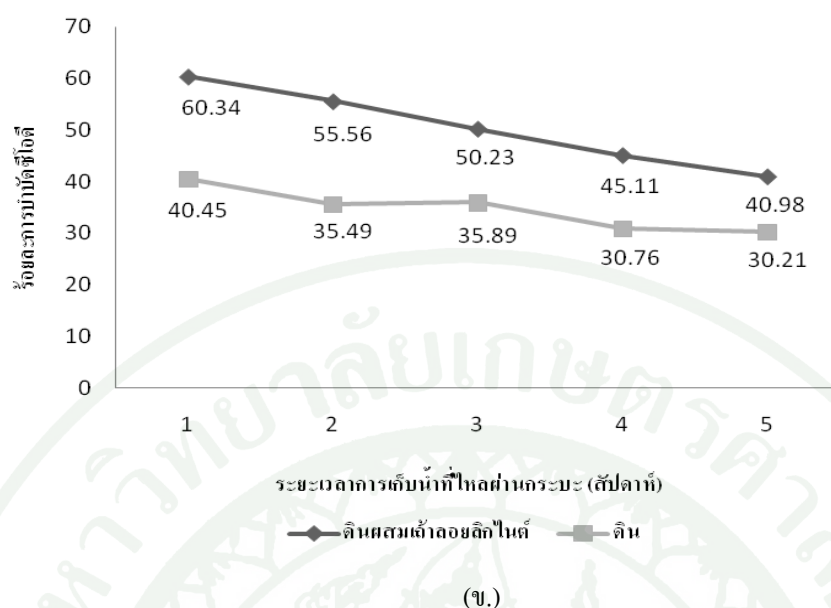
## 6.2.2 หล้าแฝก

จากการทดลองที่ 7.2 จำลองการบำบัดน้ำเสียของระบบหล้ากรองน้ำเสีย ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยปลูกหล้าแฝก ดังภาพที่ 43 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบะที่ใช้เถาลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว พบว่า กระบะที่ผสมเถาลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดีได้มากกว่า กระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 15.00 และ 20.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 47 เพียงอย่างเดียว อธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1

เมื่อเปรียบเทียบกับกระบะที่ปลูกต้นกกกลม พบว่า หล้าแฝกทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้น ร้อยละ 10 และประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีลดลงใกล้เคียงกัน



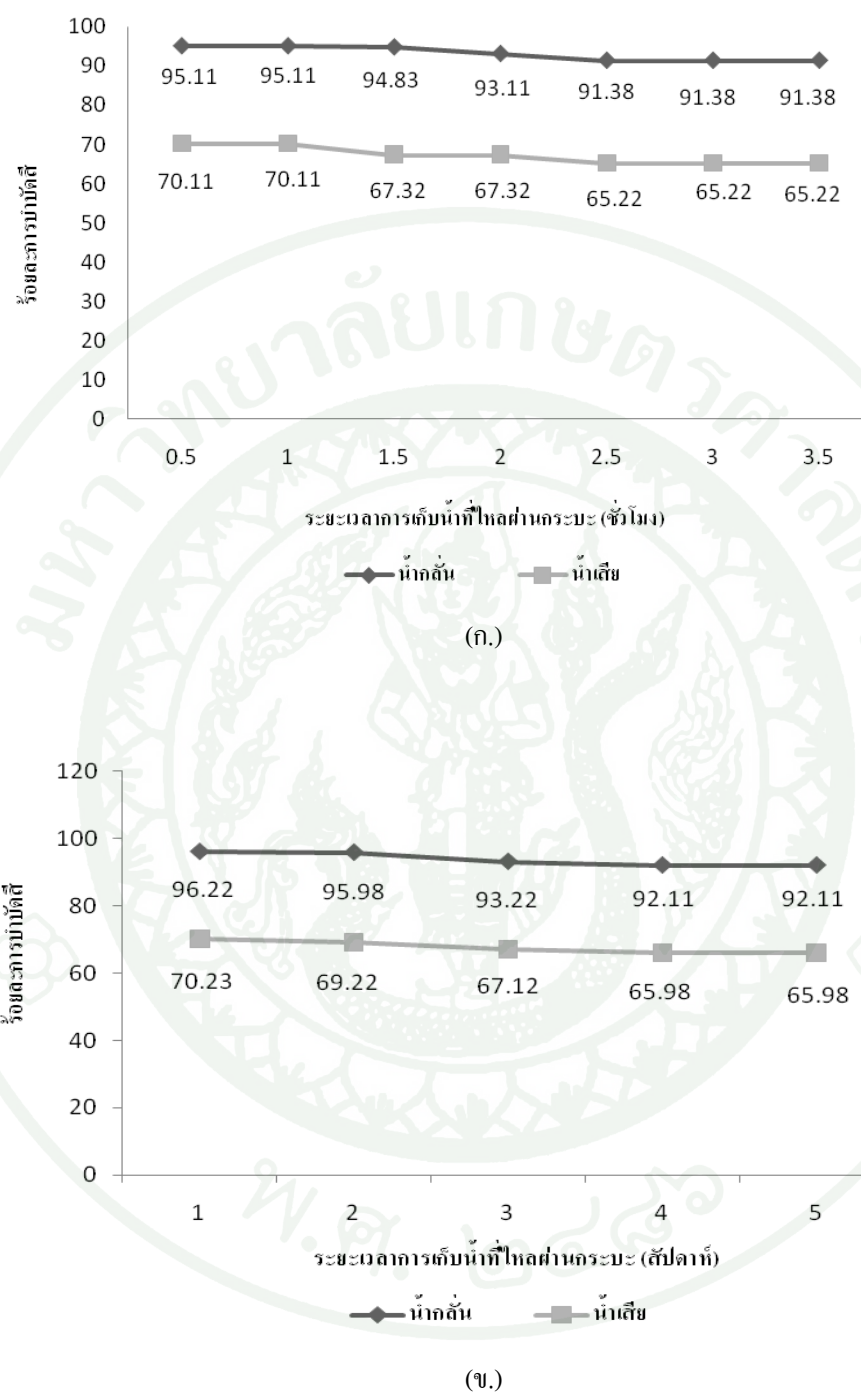
ภาพที่ 47 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของหล้าแฝก ระหว่างกระบะที่ใช้เถาลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวของระบบหล้ากรองน้ำเสีย การบำบัดสี (ก.) และการบำบัดซีไอดี (ข.)



ภาพที่ 47 (ต่อ)

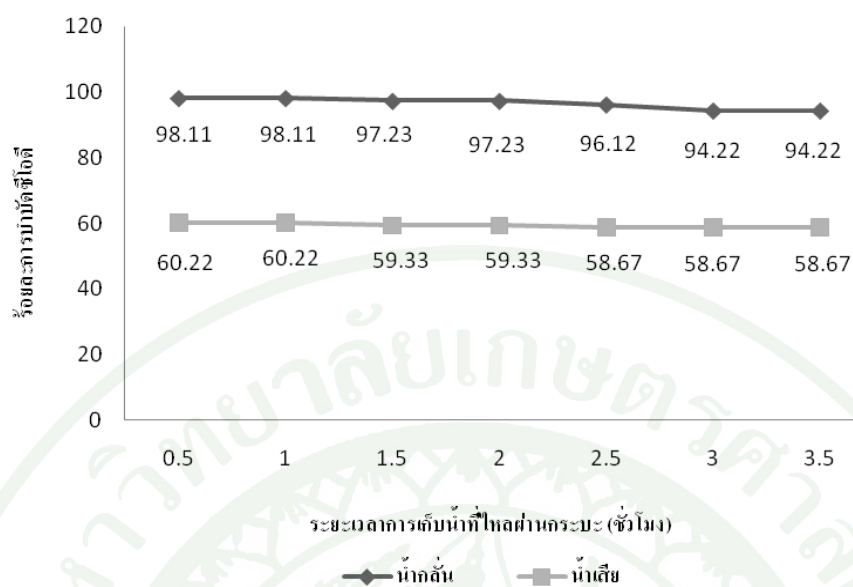
### 6.3 ชุดควบคุม

จากการทดลองที่ 7.3 การทดลองชุดควบคุม ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ พบว่า ร้อยละการบำบัดสี และซีไอดีมีค่าใกล้เคียงร้อยละ 100 แสดงว่า น้ำกลั่นที่ผ่านวัสดุที่ใช้เพาะปลูกในการทดลอง ไม่ได้ชะสี และสารอินทรีย์ออกมา ดังภาพที่ 48 และ 49 ดังนั้น สีและซีไอดีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด เป็นสีและซีไอดีที่มาจากน้ำเสีย ซึ่งไม่ถูกบำบัด

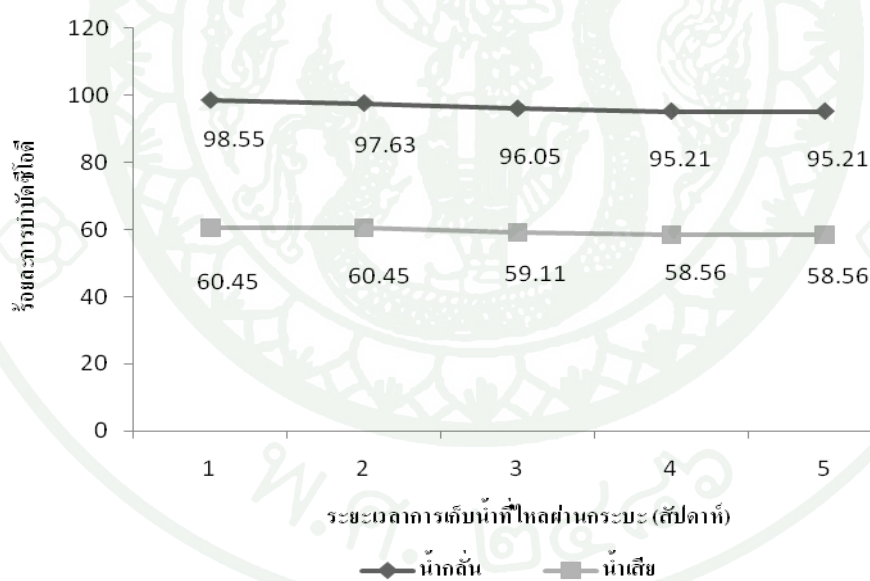


ภาพที่ 48 การทดลองชุดควบคุม โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และ ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)





(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 49 การทดลองชุดควบคุม โดยใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม (ก.) และ ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (ข.)

## 7. คุณภาพน้ำหลังการทดลอง

คุณภาพน้ำหลังการทดลองเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับพืช คือ กกกลม และหญ้าแฝก พบว่า การบำบัดร่วมกับกกกลม ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 70.98 และ 60.33 ตามลำดับ และการบำบัดร่วมกับหญ้าแฝก ประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีโอดีอยู่ที่ร้อยละ 83.14 และ 60.34 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ สามารถบำบัดสีได้จาก 112 Pt-Co Unit เหลือ 32.54 และ 18.88 Pt-Co Unit ตามลำดับ และสามารถบำบัดซีโอดีจาก 2,880 mg/L เหลือ 1,142 mg/L ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณภาพน้ำหลังการทดลอง

| พารามิเตอร์                     | ก่อนบำบัด | น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ |                |                        |                |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------------|----------------|------------------------|----------------|
|                                 |           | การบำบัดร่วมกับกกกลม                     |                | การบำบัดร่วมกับหญ้าแฝก |                |
|                                 |           | หลังบำบัด                                | ร้อยละการบำบัด | หลังบำบัด              | ร้อยละการบำบัด |
| pH                              | 7.3       | 7.7                                      | -              | 7.7                    | -              |
| Color (Pt-Co Unit)              | 112       | 32.54                                    | 70.98          | 18.88                  | 83.14          |
| EC ( $\mu\text{S}/\text{cm.}$ ) | 2,050     | 7,080                                    | -              | 5,400                  | -              |
| TDS (mg/L)                      | 1,309     | 6,460                                    | -              | 5,000                  | -              |
| Sal (ppt.)                      | 0.9       | 3.9                                      | -              | 2.9                    | -              |
| Turb (NTU)                      | 8.9       | 3.09                                     | -              | 1.78                   | -              |
| COD (mg/L)                      | 2,880     | 1,142                                    | 60.33          | 1,142                  | 60.34          |

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและ  
กระดาษ ด้วยการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบ  
บำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสีย โดยอาศัยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก จำลองระบบบำบัด  
ทั้งสองแบบ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดลองแบบเบตซ์ ส่วนที่ 2  
การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง และส่วนที่ 3 การทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก  
ได้ผลดังนี้

จากการทดลองแบบเบตซ์ พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัมต่อน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม  
เชื้อและกระดาษ 50 มิลลิลิตร สามารถบำบัดสี และซีไอดี ได้ร้อยละ 62.06 และ 30.11 ตามลำดับ  
เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง สามารถบำบัดสี และซีไอดี ได้ร้อยละ 60.04 และ 30.45  
ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 วัน สามารถบำบัดสี และซีไอดี ได้ร้อยละ 62.32 และ 32.26  
ตามลำดับ กลไกการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ สอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และ  
ฟรุนดลิช และอัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม คือ 1:20 สามารถบำบัดสี และซีไอดี  
ได้ร้อยละ 60.12 และ 30.57 นั่นคือดินไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดี  
ผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ทั้งสองระบบประสิทธิภาพการบำบัดสี และซีไอดีใกล้เคียงกัน  
ประมาณร้อยละ 65.00 และ 50.00 ตามลำดับ และการทดลองการบำบัดแบบประยุกต์สำหรับใช้งาน  
จริงโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับปลูกพืช 2 ชนิดคือ ต้นกกกลมและ  
หญ้าแฝก เป็นการจำลองพื้นที่ปลูกของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย  
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ (LERD) พบว่า ในส่วนของต้นกกกลม ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี  
และซีไอดี ประมาณร้อยละ 70.00 และ 60.00 ตามลำดับ และหญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพในการบำบัด  
สี และซีไอดี ประมาณร้อยละ 80.00 และ 60.00 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งต้นกกกลม และหญ้าแฝก  
ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีไอดี และกระบะที่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพ  
ในการบำบัดสี และซีไอดีได้มากกว่า กระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว ประมาณร้อยละ 5.00-  
15.00 และ 20.00 ตามลำดับ

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ถ้ำลอยลิกไนต์มีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดทั้งสองระบบในการบำบัดสี และซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

### ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ สามารถบำบัดสี และ ซีโอดีได้ร้อยละ 70.00 - 80.00 และ 60.00 ตามลำดับ ซึ่งค่าสีอยู่ที่ 18.88 - 32.54 Pt-Co Unit และซีโอดี อยู่ที่ 1,142 mg/L เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษค่าสีที่ 112 Pt-Co Unit และซีโอดีที่ 2,880 mg/L แสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพการบำบัดสี และ ซีโอดีได้ดีในระดับหนึ่ง แต่คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าเกินมาตรฐานที่กรมโรงงาน อุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ ดังนั้น จึงควรมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบการบำบัดในรูปแบบอื่นๆ เช่น ระบบ Activated Sludge เพื่อลดค่าสี และซีโอดีให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมโรงงาน อุตสาหกรรมกำหนดไว้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2552. คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ. บริษัท ดี เอ็ม พรินต์ติ้ง จำกัด, กรุงเทพฯ.

การประปาส่วนภูมิภาค. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค.

แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/document/spec.html>, 22 พฤษภาคม 2556.

ต่อพงศ์ ธีรชาชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรวัฒน์ ลินศิริ. 2554. ผลกระทบของความละเอียดถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 9(1): 40-48.

นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ. 2548. การลดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตังคณานุกรักษ์ และคณิดา ตังคณานุกรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด. 2556. ข้อมูลน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย.

แหล่งที่มา: <http://www.siamkraft.com/>, 22 พฤษภาคม 2556.

พรรัตน์ ดีสงคราม. 2547. การใช้ระบบหมักกรองบำบัดน้ำเสียชุมชนจังหวัดจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2543. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ.

วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.



วรวิทย์ มัชฌันต์, โสภ วิทยุศักดิ์ และ โจเซฟ เคดารี. มปป. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพบำบัดดิน  
ดินด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. แหล่งที่มา

[http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEconomic/43-Worawut\\_mat/template.html](http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEconomic/43-Worawut_mat/template.html),  
18 ตุลาคม 2555.

วิจิตอจันรา สรรพกิจงานง. 2536. เถ้าลอยในงานทาง รายงานฉบับที่ วพ.131,  
ศูนย์วิจัยและพัฒนา, กรมทางหลวง.

สุชาดา ศรีเพ็ญ, วีรชัย เดชคง และ อมร พันทุศรี. 2537. การคัดเลือกพืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการ  
บำบัดน้ำเสียโดยวิธี **grass filtration**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการ  
สิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม  
กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

อัมไพวรรณ พุกประเสริฐ. 2550. การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจาก  
โรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยดินที่มีการปลูกพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

Esposito E., VP. Canhos and N. Duran. 1991. Screening of lignin degrading fungi for removal of  
color from Kraft mill wastewater with no additional extra carbon source. **Biotechnol  
Lett** 13(8): 571-576.

Johnson, A.T. 1989. The theory of Coloration of Textiles. **Society of Dyes and Colorist** 90(2):  
912-920.

Lee SH., R. Kondo and K.Sakai. 1994. Treatment of kraft bleaching effluents by lignin-degrading fungi Treatment by newly found fungus KS-62 without additional nutrients. **Mokuzai Gakkaishi** 40(6): 612-619.

Nabel C., R.D. Gottchling and H.J. Oneil. 1974. Ozone Decolorization of Pulp and Paper Secondary Effluents. **Welsbach Ozone Syst** 36(2): 210-221.

Wanpen W., S. Naratchai and B. Anussorn. 2002. Removal of Organic Matter Contaminated Pulp and Paper by Soil, pp. 1-9. *In* Symposium The 17 th World Congress of Soil Science. **Removal of Organic Matter by Soil Research**. Khon Kaen University, Khon Kaen.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

| ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์<br>(กรัม) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|--------------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                                | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                              | 0.311            | 0.310      | 0.309      | 0.310     | 46.55              |
| 2                              | 0.271            | 0.270      | 0.269      | 0.270     | 53.44              |
| 3                              | 0.250            | 0.249      | 0.251      | 0.250     | 56.90              |
| 4                              | 0.239            | 0.241      | 0.240      | 0.240     | 58.62              |
| 5                              | 0.220            | 0.221      | 0.219      | 0.220     | 62.06              |
| 6                              | 0.233            | 0.232      | 0.234      | 0.233     | 59.89              |
| 7                              | 0.243            | 0.240      | 0.241      | 0.241     | 58.33              |
| 8                              | 0.241            | 0.243      | 0.244      | 0.243     | 58.12              |

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

| ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม) | ร้อยละของการบำบัด |
|------------------------|-------------------|
| 1                      | 15.12             |
| 2                      | 20.23             |
| 3                      | 20.33             |
| 4                      | 25.45             |
| 5                      | 30.11             |
| 6                      | 25.34             |
| 7                      | 25.23             |
| 8                      | 25.21             |

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.276            | 0.277      | 0.275      | 0.276     | 52.44              |
| 2                           | 0.268            | 0.270      | 0.269      | 0.269     | 53.56              |
| 3                           | 0.255            | 0.254      | 0.253      | 0.254     | 56.21              |
| 4                           | 0.233            | 0.234      | 0.232      | 0.232     | 60.04              |
| 5                           | 0.240            | 0.243      | 0.241      | 0.241     | 58.32              |

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 20.11             |
| 2                        | 22.23             |
| 3                        | 26.34             |
| 4                        | 30.45             |
| 5                        | 28.23             |

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(วัน) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                         | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                       | 0.264            | 0.265      | 0.266      | 0.265     | 54.23              |
| 2                       | 0.252            | 0.254      | 0.253      | 0.253     | 56.36              |
| 3                       | 0.241            | 0.243      | 0.244      | 0.243     | 58.11              |
| 4                       | 0.218            | 0.220      | 0.219      | 0.219     | 62.32              |
| 5                       | 0.232            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.22              |



ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

| ระยะเวลาสัมผัส (วัน) | ร้อยละของการบำบัด |
|----------------------|-------------------|
| 1                    | 22.02             |
| 2                    | 24.21             |
| 3                    | 27.24             |
| 4                    | 32.26             |
| 5                    | 29.61             |

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชี ของแกลลยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

| อัตราส่วน<br>แกลลยลิกไนต์ : ดิน | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|---------------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                                 | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1:1                             | 0.347            | 0.348      | 0.346      | 0.347     | 40.12              |
| 1:5                             | 0.287            | 0.289      | 0.288      | 0.288     | 50.34              |
| 1:10                            | 0.288            | 0.290      | 0.289      | 0.289     | 50.23              |
| 1:20                            | 0.232            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.12              |
| 1:40                            | 0.256            | 0.255      | 0.255      | 0.255     | 55.34              |

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของแกลลยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

| อัตราส่วน แกลลยลิกไนต์ : ดิน | ร้อยละของการบำบัด |
|------------------------------|-------------------|
| 1:1                          | 20.23             |
| 1:5                          | 30.21             |
| 1:10                         | 30.49             |
| 1:20                         | 30.57             |
| 1:40                         | 30.55             |

ตารางผนวกที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านลอยลิกไนต์

| ปริมาณถ่านลอย<br>(กรัม) | Co  | C  | V    | q     | 1/q   | 1/C   | log q  | log C |
|-------------------------|-----|----|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 1                       | 112 | 56 | 0.05 | 2.801 | 0.357 | 0.018 | 0.447  | 1.748 |
| 2                       | 112 | 47 | 0.05 | 1.625 | 0.615 | 0.021 | 0.211  | 1.672 |
| 3                       | 112 | 43 | 0.05 | 1.151 | 0.871 | 0.023 | 0.061  | 1.633 |
| 4                       | 112 | 41 | 0.05 | 0.888 | 1.126 | 0.024 | -0.052 | 1.613 |
| 5                       | 112 | 37 | 0.05 | 0.751 | 1.333 | 0.027 | -0.125 | 1.568 |

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละการบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|----------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                |
| 0.5                         | 0.202            | 0.201      | 0.203      | 0.202     | 65.12          |
| 1                           | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.230     | 60.34          |
| 1.5                         | 0.232            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.21          |
| 2                           | 0.259            | 0.260      | 0.261      | 0.260     | 55.23          |
| 2.5                         | 0.285            | 0.287      | 0.286      | 0.286     | 50.57          |
| 3                           | 0.288            | 0.287      | 0.286      | 0.287     | 50.43          |
| 3.5                         | 0.288            | 0.287      | 0.289      | 0.288     | 50.32          |

**ตารางผนวกที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน  
คอลัมน์ทุกครึ่งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 0.5                      | 50.32             |
| 1                        | 45.23             |
| 1.5                      | 40.54             |
| 2                        | 35.23             |
| 2.5                      | 30.43             |
| 3                        | 20.32             |
| 3.5                      | 20.12             |

**ตารางผนวกที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน  
คอลัมน์ทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(สัปดาห์) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.189            | 0.190      | 0.191      | 0.190     | 67.24              |
| 2                           | 0.213            | 0.214      | 0.215      | 0.214     | 63.12              |
| 3                           | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.229     | 60.83              |
| 4                           | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.230     | 60.43              |
| 5                           | 0.232            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.12              |

**ตารางผนวกที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน  
คอลัมน์ทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 54.23             |
| 2                        | 40.89             |
| 3                        | 30.67             |
| 4                        | 25.67             |
| 5                        | 25.43             |

**ตารางผนวกที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมถ้ำลอยลึกไนต์ร่วมกับการ  
ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครึ่งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 0.5                         | 0.171            | 0.173      | 0.172      | 0.172     | 70.23              |
| 1                           | 0.174            | 0.173      | 0.172      | 0.173     | 70.11              |
| 1.5                         | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.230     | 60.34              |
| 2                           | 0.232            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.21              |
| 2.5                         | 0.287            | 0.288      | 0.289      | 0.288     | 50.34              |
| 3                           | 0.288            | 0.287      | 0.289      | 0.288     | 50.32              |
| 3.5                         | 0.288            | 0.290      | 0.289      | 0.289     | 50.21              |

**ตารางผนวกที่ 15** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 0.5                      | 60.34             |
| 1                        | 60.23             |
| 1.5                      | 50.78             |
| 2                        | 50.45             |
| 2.5                      | 45.91             |
| 3                        | 45.56             |
| 3.5                      | 45.43             |

**ตารางผนวกที่ 16** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 0.5                         | 0.202            | 0.201      | 0.201      | 0.201     | 65.34              |
| 1                           | 0.202            | 0.201      | 0.203      | 0.202     | 65.23              |
| 1.5                         | 0.259            | 0.260      | 0.261      | 0.260     | 55.21              |
| 2                           | 0.261            | 0.260      | 0.261      | 0.261     | 55.12              |
| 2.5                         | 0.314            | 0.315      | 0.316      | 0.315     | 45.83              |
| 3                           | 0.316            | 0.315      | 0.316      | 0.316     | 45.47              |
| 3.5                         | 0.316            | 0.317      | 0.318      | 0.317     | 45.34              |



**ตารางผนวกที่ 17** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ  
ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 0.5                      | 40.67             |
| 1                        | 40.43             |
| 1.5                      | 35.56             |
| 2                        | 35.44             |
| 2.5                      | 30.65             |
| 3                        | 30.45             |
| 3.5                      | 30.33             |

**ตารางผนวกที่ 18** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถั่วลยลิกไนต์ร่วมกับการ  
ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 0.5                         | 0.114            | 0.113      | 0.114      | 0.114     | 80.32              |
| 1                           | 0.115            | 0.114      | 0.115      | 0.115     | 80.12              |
| 1.5                         | 0.171            | 0.171      | 0.172      | 0.171     | 70.32              |
| 2                           | 0.171            | 0.173      | 0.172      | 0.172     | 70.23              |
| 2.5                         | 0.229            | 0.228      | 0.228      | 0.228     | 60.98              |
| 3                           | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.229     | 60.43              |
| 3.5                         | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.230     | 60.35              |

**ตารางผนวกที่ 19** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 0.5                      | 60.23             |
| 1                        | 60.07             |
| 1.5                      | 50.67             |
| 2                        | 50.45             |
| 2.5                      | 45.45             |
| 3                        | 45.33             |
| 3.5                      | 45.31             |

**ตารางผนวกที่ 20** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครั้งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(ชั่วโมง) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 0.5                         | 0.200            | 0.201      | 0.200      | 0.200     | 65.67              |
| 1                           | 0.202            | 0.201      | 0.201      | 0.201     | 65.45              |
| 1.5                         | 0.231            | 0.231      | 0.230      | 0.231     | 60.23              |
| 2                           | 0.232            | 0.231      | 0.232      | 0.232     | 60.11              |
| 2.5                         | 0.286            | 0.286      | 0.287      | 0.286     | 50.89              |
| 3                           | 0.287            | 0.288      | 0.287      | 0.287     | 50.54              |
| 3.5                         | 0.287            | 0.288      | 0.289      | 0.288     | 50.21              |

**ตารางผนวกที่ 21** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกครึ่งชั่วโมง

| ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 0.5                      | 40.32             |
| 1                        | 40.09             |
| 1.5                      | 35.89             |
| 2                        | 35.32             |
| 2.5                      | 30.56             |
| 3                        | 30.12             |
| 3.5                      | 30.11             |

**ตารางผนวกที่ 22** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ้ำลอยลึกไนโตรเจนร่วมกับการปลูกพืช (กกกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(สัปดาห์) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.171            | 0.170      | 0.170      | 0.170     | 70.89              |
| 2                           | 0.194            | 0.195      | 0.194      | 0.194     | 66.54              |
| 3                           | 0.248            | 0.249      | 0.248      | 0.248     | 57.23              |
| 4                           | 0.287            | 0.288      | 0.287      | 0.287     | 50.34              |
| 5                           | 0.328            | 0.329      | 0.329      | 0.329     | 43.39              |

**ตารางผนวกที่ 23** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 60.33             |
| 2                        | 55.34             |
| 3                        | 50.23             |
| 4                        | 45.21             |
| 5                        | 40.11             |

**ตารางผนวกที่ 24** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(สัปดาห์) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.205            | 0.206      | 0.206      | 0.206     | 64.55              |
| 2                           | 0.261            | 0.260      | 0.261      | 0.261     | 55.12              |
| 3                           | 0.276            | 0.277      | 0.277      | 0.277     | 52.34              |
| 4                           | 0.293            | 0.294      | 0.293      | 0.293     | 49.23              |
| 5                           | 0.316            | 0.317      | 0.318      | 0.317     | 45.32              |

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ  
ปลูกพืช (กกกลม) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 40.23             |
| 2                        | 35.56             |
| 3                        | 30.54             |
| 4                        | 30.32             |
| 5                        | 30.18             |

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมถั่วลยลิกไนต์ร่วมกับการ  
ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(สัปดาห์) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.098            | 0.098      | 0.099      | 0.098     | 83.14              |
| 2                           | 0.171            | 0.171      | 0.172      | 0.171     | 70.23              |
| 3                           | 0.229            | 0.231      | 0.230      | 0.229     | 60.67              |
| 4                           | 0.270            | 0.271      | 0.270      | 0.270     | 53.56              |
| 5                           | 0.305            | 0.305      | 0.306      | 0.305     | 47.34              |



**ตารางผนวกที่ 27** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 60.34             |
| 2                        | 55.56             |
| 3                        | 50.23             |
| 4                        | 45.11             |
| 5                        | 40.98             |

**ตารางผนวกที่ 28** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส<br>(สัปดาห์) | ค่าการดูดกลืนแสง |            |            | ค่าเฉลี่ย | ร้อยละ<br>การบำบัด |
|-----------------------------|------------------|------------|------------|-----------|--------------------|
|                             | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |                    |
| 1                           | 0.208            | 0.208      | 0.207      | 0.208     | 64.12              |
| 2                           | 0.246            | 0.246      | 0.247      | 0.246     | 57.67              |
| 3                           | 0.269            | 0.268      | 0.268      | 0.268     | 53.87              |
| 4                           | 0.303            | 0.304      | 0.303      | 0.303     | 47.97              |
| 5                           | 0.316            | 0.317      | 0.318      | 0.317     | 45.23              |

ตารางผนวกที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ  
ปลูกพืช (หญ้าแฝก) ระยะเวลาทุกสัปดาห์

| ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์) | ร้อยละของการบำบัด |
|--------------------------|-------------------|
| 1                        | 40.45             |
| 2                        | 35.49             |
| 3                        | 35.89             |
| 4                        | 30.76             |
| 5                        | 30.21             |

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                                |                                                                                         |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ – นามสกุล                 | นายณนทวัชร สิริพัฒน์นันท์                                                               |
| วัน เดือน ปี ที่เกิด           | 28 พฤศจิกายน 2531                                                                       |
| สถานที่เกิด                    | จังหวัดราชบุรี                                                                          |
| ประวัติการศึกษา                | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรและสิ่งแวดล้อมศึกษา)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน |
| ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน   | -                                                                                       |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน           | -                                                                                       |
| ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ | -                                                                                       |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ           | -                                                                                       |