



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบ
หญ้ากรองน้ำเสีย โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและ
กระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง

Improvement of Color and COD Removal Efficiency of Constructed Wetland and
Grass Filtration System by Utilizing Lignite Fly Ash in Activated Sludge Treated
Pulp and Paper Industry Wastewater

نامผู้วิจัย นางสาวสฤทัย แสนสม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหญ้ากรองน้ำเสีย
โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ
ที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง

Improvement of Color and COD Removal Efficiency of Constructed Wetland and
Grass Filtration System by Utilizing Lignite Fly Ash in Activated Sludge
Treated Pulp and Paper Industry Wastewater

โดย

นางสาวสหฤทัย แสนสม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

สหุทัย แสนสม 2557: การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำ
เทียมและระบบหลุมกรองน้ำเสีย โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิต
เยื่อและกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศุภณัฐา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. 82 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียของ
โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง โดยใช้ถ้ำลอย
ลิกไนต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่
ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ จากการทดลองแบบเบดซ์ พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัมต่อ
น้ำเสีย 50 มิลลิลิตรและเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี(72.58%)และซีโอดี
(60.76%) ได้ดีที่สุด อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์กับดินที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัด
ที่ดีที่สุดคือ 1:20 และจากการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5
เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร บรรจุกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราวยละเอียด
2.8 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินอัตราส่วน 1:20 สูง 16.5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นการจำลอง
พื้นที่เพาะปลูกของระบบหลุมกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและ
พัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (LERD) การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุด คือ
ชุดที่ 1 เป็นการเลียนแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบหลุมกรองน้ำเสีย โดยเก็บน้ำหลังจากแช่ถังไว้ 5 วัน
และปล่อยแห้ง 2 วัน ขณะที่การทดลองชุดที่ 2 เป็นการเลียนแบบระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
โดยการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆครึ่งชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ระบบหลุมกรองน้ำเสียให้
ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่า นอกจากนั้นเมื่อทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการ
กรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก(Filtrated Lysimeter Techniques) โดยใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยม
ขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ที่บรรจุวัสดุปลูกเช่นเดียวกับการทดลองแบบคอลัมน์ พร้อมกับการ
ปลูกพืช 2 ชนิด พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียทั้งสองให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และหญ้าแฝกให้
ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่ากกกลม

Saharuethai Sansom 2014: Improvement of Color and COD Removal Efficiency of Constructed Wetland and Grass Filtration System by Utilizing Lignite Fly Ash in Activated Sludge Treated Pulp and Paper Industry Wastewater. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 82 pages.

This research was to investigate the removal efficiency of color and COD from activated sludge treated Pulp and Paper industry wastewater by lignite fly ash as adsorbent. Lignite fly ash is generated as a residue of lignite coal combustion in process for pulp and paper production. The batch experiments were carried out and found that lignite fly ash 5 g. per 50 ml. of wastewater and 4 hr. of contact time that gave maximum removal percentage of color(72.58%) and COD (60.76%). The ratio by weight of lignite fly ash to soil at 1:20 was the best efficiency. The experiments were also carried out on a continuous basis in a glass column (5 cm i.d. x 30 cm.L.) 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 at 16.5 cm. constructing as the grass filtration and the constructed wetland system of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project (LERD). Two sets of experiments ,set 1 was designed as the grass filtration wastewater treatment system by collecting the wastewater which passed through the column after filled in the column for 5 days then let growing material dried for 2 days. While the experiments set 2 was designed as the constructed wetland wastewater treatment system by every 0.5 hr. after the wastewater passed through the column was collected to examine. The results indicated that the grass filtration(exp.set 1) had higher color and COD removal efficiency than the constructed wetland. Furthermore,the filtrated lysimeter technique were conducted in square plastic tank with size 51x51x54 cm. that containing the growing material as the column experiment and growing *Cyprinus alternifolius* and *Vetiveria zizanioides* found that the efficiency of the two wastewater treatments system were similar and *Vetiveria zizanioides* had higher color and COD removal efficiency than *Cyprinus alternifolius*.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์คณิดา ตังคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำและสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและคำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ตลอดจนขอขอบพระคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณคณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้และขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท คณะสิ่งแวดล้อม รุ่น 35 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวแสนสม ที่คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้อบรม สั่งสอนและคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษามาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สหฤทัย แสนสม

พฤศจิกายน 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	63
ภาคผนวก	67
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขั้นตอนการฟอกเชื้อ (Bleaching Sequences) และสารเคมีที่ใช้	4
2	ผลการสำรวจระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเชื้อและกระดาษ	10
3	องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์	28
4	คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ	44
5	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดควบคุม	59
6	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบหมุนำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	60
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์	68
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดีกับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์	68
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับระยะสัมผัส(ชั่วโมง)	69
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส(ชั่วโมง)	69
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับระยะเวลาสัมผัส(วัน)	69
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส(วัน)	70
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับปริมาณดิน	70
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดีกับปริมาณดิน	70
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสี ของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	71
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดี ของเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	71
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์	71
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)	72
13	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่าน การบำบัด(ชั่วโมง)	73
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ ที่ผ่านการบำบัด(ชั่วโมง)	73
16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	74
17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	74
18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา เก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	75
19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของการใช้ดินอย่างเดียวกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	75
20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	76
21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของเถาลอยลิกในต้นผสมดิน กับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	76
22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา เก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	77
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	77
24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกในต้นผสมดิน กับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	78
25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของเถาลอยลิกในต้นผสมดิน กับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	78
26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา เก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีของการใช้ดินอย่างเดียวกั บระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชกกกลม	79
28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีของเถาลอยลิกในดินผสมดินกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	80
29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีของเถาลอยลิกในดินผสมดิน กับระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	80
30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา เก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	81
31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีของการใช้ดินอย่างเดียวกับ ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เครื่องบดเชื้อ	5
2 ชุดลูกอบแบบ Multi Dryer	6
3 เครื่องทำแผ่นกระดาษแบบ Cylinder	7
4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด	11
5 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	16
6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	19
7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	20
8 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	21
9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	22
10 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	23
11 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	23
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	24
13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	25
14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	26
15 ลักษณะของ Break Through Point	27
16 ลักษณะโครงสร้างของถ้ำลอยลิกไนต์ ถ้ำถ่านหินรูปร่างกลม (ก.) ถ้ำถ่านหินกลวง (ข.) ถ้ำถ่านหินรูปร่างพูน (ค.)	29
17 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบวิธีหลุมกรองน้ำเสีย	30
18 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	31
19 คอลัมน์บรรจุวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหลุมกรองน้ำเสีย	39
20 กระบะบรรจุชั้นวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหลุมกรองน้ำเสีย	40
21 ถ้ำลอยลิกไนต์	42
22 กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์	43
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีและซีไอดีกับปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีและซีไอดีกับระยะเวลาสัมผัส เป็น ชั่วโมง (ก.) และวัน (ข.)	46
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์(ก.)และ ไอโซเทอร์มของฟรุนดิช(ข.)	47
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีและซีไอดี กับปริมาณดิน	49
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีและซีไอดีกับปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ	50
28	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีและซีไอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำใน คอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)	51
29	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีและซีไอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำใน คอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(ชั่วโมง)	52
30	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.) ระหว่างการใช้ดินและ ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกกกกลม	53
31	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.) ระหว่างการใช้ดินและ ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	54
32	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.)ระหว่างการใช้ดินและ ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกครึ่งชั่วโมงร่วมกับการปลูกกกกลม	56
33	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.)ระหว่างการใช้ดินและถ้ำ ลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกครึ่งชั่วโมงร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก	57

**การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
และระบบหน่วยกรองน้ำเสีย โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ
และกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง**

**Improvement of Color and COD Removal Efficiency of Constructed Wetland and
Grass Filtration System by Utilizing Lignite Fly Ash in Activated Sludge Treated
Pulp and Paper Industry Wastewater**

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีกำลังการผลิตมาก ซึ่งกระบวนการในการผลิตกระดาษในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีการใช้น้ำในปริมาณมาก จึงส่งผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากตามมา โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษจะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งเกิดขึ้นจากสารเคมีที่ใช้กระบวนการฟอกขาวเยื่อ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง(Activated Sludge) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดี แต่ก็ยังพบปัญหาในเรื่องของสีและซีโอดีที่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดและเมื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลด้านลบต่อสิ่งแวดล้อมรอบพื้นที่โรงงานได้

การศึกษานี้มีแนวคิดที่จะบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง โรงงานกระดาษ SCG โดยใช้วิธีการบำบัดทางธรรมชาติ โดยการผ่านน้ำเสียไปยังแปลงพืชซึ่งพืชที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ กกกลมและหญ้าแฝกผ่านระบบเทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก (Filtrated Lysimeter Technique) โดยมีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวดูดซับที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดในระบบ ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยทางโรงงานกระดาษ SCG จะมีปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์มากถึง 49,000 ตัน/ปี โดยทั่วไปเถ้าลอยลิกไนต์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการฝังกลบหรือเป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เหลืออยู่เป็นจำนวนมากที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ การทดลองนี้จึงถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นและยังถือเป็นการช่วยพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติช่วยธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพสามารถลดค่าความสกปรกต่างๆ ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับระบบห้ำ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
2. เพื่อศึกษาอัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมในแปลงปลูกพืช เพื่อนำไปปรับใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก(Filtrated Lysimeter Technique)
3. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการบำบัดน้ำเสีย โดยการนำถ้ำลอยลิกไนต์มาเป็นตัวดูดซับ

การตรวจเอกสาร

1. กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

กรรมวิธีการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระบวนการผลิตกระดาษ

1.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ

เพื่อเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อ หลักการคือ การแยกสิ่งเจือปนออกและแปรรูปให้มีขนาดพอเหมาะ มีขั้นตอนคือ

1.1.1 การลอกเปลือกไม้ (Debarking) การที่ต้องลอกเปลือกไม้ก่อนเนื่องจากในส่วนเปลือกนั้นมีปริมาณไฟเบอร์อยู่น้อยและมีสารต่างๆปนอยู่มากอันจะทำให้สีของกระดาษสกปรกได้ ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ต้มเพื่อแปรสภาพเป็นเยื่อ

1.1.2 การสับชิ้นไม้ (Chipping) หลังจากลอกเปลือกไม้แล้วตัดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ น้ำยาแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ทั่วถึงตลอดเวลาที่ต้มเยื่อ

1.1.3 การคัดขนาด (Screening) ชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกแยกออกด้วยเครื่องคัดขนาด และเอาส่วนที่เป็นผงหรือมีขนาดเล็กกว่าและขนาดโตกว่ามาตรฐานออก สำหรับชิ้นไม้ที่ได้ขนาดจะถูกส่งไปยังหม้อต้มเยื่อต่อไป

1.2 กระบวนการฟอกเยื่อ (Pulp Bleaching Process)

การฟอกเยื่อทำหลังจากกระบวนการผลิตเยื่อจุดประสงค์หลักของการฟอกเยื่อ คือ เพื่อเพิ่มความขาวของเยื่อที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตกระดาษพิมพ์และเขียน และในการทำให้ขาวขึ้นต้องไม่ทำลายความแข็งแรงของเยื่อแบ่งเป็น 2 วิธีคือ วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออกและวิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (Bleaching Lignin) การทำให้เยื่อมีความขาวสว่างขึ้นนั้นทำได้โดยการแยกลิกนินออกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนินขั้นตอนในการฟอกเยื่อมีหลายวิธีเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอกและขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการฟอกเยื่อและสารเคมีที่ใช้

สารเคมี	สัญลักษณ์	เรียกชื่อขั้นตอนการฟอก
Chlorine	C	ขั้นคลอรีเนชัน (Chlorination Stage)
Sodium Hydroxide	E	ขั้นแอ็กเทร็คชั่น (Extraction Stage)
Calcium Hypochlorite	H	ขั้นไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite Stage)
Chlorine Dioxide	D	ขั้นคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorinedioxide Stage)
Hydrogen Peroxide	P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Stage)
Oxygen	O	ขั้นออกซิเจน (Oxygen Stage)
Ozone	Z	ขั้นโอโซน (Ozone Stage)
Acid	A	ขั้นแอซิด (Acid Stage)

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2546)

1.3 การเตรียมน้ำเยื่อ

มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือเพื่อพัฒนาศักยภาพของเส้นใยโดยนำเยื่อไปบดและปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.3.1 การกระจายเส้นใย(Defibering) กระจายเยื่อเพื่อให้เส้นใยแยกเป็นอิสระในน้ำ โดยเครื่องมือที่เรียกว่า ไฮดร่าพัลพ์เพอร์(Hydrapulper)

1.3.2 การบดเยื่อ(Refinding) เพื่อให้เส้นใยแตกแขนงเป็นการเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใยให้สูงขึ้นเครื่องมือที่ใช้เรียกว่า รีไฟเนอร์(Refiner)



ภาพที่ 1 เครื่องบดเชื้อ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.3.3 การผสมน้ำเชื้อ(Blending) เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมเชื้อที่ผ่านการบดแล้ว โดยผสมในถังใบพัดกวนเชื้อถูกเก็บในถังที่เรียกว่า แมชชีนเชสต์(Machine Chest)

1.3.4 การแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำเชื้อ(Screening and Cleaning) เป็นการคัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยออกแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความสะอาดที่เรียกว่า เซนตริฟิวต์ คลีนเนอร์ (Centrifugal Cleaner)

1.3.5 การควบคุมความเข้มข้นของน้ำเชื้อ (Consistency Regulator) เพื่อควบคุมให้น้ำเชื้อข้นคงที่

1. 4 กระบวนการผลิตกระดาษ (Paper Machine Process)

หลังการผสมน้ำเชื้อแล้ว น้ำเชื้อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกันเรียกว่า เว็บเปเปอร์(Web Paper) ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ได้แก่

1.4.1 ถังจ่ายเชื้อ(Head Box) ทำหน้าที่จ่ายน้ำเชื้อเข้าสู่ตะแกรงเหล็ก

1.4.2 ตะแกรงลวดเดินแผ่น (Wire Section หรือ Forming Section) ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการ คือ การก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรองและแยกน้ำออก แผ่นเปียกที่ออกจากส่วนนี้มีน้ำอยู่ 80 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกดกระดาษ ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียกทำให้เกิดการยึดแน่นภายในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ออกจากส่วนนี้มีน้ำอยู่ประมาณ 55-60 เปอร์เซ็นต์

1.4.3 ส่วนอบกระดาษ(Drying Section) มีลูกอบให้ความร้อนกับกระดาษทำให้กระดาษแห้ง กระดาษที่ออกจากส่วนนี้มีความชื้นประมาณ 2-4 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2 ชุดลูกอบแบบ Multi Dryer

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

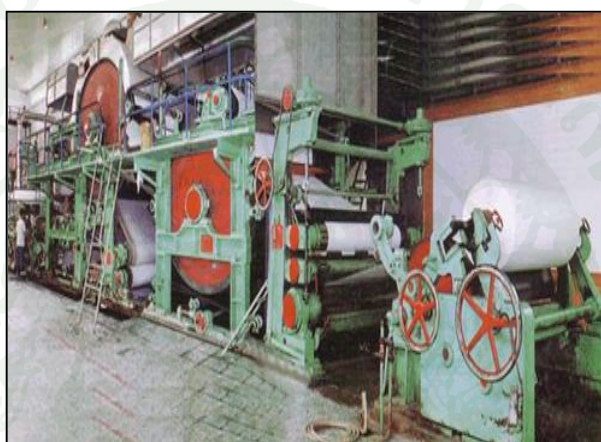
1.4.4 ส่วนรีดเรียบกระดาษ(Calendering Section) ทำหน้าที่ปรับแผ่นกระดาษให้เรียบและมีเนื้อแน่นขึ้น

1.4.5 ส่วนพับกระดาษเข้าม้วน(Winding Section) ทำหน้าที่นำกระดาษเข้าม้วน

1.5 การปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะเดินแผ่น

การปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะเดินแผ่นทำได้ 2 แบบ คือ

1.5.1 การปรับปรุงผิวกระดาษ (Surface Modification) กระดาษเมื่อผ่านลูกอบแห้งแล้วจะเข้าสู่ส่วนรีดกระดาษเพื่อปรับปรุงกระดาษให้เรียบขึ้นและเพิ่มความหนาแน่นของเนื้อกระดาษ ส่งผลให้กระดาษบางลง นอกจากการปรับปรุงผิวกระดาษที่ส่วนนี้ยังสามารถทำการปรับปรุงผิวกระดาษในขณะที่เดินแผ่นด้วยการฉาบบนผิวกระดาษ (Surface Sizing) ซึ่งจะทำการก่อนที่เข้าลูกอบกระดาษโดยใช้น้ำแป้งฉาบบนผิวกระดาษ ทำให้ผิวกระดาษแข็งแรงสามารถต้านทานการขูดขีดหรือการถูกดึงฉีกกระดาษได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมากสำหรับกระดาษที่ใช้พิมพ์ กระดาษที่ผ่านการปรับปรุงลักษณะนี้ ได้แก่ กระดาษออฟเซต



ภาพที่ 3 เครื่องจักรทำแผ่นกระดาษแบบ Cylinder

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2552)

1.5.2 การเปลี่ยนรูปร่างและม้วนกระดาษ (Physical Modification) เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่างของม้วนกระดาษในขณะที่เดินแผ่น เพื่อให้เหมาะสมกับม้วนขนาดที่ลูกค้าต้องการ โดยการคลายม้วน (Rewinding) และตัดเป็นแผ่น (Sheeting) (สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม โรงงาน, 2546)

2. มลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษ

2.1 น้ำเสีย

โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมีที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิต น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนย่อยต่างๆ คือ แช่เชื้อ ต้มเชื้อ ฟอกเชื้อและย้อมสีเชื้อ โดยเฉพาะน้ำฟอกเชื้อและย้อมสีเชื้อ จะมีปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นของสีสูง

2) น้ำที่ใช้ในการล้างเชื้อจะใช้น้ำในปริมาณมากโดยน้ำในส่วนนี้จะมีสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

2.1.2 น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน เป็นน้ำที่ใช้ทำความสะอาดโรงงาน ส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของสารทำความสะอาดและสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น น้ำมัน จากเครื่องจักรในโรงงาน ดิน ทราย เป็นต้น (นนทพษ์, 2548)

2.2 สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เกิดจากลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินและโพลีเมอร์ของแทนนิน ซึ่งลิกนินเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และเป็นสารในองค์ประกอบหลักของพืชทุกชนิด โดยลิกนินพบมากในผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืช หน้าที่ทางกายภาพของสารประกอบลิกนินเป็นสารสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของเนื้อไม้ โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของลิกนินในพืชชนิด (อัมไพวรรณ, 2550)

2.3 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี

การวิเคราะห์หาค่าของ COD ใช้สำหรับประมาณปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไป โดยที่สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์โดยปริมาณที่มากเกินพอของสารเคมีประเภทออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไดโครเมต($K_2Cr_2O_7$) ในสภาพของความเข้มข้นเป็นกรด ในอุณหภูมิที่สูงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Silver Sulfate โดยทั่วไปแล้วค่าของ COD จะมีค่ามากกว่าค่าของ BOD_5 เสมอและใช้เวลาในการหาประมาณ 3 ชม. ซึ่งรวดเร็วกว่าการหาค่า BOD และปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธี

ทางชีวภาพ หรือกล่าวได้ว่า 20 ปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในเทอมของ COD เป็นการวัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทั้งที่ย่อยสลายได้ ย่อยสลายได้ช้า และย่อยสลายไม่ได้ด้วยจุลินทรีย์) เช่น กลูโคส ลิกนิน และเซลลูโลส น้ำมัน ไขมันจากเนย พืชและสัตว์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์อื่น ๆ เช่น เฟอร์ริอออน (Fe^{2+}), แมงกานีสอออน (Mn^{2+}), คลอไรด์อออน (Cl^-), ซัลไฟด์อออน (S^{2-}) สารประกอบในรูปคอลลอยด์ที่แขวนลอยและสารละลายในน้ำเสียของสารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในขณะที่ BOD เป็นการวัดสารอินทรีย์เฉพาะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เท่านั้น การที่ค่า COD สูงกว่า BOD เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยไม่ต้องอาศัยการดูดซึมทางชีวโดยจุลินทรีย์ เช่น เซลลูโลสและลิกนินจะถูกออกซิไดส์อย่างแรง และถ้ามีสารที่ไม่สามารถถูกย่อยทางชีวอยู่ด้วย เช่น เซลลูโลส จะทำให้ค่า COD ยิ่งสูงกว่าค่า BOD มากขึ้น (พรัตน์, 2547)

3. กระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษและกระดาษมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต จากผลการสำรวจพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ 4 ตัวของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัด คือ ความเป็นกรดด่าง ปริมาณสารแขวนลอย บีโอดี และซีโอดี เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจึงมุ่งเน้นไปที่ การปรับพีเอชของน้ำเสีย ลดปริมาณสารแขวนลอย เช่น เสีนไฮ เป็นต้น การลดสารที่ช่วยเพิ่มค่าบีโอดีและซีโอดีในน้ำซึ่งได้แก่ ลิกนิน แซคคารินจากเปลือกไม้ รวมทั้งการลดเรื่องสีและสารไดออกซิน จากการสำรวจพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเป็นระบบตะกอนเร่ง(Activated Sludge) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานเยื่อและกระดาษ

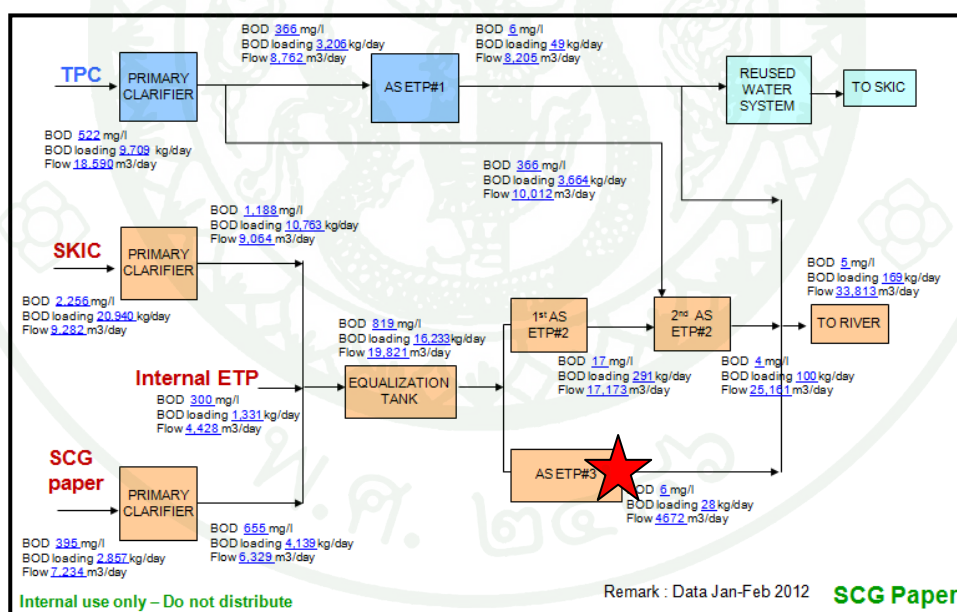
ผลิตภัณฑ์	ประเภทระบบบำบัด	ประสิทธิภาพ (%)	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน)
1. เยื่อกระดาษฟอกจากยูคาลิปตัส	ระบบตะกอนเร่ง	94.5	9,000
2. เยื่อกระดาษฟอกขาวกระบวนการซัลเฟต	ระบบตะกอนเร่ง	98.47	24,000
3. เยื่อขานอ้อยฟอกขาว เยื่อขานอ้อยไม่ฟอกเยื่อขานอ้อยและยูคาลิปตัสกึ่งเคมี	การบำบัดขั้นต้น ระบบตะกอนเร่ง	99.4	8,850
4. กระดาษพิมพ์เขียน	ระบบบ่อหมัก บ่อเติมอากาศ บ่อฝัງ	67	4,000
5. กระดาษพิมพ์เขียน	ระบบตะกอนเร่ง	93.4	4,000
6. กระดาษกราฟฟ้านขนาดเล็ก	ระบบบ่อหมัก บ่อเติมอากาศ บ่อฝัງ	83.72	900
7. กระดาษแข็งเคลือบเปลือก	ระบบบ่อหมัก บ่อเติมอากาศ บ่อฝัງ	66.66	1,175
8. กระดาษกราฟฟท์และกระดาษลูกฟูก	ถังไร้อากาศ ระบบตะกอนเร่ง	95.5	3,500
9. กระดาษกล่องเคลือบผิวขาว	ระบบตะกอนเร่ง	98.48	7,000
10. กระดาษอนามัยขนาดกลาง	ระบบตะกอนเร่ง กรองทราย	98.57	1,400
11. กระดาษอนามัย เช่น กระดาษชำระ	ระบบบ่อหมัก บ่อเติมอากาศ บ่อฝัງ	98.5	1,200
12. กระดาษหนังสือพิมพ์	ระบบตะกอนเร่ง บ่อฝัງ	97.12	10,500
13. เยื่อใยสั้นฟอกกระดาษพิมพ์เขียน	ระบบตะกอนเร่ง	98	23,000

ที่มา: สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2542)

4. บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด เป็นหนึ่งในกลุ่มโรงงานกระดาษ SCG บ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กลุ่มโรงงาน ได้แก่ Thai Paper (TPC), Siam Kraft Industry (SKIC) และ SCG Paper ซึ่งมีอัตราการผลิตน้ำเสียต่อวัน เท่ากับ 18,590.0, 9,282.0 และ 7,234.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับและมีความสกปรกในรูปบีโอดีเท่ากับ 522.0, 2,256 และ 395.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยน้ำเสียจะถูกรวบรวมมายังถังปรับเสถียร (Equalization Tank; EQ) เพื่อปรับความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย จากนั้นน้ำเสียจะถูกสูบไปยังระบบบำบัดน้ำเสียแบบระบบตะกอนเร่งซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดบีโอดีให้ลดลงเหลือ 6 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้วจึงปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด, 2556)

4.1 ระบบบำบัดน้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”



ภาพที่ 4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

หมายเหตุ: ★ คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัด

ที่มา: บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556)

5. กระบวนการดูดซับ

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

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทรและแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

5.1 กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

5.1.1 การแพร่ภายนอก(External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

5.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

5.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว(Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นการคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

5.2 รูปแบบของการดูดซับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

5.2.1 การดูดซับทางกายภาพ(Physisorption or Physical Adsorption or Van Der Waals Adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย(London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต(Electrostatic Force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น(Multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับและระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น

5.2.2 การดูดซับทางเคมี(Chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน(สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน(สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผัน

กลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

5.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

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

5.3.2 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายใน ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

5.3.3 อัตราเร็วการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม(Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง(Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกววนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

5.3.4 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

5.3.5 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

5.3.6 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอีกเลย

5.4 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

5.4.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์และแอคติเวเตดซีลีตา(Zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

5.4.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตร/กรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ

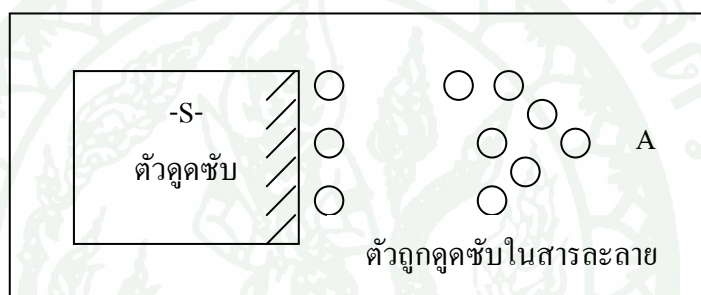
5.4.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

5.4.4 วัสดุชีวภาพ(Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น จีเลื้อย ไคโตซาน กาแฟที่ใช้แล้ว ชาและชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว เปลือกไม้ ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

5.4.5 สารดูดซับชีวภาพ(Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรียยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

5.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

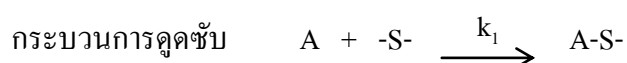
ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้น เริ่มต้นเป็น C_0 โมล/ลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

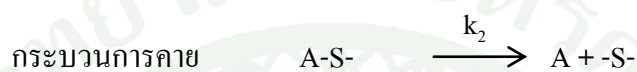
$(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



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 $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัมหรือ กิโลกรัม

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร

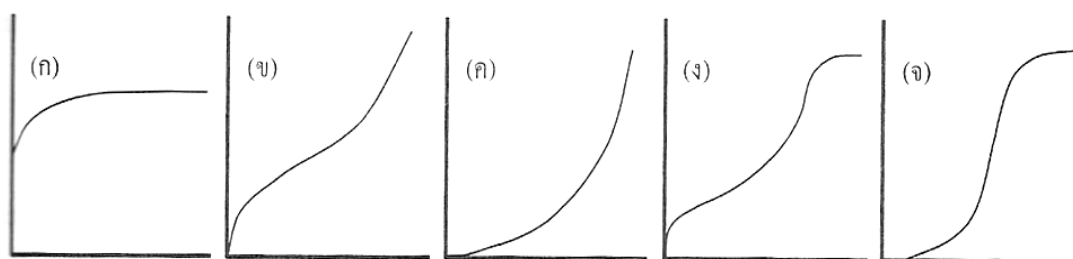
C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร

5.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้อารมณ์แบบพื้นฐานของ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550) อ้างถึง Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 6 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

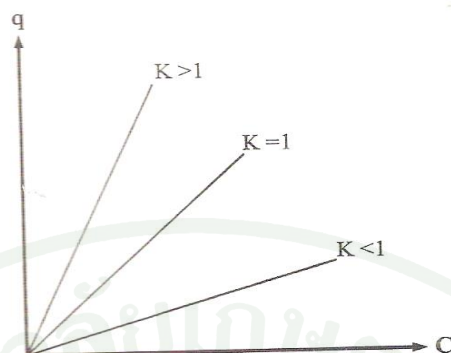
5.6.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C จะได้

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

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ ดังภาพที่ 7

150



ภาพที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

5.6.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

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

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้บอกลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

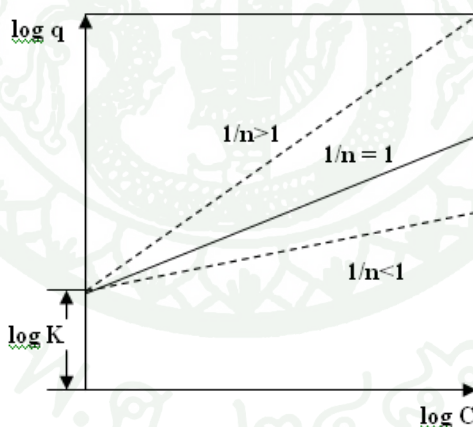
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

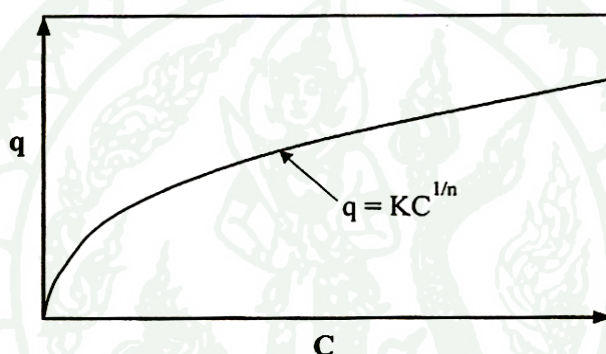
ที่มา: นิพนธ์และคณิตา (2550)

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

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

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

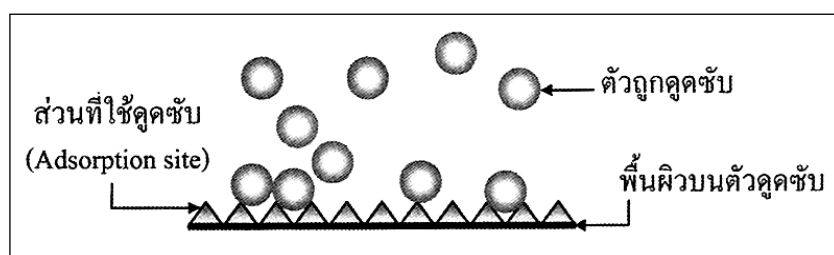
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (9) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

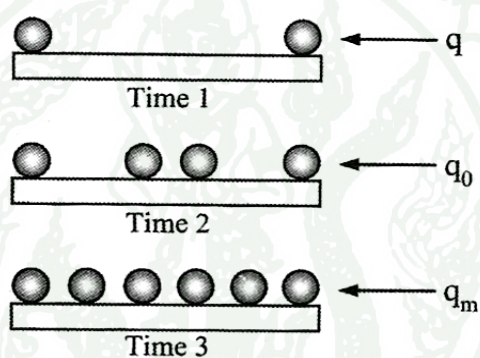
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

5.6.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการช้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีโอกาสเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวดูดซับ พื้นผิวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 11 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

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

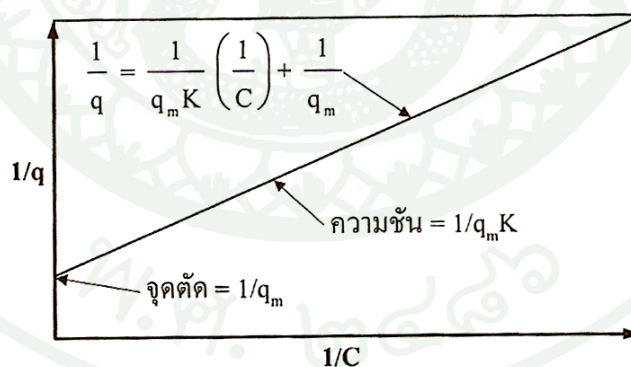
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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

$\frac{1}{K q_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)

5.6.4 สมการดูดซับแบบเบท(Brunauer Emmett Teller หรือ BET Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett and Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้

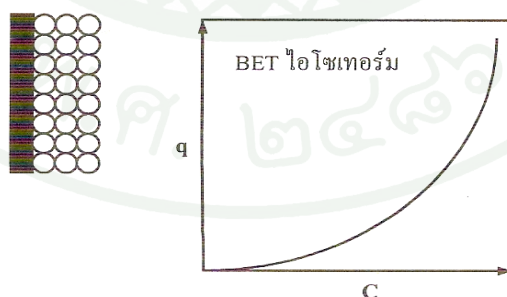
- (1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-Layer Adsorption)
- (2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- (3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- (4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



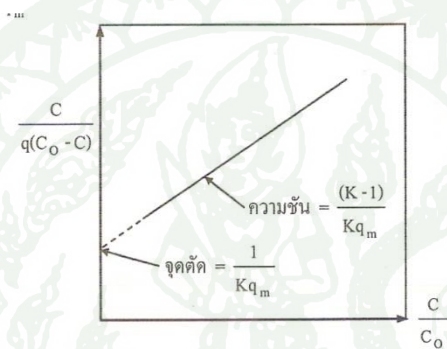
ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ 8 ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

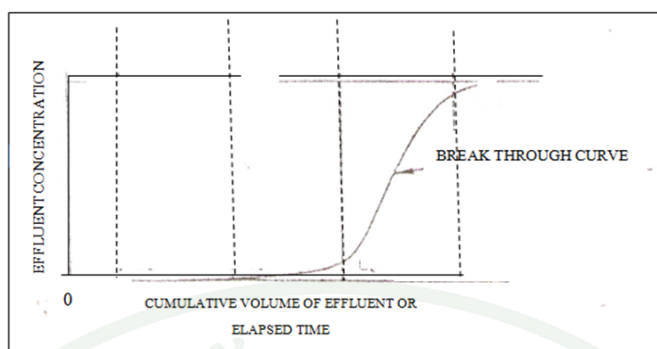
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับ ค่า $\left(\frac{C}{C_0} \right)$ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\frac{K-1}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์และคณิตา (2550)

การทดลองแบบไหลต่อเนื่อง เป็นการทดลองเพื่อหาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ ที่มีความเป็นไปได้ในการดูดซับตัวถูกดูดซับก่อนจะหมดประสิทธิภาพ โดยที่การทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง เมื่อตัวถูกดูดซับไหลผ่านตัวดูดซับ ตัวดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพการดูดซับก่อน และชั้นของตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามเวลาการใช้งาน หลังจากนั้นความเข้มข้นจะถึงค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ เรียกจุดนี้ว่า จุดเบรคทรูจ (Break Through Point) และเส้นโค้งดังภาพที่ 15 เรียกว่า เส้นโค้งเบรคทรูจ (Break Through Curve) โดยเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคทรูจ เรียกว่า เวลาการใช้งาน โดยที่เวลาการใช้งานของตัวดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ อัตราการไหลแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับและเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกจุดนี้ว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaustion Point)



ภาพที่ 15 ลักษณะของ Break Through Point

ที่มา: นิพนธ์และคณิตา (2550)

6. ถ้ำลอยลิกไนต์

6.1 สภาพของถ้ำลอยลิกไนต์

ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ออกซิเจนในอากาศเกิดการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด โดยถ้ำลอยลิกไนต์จะมี 2 สภาพ คือ

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

6.1.2 ถ้ำลอย(Fly Ash ,Pulverized Fuel Ash หรือ Dry Ash) เป็นถ้ำที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ถ้ำจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดไปสู่ปล่องควัน และถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บถ้ำปริมาณของถ้ำหนักและถ้ำลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ถ้ำลิกไนต์จะมีประมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักถ้ำหินที่เผา (วิจิตอำจนา, 2536)

6.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

จากการส่งตัวอย่างของเถ้าลอยลิกไนต์ไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่า ในเถ้าลอยลิกไนต์ประกอบด้วย ซิลิกอนออกไซด์ร้อยละ 40.89 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 14.54 โดยน้ำหนัก อะลูมินัมออกไซด์ร้อยละ 10.33 โดยน้ำหนักและองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

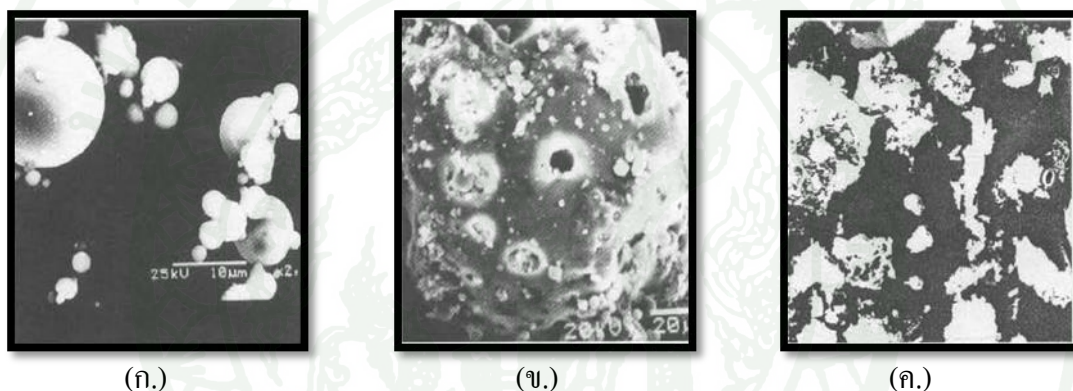
องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	40.89
CaO	14.54
Al ₂ O ₃	10.33
SO ₃	2.71
K ₂ O	2.25
MgO	2.08
MnO	0.39
Fe ₂ O ₃	18.79
P ₂ O ₅	0.57
TiO ₂	0.48
LOI	0.35

หมายเหตุ LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: วรวิทย์ และคณะ (2553)

6.3 ลักษณะรูปร่างของเถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย

รูปร่างของเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ ลักษณะทั่วไปจะเป็นรูปทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (0.001 มม.) จนถึง 0.15 ไมโครเมตร ซึ่งจะพบว่าเถ้าถ่านหินโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นทรงกลมตัน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่อาจมีเถ้าถ่านหินขนาดเล็กๆ อยู่ภายใน เรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Cenosphere) ซึ่งมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำได้และเถ้าถ่านหินอีกลักษณะหนึ่งคือ เถ้าถ่านหินที่มีรูปร่างเหลี่ยมและพรุน ส่วนใหญ่นำไปผสมเพื่อทำคอนกรีต และคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินชนิดนี้ต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมมากขึ้นซึ่งทำให้กำลังของคอนกรีตตกลงได้ (ธีรวัฒน์, 2554)



ภาพที่ 16 ลักษณะโครงสร้างของเถ้าลอยลิกไนต์ เถ้าถ่านหินรูปร่างกลม (ก.) เถ้าถ่านหินกลวง (ข.) และเถ้าถ่านหินรูปร่างพรุน (ค.)

ที่มา: ธีรวัฒน์ (2554)

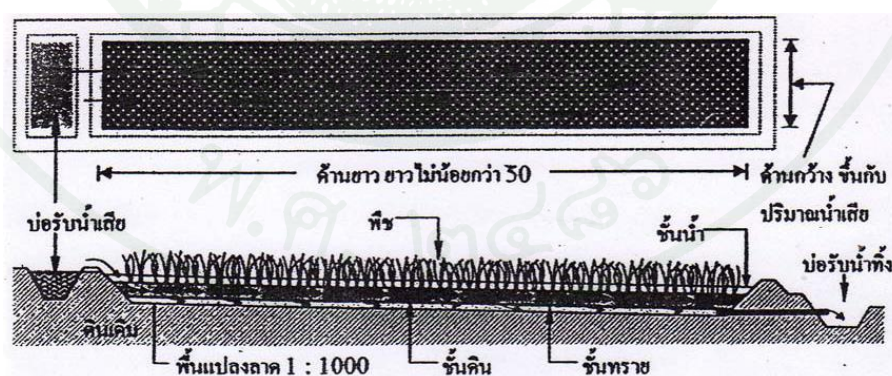
7. เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติ

7.1 การบำบัดด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญ้ากรองเป็นการนำหลักการของการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำมาประยุกต์ใช้ โครงสร้างของระบบแปลงหญ้ากรองน้ำเสียสร้างเพื่อเลียนแบบธรรมชาติ โดยสร้างคันดินสูงประมาณ 1 เมตร พื้นดินเป็นดินอัดแน่นและรองพื้นด้วยทรายหยาบสูง 20 เซนติเมตร ให้มีอัตราส่วนความชัน 1: 1,000 เพื่อให้น้ำไหลในอัตราที่เหมาะสม ดินที่ใช้ส่วนบน

เป็นดินผสมทรายในอัตราส่วนดิน:ทราย เท่ากับ 3:1 ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการยึดเกาะของหญ้า นำหญ้ามารปลูกให้เจริญเติบโตในระดับที่เหมาะสม น้ำเสียจะถูกบำบัดเมื่อไหลผ่านตัวกลาง คือ ดิน และหญ้า รากหญ้าจะทำหน้าที่เป็นแผ่นตัวกลางให้แบคทีเรียเกาะเป็นตัวกรอง และยังทำหน้าที่ดูดซึมสารปนเปื้อนต่างๆในน้ำเสีย(เกรียงศักดิ์, 2539) ดังภาพที่ 17

รูปแบบเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสียได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้นโดยยึดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและหรือทำบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสีย และปลูกพืชที่ผ่านการคัดเลือกว่าเหมาะสม 3 ชนิด คือ ฐูปฤณี กกกลม(จันทบูร)และหญ้าแฝก อินโดนีเซียช่วยในการบำบัดน้ำเสีย อาศัยการกรองน้ำเสียขณะที่ไหลผ่านแปลงหญ้าและการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดินเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจะมีลักษณะการให้น้ำเสียหรือระบบระบายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ คือระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ 5 วันและปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง 2 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์ในดินมีโอกาสดักจับตัว และระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบโดยปล่อยระบายน้ำทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยจากการศึกษาของ Kadlac(1962) พบว่า ในช่วงที่น้ำแห้งจะก่อให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารต่างๆที่กักตุน ในขณะที่ธาตุอาหารเหล่านั้นจะไม่เป็นประโยชน์กับพืชเลยภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังอย่างถาวรและอยู่ในสภาพไร้ออกซิเจน การที่น้ำท่วมขังสลับกับการที่แห้งจะเหมาะสมกับพืชบางชนิด และยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตอื่น

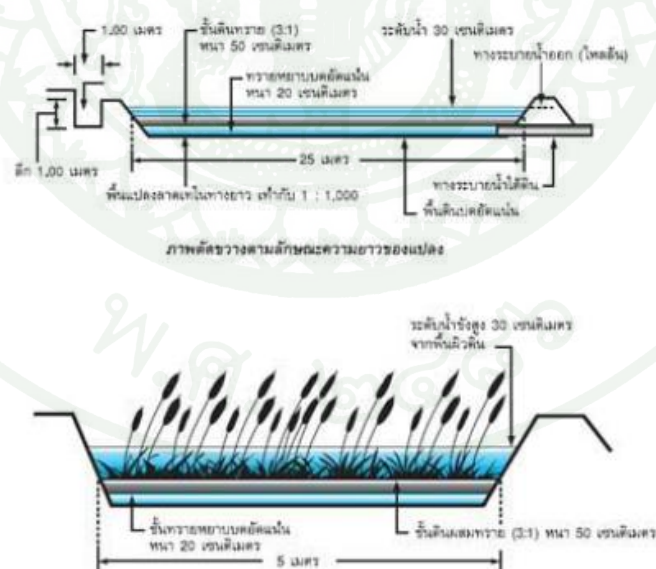


ภาพที่ 17 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบวิธีหญ้ากรองน้ำเสีย

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)

7.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

รูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้นได้ยึดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและ/หรือทำบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่รวบรวมได้จากชุมชน และปลูกพืชน้ำที่ผ่านการคัดเลือกแล้วว่าเหมาะสมที่สุด 2 ชนิด คือ กกกลม(กกจันทบูรณ) และ ฤๅษี ช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และระยะเวลาการกักพักเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะการให้น้ำเสีย หรือระบายน้ำเสีย 2 ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ในระดับหนึ่งและมีการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง(ระบบเปิด) น้ำเสียใหม่เข้าไปดันน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบให้ไหลเส้นทางระบายน้ำ และ/หรือทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีระยะเวลาในการกักพักน้ำเสีย 1 วัน เมื่ออายุของพืชครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดพืชนั้นออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับพืชได้ ซึ่งรูปแบบโดยสังเขปของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ลักษณะรูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: มุลนิธิชัยพัฒนา (2543)

8. พืชที่ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย

จากการศึกษาของสิทธิชัย(2538) ได้คัดเลือกพืชที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย พบว่า กกกลม แผลกพันธุ์อินโดนีเซีย แผลกศรีลังกา ฐปฤยิ หญ้าโคคลอส หญ้าคอลล่า และหญ้าสตาร์ สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกพืชที่ใช้ในการทดลอง คือ กกกลม(*Cyprnusalternifolius*) และหญ้าแฝก(*Vetiveriazizanioides*)

8.1 กกกลม (*Cyprnusalternifolius*)

กกกลม เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่มีอายุอยู่ได้หลายปี จัดอยู่ในตระกูล Cyperaceae ส่วนใหญ่ขึ้นตามที่ลุ่มชื้นแฉะ หนอง บึง ฯลฯ ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนลำต้นใต้ดิน มีลักษณะเป็นแง่งสั้นๆหรือเหง้าคล้ายขิง มีสีน้ำตาลดำ เรียกว่า Rhizome ส่วนที่สองเป็นลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็กสีน้ำตาล เรียกว่า Stolon บางครั้งลำต้นส่วนนี้จะมียาวขึ้นเป็นทีสะสมอาหารแต่ขยายพันธุ์ และส่วนที่สาม คือ ลำต้นที่เป็นก้านยาว สีเขียวชูขึ้นไปในอากาศ เรียกว่า Arial Stem ปลายสุดเป็นจุดกำเนิดดอก ด้านหน้าตัดขวางจะมีลักษณะกลม กกกลมจึงมีลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆกับดอกเท่านั้นที่เป็นสามเหลี่ยม ลำต้นมีสีเขียวเข้ม เป็นมัน สูง 1-2 เมตร ดอกมีขนาดเล็กเป็นฝอยอยู่รวมกันเป็นช่อดอก เมื่อยังอ่อนจะมีสีเขียว แต่เมื่ออายุมากขึ้นจะเป็นสีน้ำตาลอ่อน ใบประดับของช่อดอกเป็นแผ่นยาวเรียวยาวเกินกว่าความยาวของช่อดอก(สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2535)

สำหรับในประเทศไทย การนำกกกลมมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ ได้มีผู้ศึกษาอยู่มาก ตัวอย่างเช่น การใช้กกกลมมาปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำเพื่อการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบดินร่วมกับการปลูกพืช(สุชาดาและคณะ, 2537) เนื่องจากกกกลมเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตดีและมีโอกาสใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้(Buddhawong, 1996) ได้ทดลองใช้กกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่จังหวัดสกลนคร พบว่า สามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆได้เป็นอย่างดี

8.2 หญ้าแฝก (*Vetiveriazizanioides*)

หญ้าแฝกเป็นพืชตระกูลหญ้าอยู่ในสกุล Vetiveria มีถิ่นกำเนิดจากประเทศอินเดียตอนเหนือและได้แพร่กระจายมาสู่ประเทศเส้นศูนย์สูตร เช่น ศรีลังกา ไทย อินโดนีเซีย เป็นต้น เป็นหญ้าที่มีลักษณะกอเป็นพุ่มใบยาวตั้งตรงสูงขึ้น เป็นกระจุกหนา ไม่มีหนวด เป็นเส้น ไม่มีขน อายุข้ามปี

ไม่มีรากแขนง หน่อดีงจะขึ้นเป็นกอใหญ่จากรากที่เป็นกระจุกใยมือนพองน้ำ มีลำต้นสูง 0.5-1.5 เมตรใบมีลักษณะค่อนข้างแข็ง ยาวและแคบ มีหลังใบโค้งปลายใบแบน ใบมีสีเขียวเข้มเป็นมัน เนื้อใบเนียนแต่ขอบใบหยาบ ช่อดอกยาว 15-40 เซนติเมตร ดอกแคบแหลมเกาะติดกันดอกและไม่มี หนวด หน่อดีงที่อายุประมาณ 1 ปีจะมีรากหยั่งลึกได้ประมาณกว่า 1 เมตรซึ่งในสภาพธรรมชาติ ดินร่วนปนทรายที่มีการระบายน้ำได้ดี หน่อดีงจะให้รากยาวที่สุด(สำนักงาน กปร., 2536)

การใช้ประโยชน์จากแฝงในด้านกรบำบัดน้ำเสีย พบว่า รากของแฝงสามารถดูดซับ น้ำ รักษาความชุ่มชื้นในดินและดูดซับแร่ธาตุอาหารและสารพิษจากสารกำจัดศัตรูพืช ทำให้คุณภาพ น้ำดีขึ้นซึ่งเป็นไปตามการศึกษาของมนพ(2538) พบว่า หน่อดีงพันธุ์อินเดีย บราซิล ศรีลังกาและ อินโดนีเซีย สามารถบำบัดน้ำเสียได้โดยจะดูดซับธาตุอาหารและโลหะหนักบางชนิดที่ปนเปื้อนใน น้ำเสียได้และหน่อดีงเป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวให้อยู่รอดในน้ำเสียได้ดี(Xia *et al.*, 2003)

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ

จุลวรรณ (2544) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการลดสีของน้ำเสียจากโรงงาน ผลิตเยื่อและกระดาษด้วยวิธีการตรึงเซลล์Phanerochaete Chrysosporium ตรึงในเม็ดวุ้นแคลเซียม อัลจินตที่บรรจุในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไคเซนชัน 3 สถานะ หอปฏิกรณ์รูปทรงกระบอกมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรและสูง 2 เมตร น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองหน่วยสีตั้งแต่ 979 ถึง 1,795 หน่วยสี ในหน่วยแพลทินัม-โคบอลต์ สูดเข้าหอปฏิกรณ์ด้วยอัตรา 0.012-0.036 ลูกบาศก์ เมตรต่อชั่วโมง สารที่มีสีที่อยู่ในน้ำเสียถูกทำให้ลดลงโดยใช้เชื้อราที่อยู่ในเม็ดเซลล์ตรึงตลอดความ สูงของหอปฏิกรณ์ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นี้ ได้แก่ อัตราไหลของน้ำเสีย 0.036 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อัตราการเติมอากาศ 0.075 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและอุณหภูมิ 38 องศา เซลเซียส ซึ่งจะให้มีประสิทธิภาพการลดสีเท่ากับ 60.3 เปอร์เซ็นต์

ต่อพงศ์ (2544) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการหาแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนชนิด ที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการบำบัดสี TOC, COD จากโรงงานเยื่อและกระดาษภาย หลังการบำบัดน้ำเสียขั้นตอนที่สองด้วยระบบตะกอนเร่ง แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้ คือ ถ้ำลอย จากปล่องโรงงานผลิตการแสไฟฟ้า อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นวัตถุดิบเหลือใช้และจากวัตถุดิบไม้ ยางและกะลามะพร้าวของบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด สารดูดซับก่อนใช้ทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วเก็บไว้ในโถป้องกันความชื้น พบว่าแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนจากไม้ยางและกะลามะพร้าวให้ผลได้ดีกว่าถ่านลอยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนสูง

Livernoche *et al.* (1983) ได้คัดเลือกเชื้อราเส้นใยสีขาว (White-rot Fungi) ที่มีความสามารถในการลดความเข้มของสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกขาวเยื่อ จากเชื้อราทั้งหมด 15 สายพันธุ์ ซึ่งพบว่ามีเพียง 5 สายพันธุ์ที่แสดงความสามารถในการลดความเข้มของสีได้ ได้แก่ *T.versicolor*, *Phanerochaete*, *chrysosporium*, *Pleurotus*, *ostreatus*, *Polyporus*, *versicolor* และอีกหนึ่งสายพันธุ์ที่ไม่สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ได้ และพบว่าสายพันธุ์ *T.versicolor* มีประสิทธิภาพดีที่สุด

Mehna *et al.* (1995) ใช้ *T.versicolor* ในการลดความเข้มสีของน้ำทิ้งจากโรงงานเยื่อจากของเหลือทิ้งจากการเกษตร พบว่าสามารถลดความเข้มสีได้ 50-62% ภายในระยะเวลา 4-7 วัน

Nabel *et al.* (1974) ได้ทดลองนำโอโซนมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากโรงงานเยื่อและกระดาษ 4 โรงงาน พบว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้และยังลดค่า COD, BOD และค่าความขุ่นได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

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

2. สารเคมี

- 2.1 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) Grade AR
- 2.2 สารละลายอินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferroin) Grade AR
- 2.3 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate; $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) Grade AR
- 2.4 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate (FAS); $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Grade AR
- 2.5 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) Grade AR
- 2.6 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate; HgSO_4) Grade AR
- 2.7 สารละลายเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (FAS) Grade AR
- 2.8 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline monohydrate; $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) Grade AR
- 2.9 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) Grade AR

3. แก๊สลอยลิกไนต์

เป็นแก๊สลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด โดยใช้แก๊สลอยลิกไนต์ที่ได้จากเตาเผาเบอร์ 16 ซึ่งเป็นแก๊สลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผา 100 %

4. วัสดุปลูก

ได้แก่ ดินผสมทราย จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย, กรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด

5. พืชที่ใช้ปลูก ได้แก่ กกกลมและหญ้าแฝก

6. น้ำเสีย

จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด เป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับ

นำแก๊สลอยลิกไนต์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ทั้งแก๊สลอยลิกไนต์ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) เพื่อไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายแพลตทินัม-โคบอลต์

2.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 500 Pt-Co Unit มา 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 และ 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตรแต่ละขวด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ที่มีความเข้มข้นของสีเท่ากับ 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0 และ 100.0 Pt-Co Unit ตามลำดับ

2.2 นำสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ ที่เตรียมได้จากข้อ 2.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง(แกนตั้ง)และความเข้มข้นของสี(แกนนอน)

3. การเตรียมสารละลาย

3.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

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

3.2 กรดซัลฟิวริกเอเจนต์

ชั่งซิลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆ จนซิลเวอร์ซัลเฟต ละลายหมด

3.3 สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต 1.485 กรัมและไอร์ออน(II)ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.695 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

3.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

ชั่งเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต 39.2 กรัม เติมน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเปรียบเทียบกับมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่าไปใช้

4. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง(Activated Sludge)

นำน้ำเสียตัวอย่างมาวิเคราะห์ดัชนีคุณภาพน้ำเบื้องต้น คือ พีเอช,สี, การนำไฟฟ้า, ความขุ่น , ความเค็ม, ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ, บีโอดีและซีโอดี

5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยถ้ำลอยลิกไนต์และไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการทดลองแบบเบตซ์

5.1 ศึกษาปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์

ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่ศึกษา คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที กรองผ่านกระดาษเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน ตรวจวัดสีและซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับ คำนวณร้อยละการบำบัดสีและซีโอดี

5.2 ศึกษาระยะเวลาสัมผัส

ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์ปริมาณเท่ากับที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 5.1 เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และแปรผันระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง และ 1, 2, 3, 4 และ 5 วัน ตามลำดับ กรองผ่านกระดาษเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน ตรวจวัดสีและซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับ คำนวณร้อยละการบำบัดสีและซีโอดี

5.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1 และใช้ระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

5.4 ศึกษาปริมาณดิน

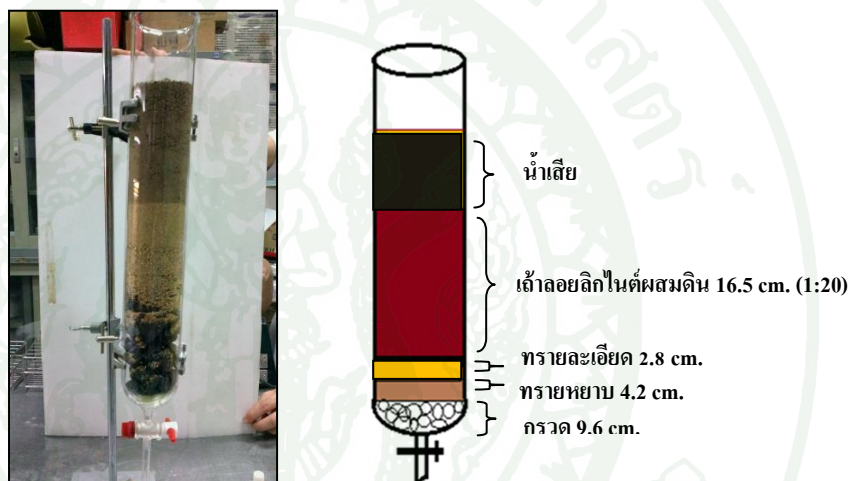
ปริมาณดินที่ศึกษา คือ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ จากนั้นเติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที กรองผ่านกระดาษเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน ตรวจวัดสีและซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับ คำนวณร้อยละการบำบัดสีและซีโอดี

5.5 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดิน

ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์กับดิน โดยแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 1:1, 1:5, 1:10, 1:20 และ 1:40 เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที กรองผ่านกระดาษเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน ตรวจวัดสีและซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับ คำนวณร้อยละการบำบัดสีและซีโอดี

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง(Continuous Flow)

6.1 ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุปลูกเลียนแบบพื้นที่เพาะปลูกของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย โดยบรรจุชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราวยละเอียด 2.8 เซนติเมตรและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 5.5 สูง 16.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 คอลัมน์บรรจุวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

6.2 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย

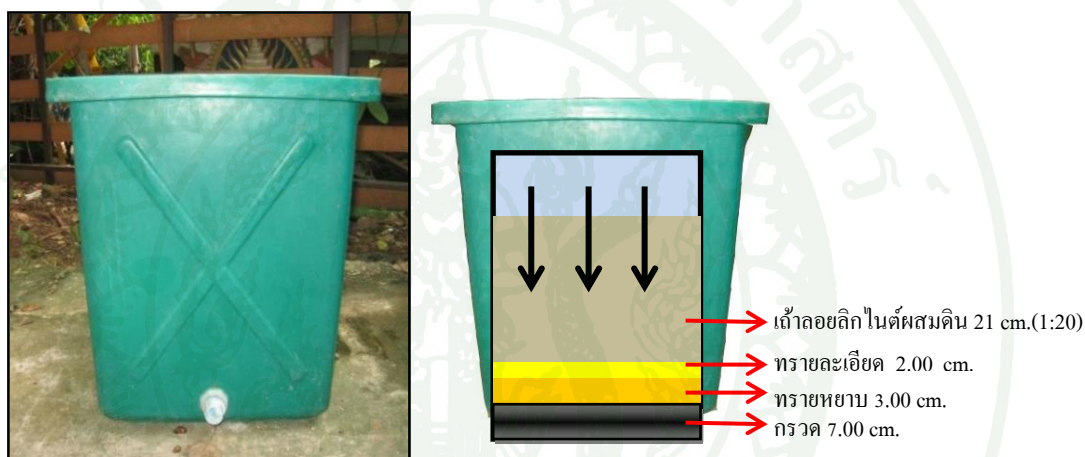
เติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 6.1 แช่แข็ง 5 วัน ปล่อยน้ำเสียนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี ปล่อยให้ชั้นวัสดุแห้ง 2 วันและทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือมีสภาวะคงที่

6.3 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

เติมน้ำเสีย 1,500 มิลลิลิตรลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 6.1 อย่างต่อเนื่องและเก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆครึ่งชั่วโมง หาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือมีสภาวะคงที่

7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก (Filtrated Lysimeter Techniques)

7.1 ทำการทดลองโดยใช้กระบะพลาสติกขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ที่บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราขยาบ 3 เซนติเมตร ทราขละเอียด 2 เซนติเมตรและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้ สูง 21 เซนติเมตร ดังภาพที่ 20 ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ กกกลมและหญ้าแฝกในแต่ละกระบะ แต่ละชนิดพืชทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 20 กระบะบรรจุชั้นวัสดุปลูกตามพื้นที่เพาะปลูกของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

7.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1 แต่เปลี่ยนจากถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน เป็นการใช้ดินเพียงอย่างเดียว

7.3 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

เติมน้ำเสีย 20 ลิตร ลงในกระบะทดลองที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 7.1 และ 7.2 แข่ขังไว้ 5 วันปล่อยน้ำผ่านกระบะ เก็บน้ำตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดี ปล่อยให้วัสดุปลูกแห้ง 2 วัน ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือมีสภาวะคงที่

7.4 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

เติมน้ำเสีย 150 ลิตร ลงในกระบะทดลองที่บรรจุวัสดุปลูกจากข้อ 7.1 และ 7.2 อย่างต่อเนื่องและเก็บน้ำตัวอย่างทุกๆครึ่งชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดและซีโอดี ทำการทดลองซ้ำจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงหรือมีสภาวะคงที่

7.5 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.3 และ 7.4 แต่เปลี่ยนจากน้ำเสียเป็นน้ำกลั่น



ผลและวิจารณ์

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง คือ การทดลองแบบแบดช์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีและซีโอดีของน้ำเสีย ส่วนที่สองเป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง เพื่อเป็นการจำลองชั้นวัสดุดูดซับของระบบหน่วยกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และส่วนที่สามเป็นการใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ซึ่งจำลองการบำบัดน้ำเสียของทั้ง 2 ระบบ โดยผลการทดลองมีดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

เถ้าลอยลิกไนต์ เป็นเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ บริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้จากเตาเผาเบอร์ 16 ซึ่งเป็นเถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผาไหม้ร้อยละ 90 เถ้าลอยลิกไนต์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียด แห้งและมีสีน้ำตาล ดังภาพที่ 21

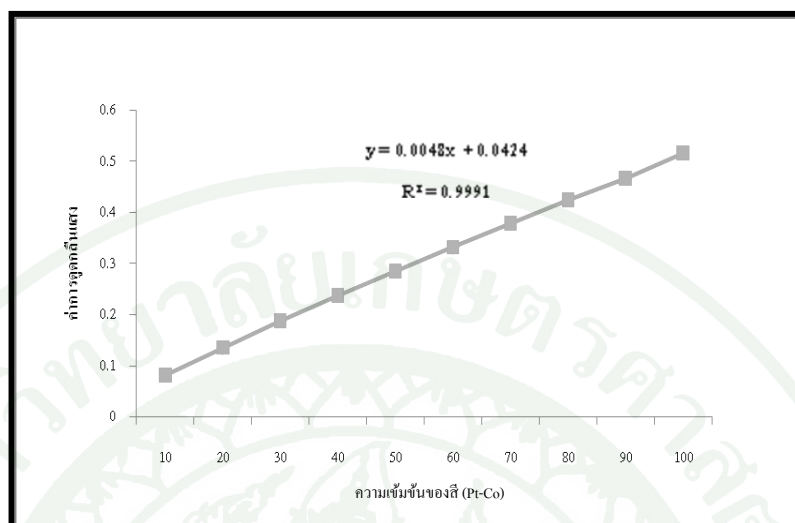


ภาพที่ 21 เถ้าลอยลิกไนต์

2. ผลการเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานสารละลายแพลตทินัม-โคบอลต์ที่เตรียมได้จากการทดลองข้อ 2 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 22 ที่มีสมการถดถอยเชิงเส้น คือ $y = 0.0048x + 0.0424$ และค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(R-square) เท่ากับ 0.9991 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ 0.995-1.000



ภาพที่ 22 กราฟมาตรฐานสารละลายแพลตทินัม-โคบอลต์

3. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ พบว่า ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ยกเว้นแต่ซีโอดีมีค่าเกินค่ามาตรฐานดังตารางที่ 4 และค่าสีที่ตรวจวัดได้โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์เท่ากับ 120 Pt-Co Unit ซึ่งถือว่าเกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำที่กำหนดให้ไม่เกิน 5-15 Pt-Co Unit (การประปาส่วนภูมิภาค, 2553) และเมื่อพิจารณาด้วยสายตา ยังเป็นสีที่น้ำฟุ้งกระจาย

ตารางที่ 4 คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ

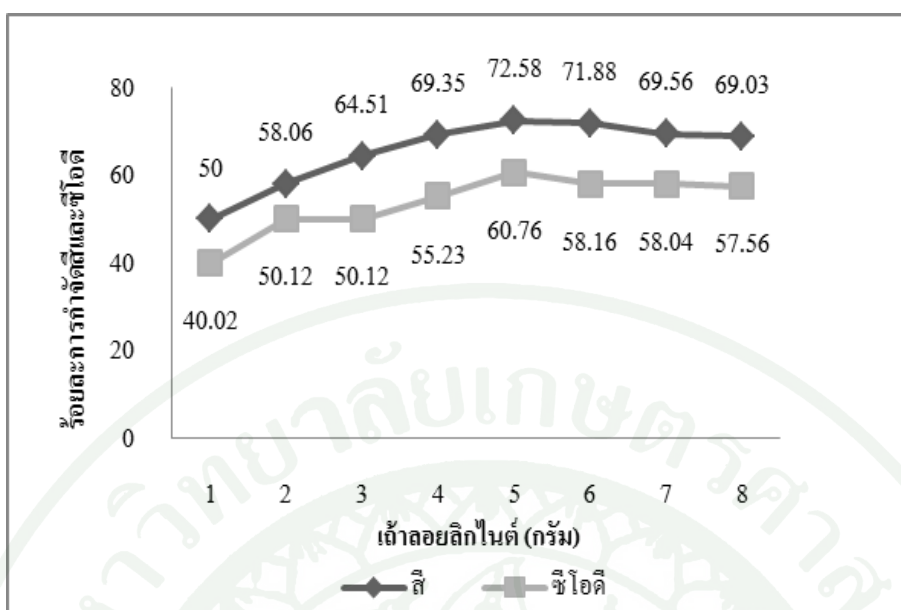
พารามิเตอร์	น้ำเสียจากการผลิตกระดาษ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
พีเอช	8.4	5.5 – 9.0
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	2,600	-
TDS (mg/L)	1,700	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (ppt.)	1.2	-
ความขุ่น (NTU)	31.7	-
บีโอดี (mg/L)	6	ไม่เกิน 20
ซีโอดี (mg/L)	472	ไม่เกิน 120

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ยังคงมีค่าสีและซีโอดีเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ซึ่งควรได้รับการบำบัดต่อไป

4. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษด้วยเถ้าลอยลิกไนต์และไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการทดลองแบบแบตช์

4.1 ผลการศึกษาปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์

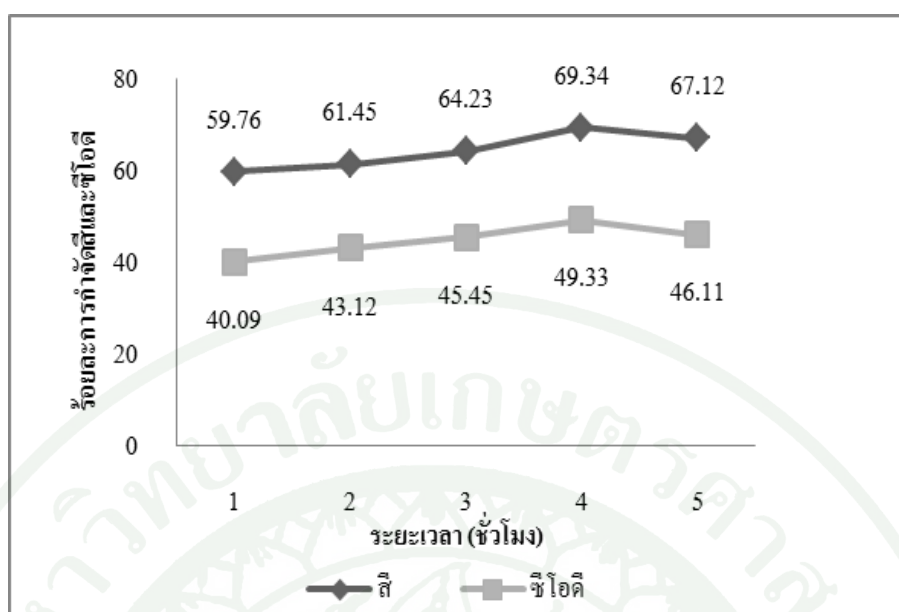
จากการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เป็น 1 ,2 ,3 ,4, 5, 6 ,7 จนถึง 8 กรัม ต่อ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีเพิ่มขึ้นและเริ่มมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์ที่ปริมาณ 5 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีและซีโอดีสูงสุดที่ร้อยละ 72.58 และ 60.76 ตามลำดับ ดังภาพที่ 23 อธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่างๆ แต่ปริมาณมลสารที่เถ้าลอยลิกไนต์ดูดซับได้ในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ จึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์และคณิดา, 2550)



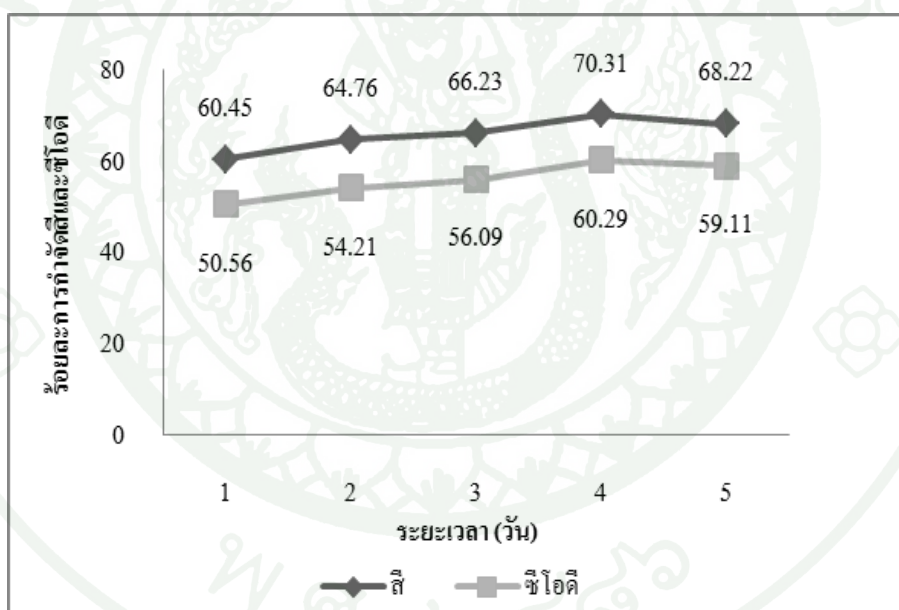
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดซีและซีโอดี กับปริมาณปลาลอยในน้ำ

4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัส

จากการทดลอง แนวโน้มของร้อยละการกำจัดซีและซีโอดีมีแนวโน้มเหมือนกันทั้งระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาเป็นชั่วโมงและวัน ดังภาพที่ 3 เมื่อเพิ่มระยะเวลา จาก 1-5 ชั่วโมง และ 1-5 วัน พบว่า ทั้งการเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงและเป็นวัน ปลาลอยในน้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งซีและซีโอดีเพิ่มขึ้น โดยร้อยละการกำจัดซีและซีโอดีดีที่สุดที่ 4 ชั่วโมง เท่ากับ 69.34 และ 49.33 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24 (ก) และที่ 4 วัน เท่ากับ 70.31 และ 60.29 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24 (ข) อธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มระยะเวลาให้มลสารมีโอกาสสัมผัสกับปลาลอยในน้ำเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ของตัวถูกดูดซับมีจำกัด เมื่อถึงระยะเวลานึงจะดำเนินเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่และอาจมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการคายซับ



(ก)



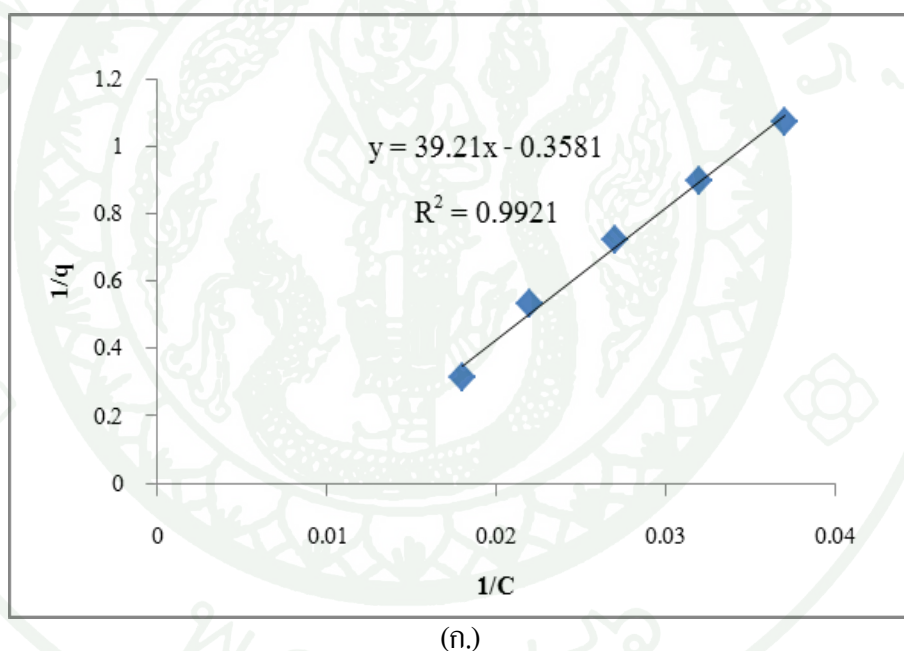
(ข)

ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดดีและซีไอดีกับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง(ก.) และเป็นวัน(ข.)

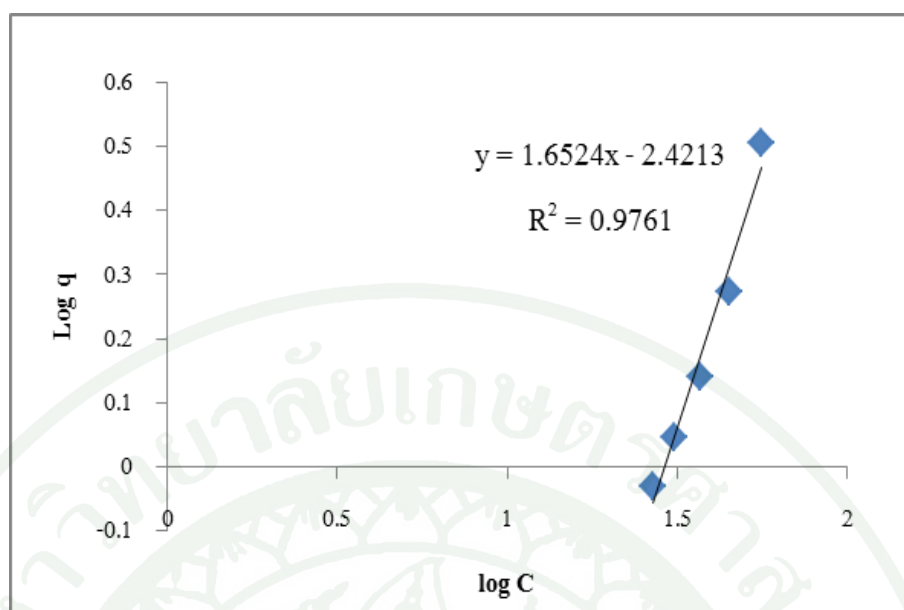
4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

นำผลการทดลองการศึกษาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ในน้ำศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของแอมโมเนียและฟรอนดิช โดยนำผลการศึกษาไปเข้าสมการการดูดซับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์(R-square) ในการดูดซับสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษมีค่า เท่ากับ 0.9921 และ 0.9761 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25(ก)และ(ข) ตามลำดับ ซึ่งถือได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น กลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ซึ่งกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด โดยมีกลไกดูดซับที่เหมือนกัน ซึ่งการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน (Johnson, 1989) ส่วนกลไกการดูดซับของ ฟรุนดลิช คือ การดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์(ก.)และ
ไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช(ข.)

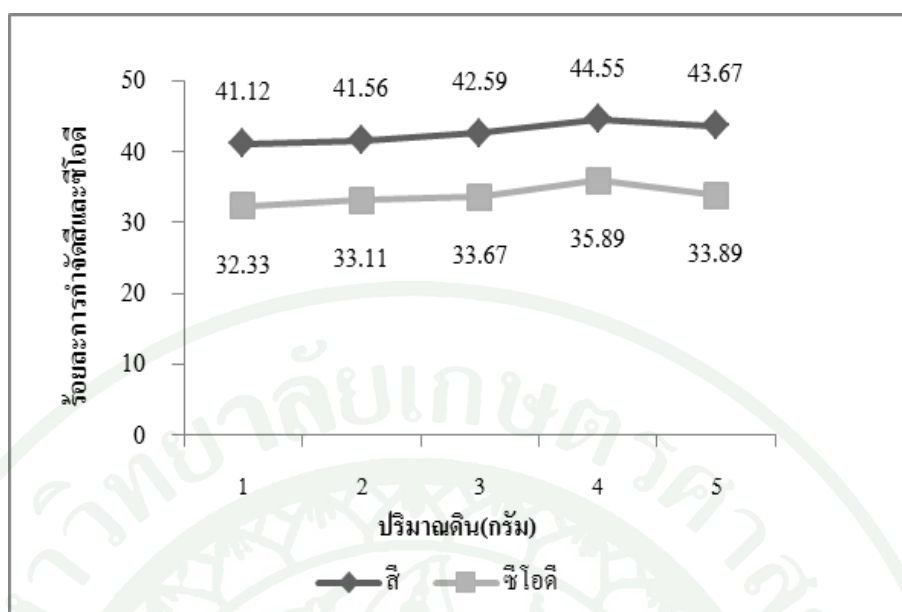


(ข.)

ภาพที่ 25 (ต่อ)

4.4 ผลการศึกษาปริมาณดิน

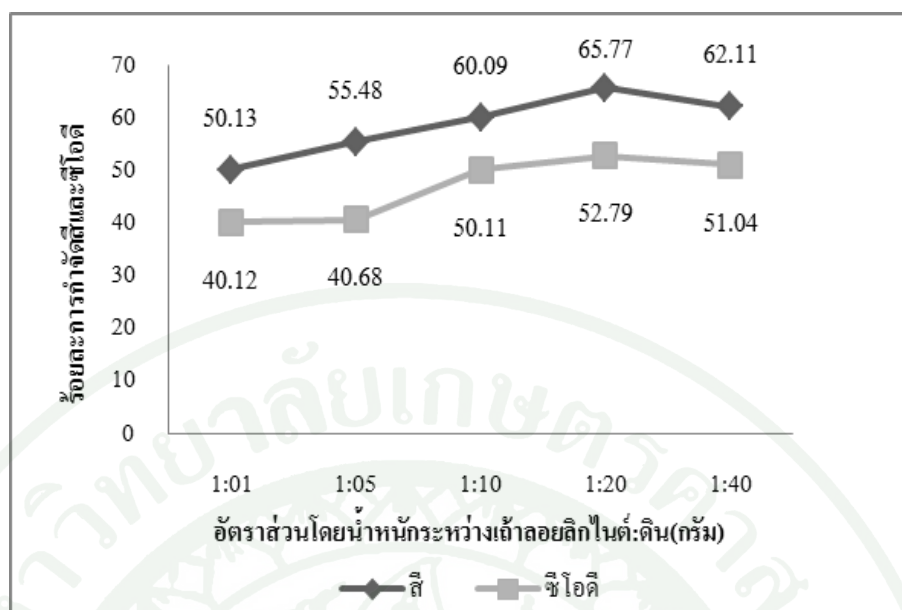
จากการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณดินเป็น 1 ,2 ,3 ,4 และ 5 กรัม ค่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า ปริมาณดินที่ 4 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซี โอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 44.55 และ 35.89 ตามลำดับ ดังภาพที่ 26 อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณดินทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มตาม จนถึงจุดคงที่และลดลงเนื่องจากอาจมีการคายซับร่วมด้วย



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดซีโอติและซีโอติ กับปริมาณดิน

4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนของเถ้าลอยลิกไนต์กับดิน

จากการทดลอง แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดิน ดังนี้ 1:1, 1:5, 1:10, 1:20 และ 1:40 เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า ร้อยละการกำจัดซีโอติและซีโอติเพิ่มขึ้นและให้ประสิทธิภาพดีที่สุดที่อัตราส่วน 1:20 เท่ากับร้อยละ 65.77 และ 52.79 ตามลำดับ ดังภาพที่ 27 แสดงว่า ดินมีส่วนช่วยในการกำจัดได้บ้าง แต่เมื่อถึงจุดจุดหนึ่งจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก ปริมาณดินที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อถึงจุดอิ่มตัวและเข้าสู่สมดุลจะเกิดการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลง

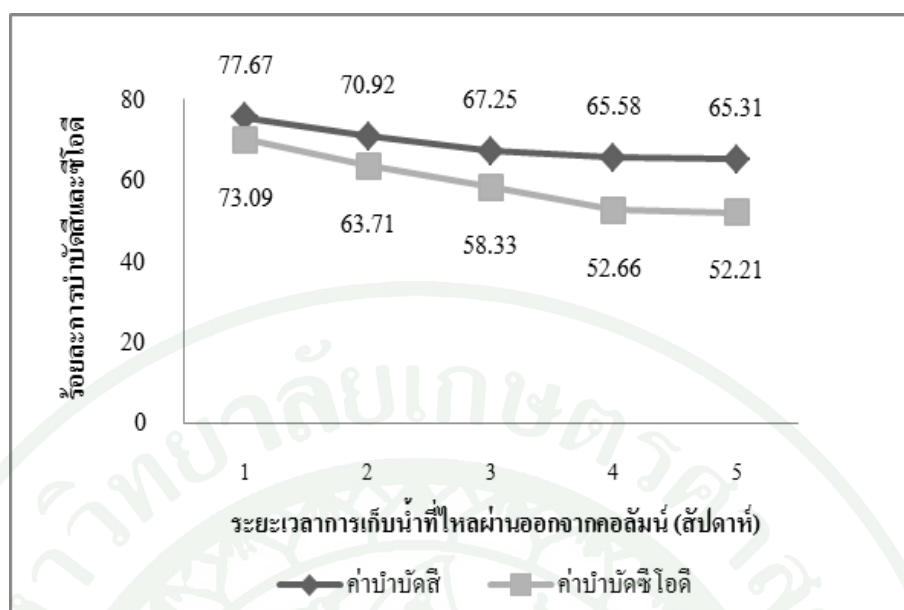


ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดซีโอดีกับปริมาณน้ำที่ใช้ในดินในอัตราส่วนต่างๆ

5. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์ โดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

5.1 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนเวียนน้ำเสีย

เข้าน้ำเสีย 200 มิลลิตรในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก แข้ง 5 วัน ปล่อยน้ำเสียออกจากคอลัมน์และปล่อยแห้ง 2 วัน พบว่า ในสัปดาห์แรกมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและซีโอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 77.67 และ 73.09 ตามลำดับและประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลงในสัปดาห์ต่อมาจนเข้าสู่ภาวะที่ประสิทธิภาพการบำบัดค่อนข้างคงที่ อธิบายได้ว่า ในสัปดาห์แรกพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆ ยังมีมากและเมื่อระยะเวลาหนึ่งถ่านกัมมันต์และดินถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ดังภาพที่ 28

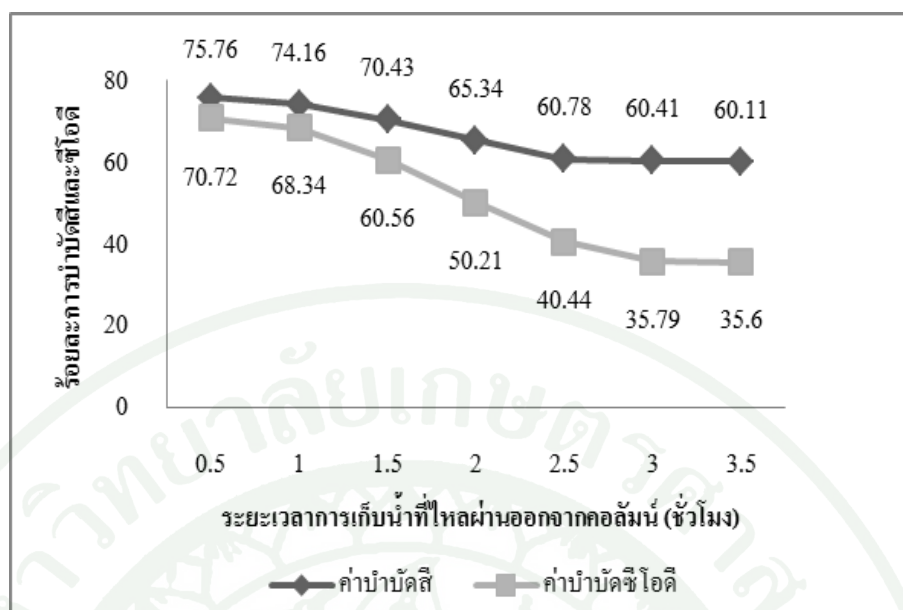


ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีและซีโอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)

5.2 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

โดยการปล่อยน้ำเสีย 1,500 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง จากการทดลองมีการเก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านชั้นวัสดุปลูกทุกครั้งชั่วโมง พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 3 จะเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุลซึ่งร้อยละของการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 75.76 และ 70.72 ตามลำดับ ดังภาพที่ 29 อธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ

5.1



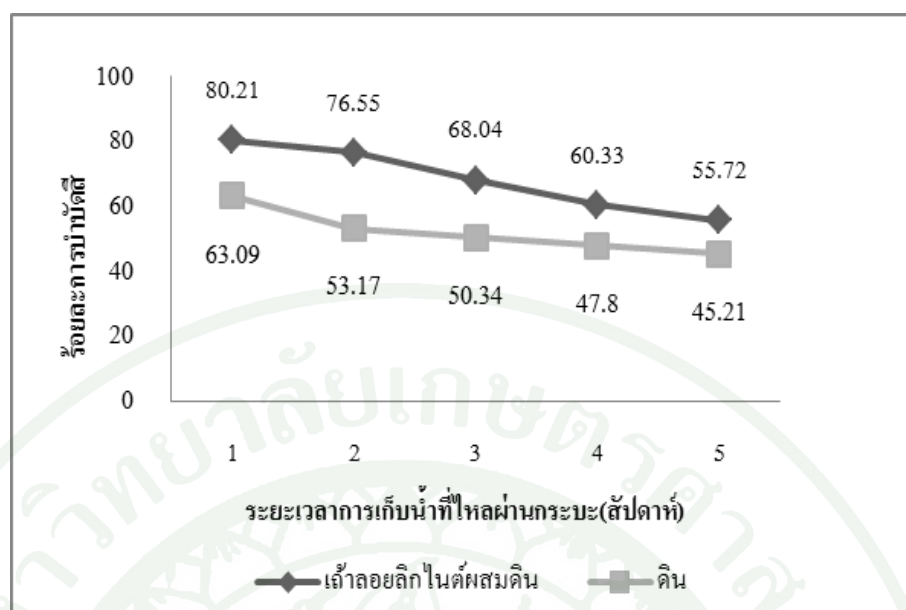
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดีและซีไอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่าน การบำบัด(ชั่วโมง)

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและซีไอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

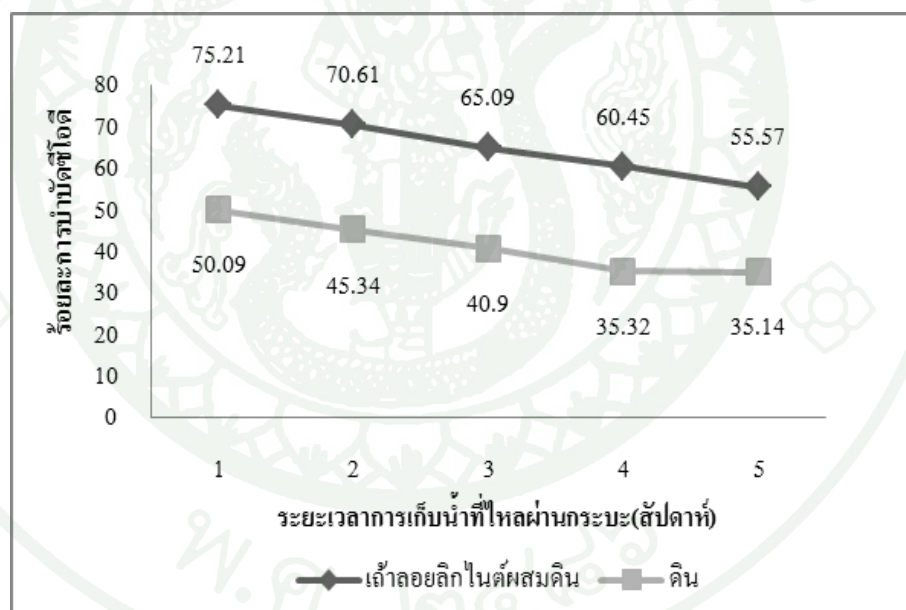
6.1 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนเวียนน้ำเสีย

6.1.1 กกกกลม

จากการทดลองด้วยกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์ผสมอยู่และปลูก กกกกลม พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและซีไอดีดีที่สุดในช่วงสัปดาห์แรกเท่ากับร้อยละ 80.21 และ 75.21 ตามลำดับและจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนถึงครั้งที่เจ็ดพบว่า กระบอกที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากผลการทดลองข้อ 7.2 คือ 1:20 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพในการ บำบัดซีไอดีและซีไอดีได้ดีกว่ากระบอกที่ไม่ได้ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ในทุกการทดลองประมาณร้อยละ 17 และ 25 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 เนื่องจากถ้ำลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆ ได้ดี และเมื่อนำมาผสมในดินปลูกร่วมกับกกกกลม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีและซีไอดีได้ดี ยิ่งขึ้น



(ก.)



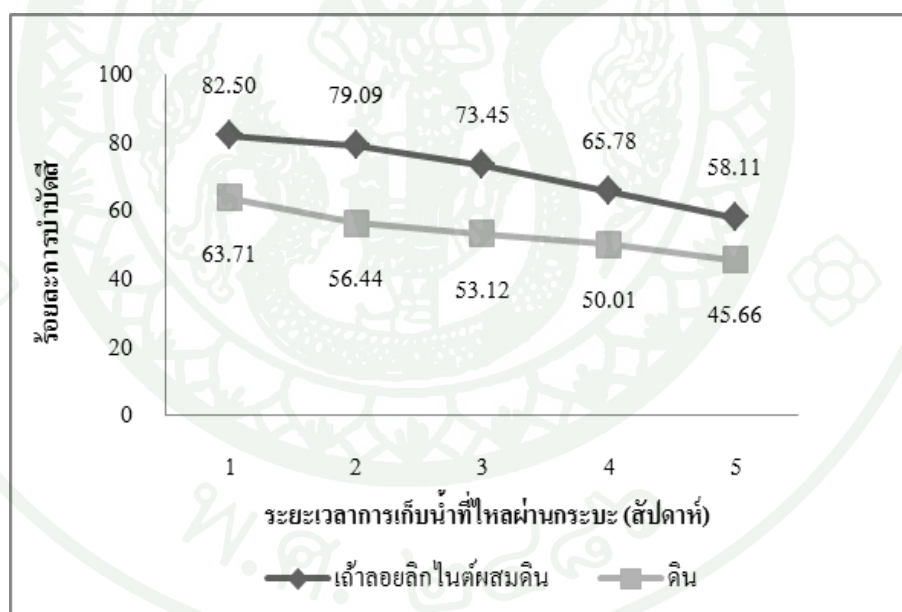
(ข.)

ภาพที่ 30 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ(ก.)และซีโอดี(ข.) ระหว่างการใช้ดินและ
 ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกกกกลม

6.1.2 หญ้าแฝก

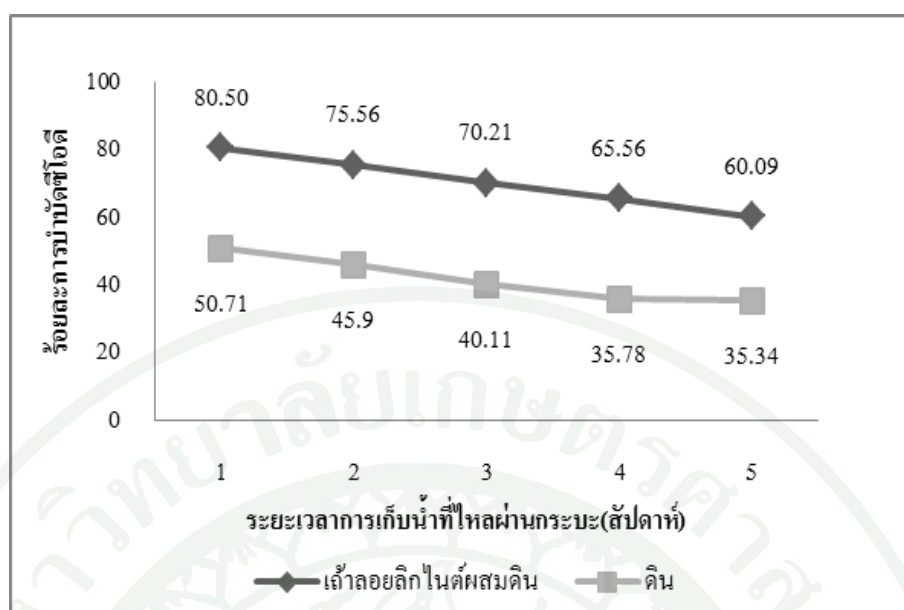
จากการทดลองปลูกหญ้าแฝกและทำการทดลองเช่นเดียวกับปลูกกกกลม พบว่า แนวโน้มการบำบัดเช่นเดียวกับกกกลม คือ กระบะที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วน 1:20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีไอดีได้ดีกว่าใช้ดินอย่างเดียวประมาณร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ ดังภาพที่ 31 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของพืช พบว่า หญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีไอดีได้ดีกว่ากกกลมประมาณร้อยละ 2 และ 5 ตามลำดับ เนื่องจากรากของหญ้าแฝกมีรากฝอยที่แข็งแรงและแตกรากมาก จึงมีกระจายตัวทั่วพื้นที่ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2548) ดังนั้นเมื่อเถ้าลอยลิกไนต์ดูดซับมลสารต่างๆ ไว้ในรูปของอินทรีย์วัตถุและจุลินทรีย์เปลี่ยนรูปอินทรีย์วัตถุเป็นอนินทรีย์วัตถุแล้ว รากของหญ้าแฝกจะสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และทำให้สามารถบำบัดค่าสีและซีไอดีได้ดีกว่ากกกลมที่มีระบบรากที่กระจายน้อยกว่า



(ก.)

ภาพที่ 31 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.) ระหว่างการใช้ดินและเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก



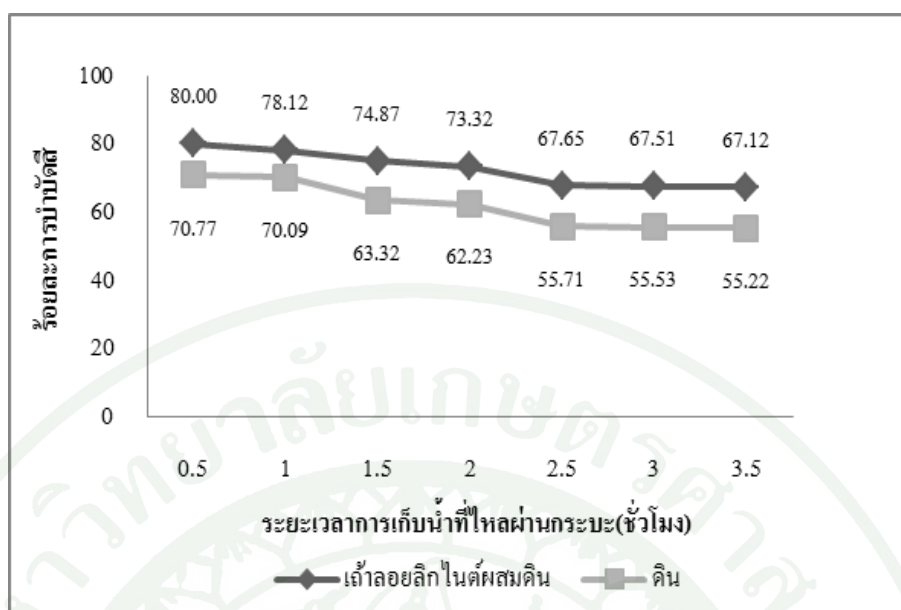
(ข.)

ภาพที่ 31 (ต่อ)

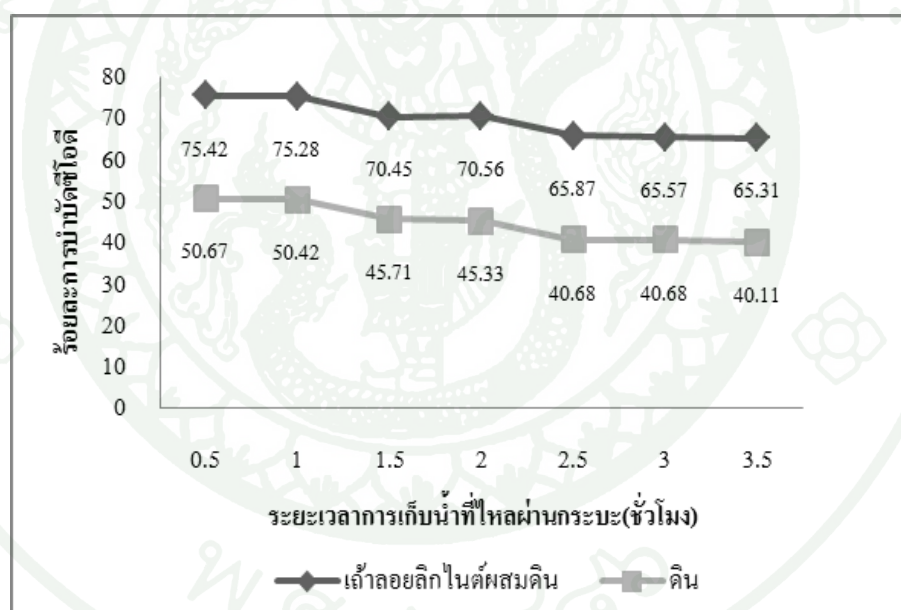
6.2 การบำบัดน้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

6.2.1 กกกกลม

จากการทดลองโดยผ่านน้ำเสียลงไปในกระบอกที่บรรจุวัสดุปลูกและปลูกกกกกลมและเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระบอกทุกครั้งชั่วโมง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกระบอกที่ผสมแก้วลอยติกในคัสกับกระบอกที่ไม่ได้ผสมแก้วลอยติกในคัสในตอนเริ่มต้น พบว่า กระบอกที่ใช้แก้วลอยติกในคัสผสมกับดินในอัตราส่วน 1:20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่าใช้ดินเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 10 และ 25 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1 ดังภาพที่ 32



(ก.)



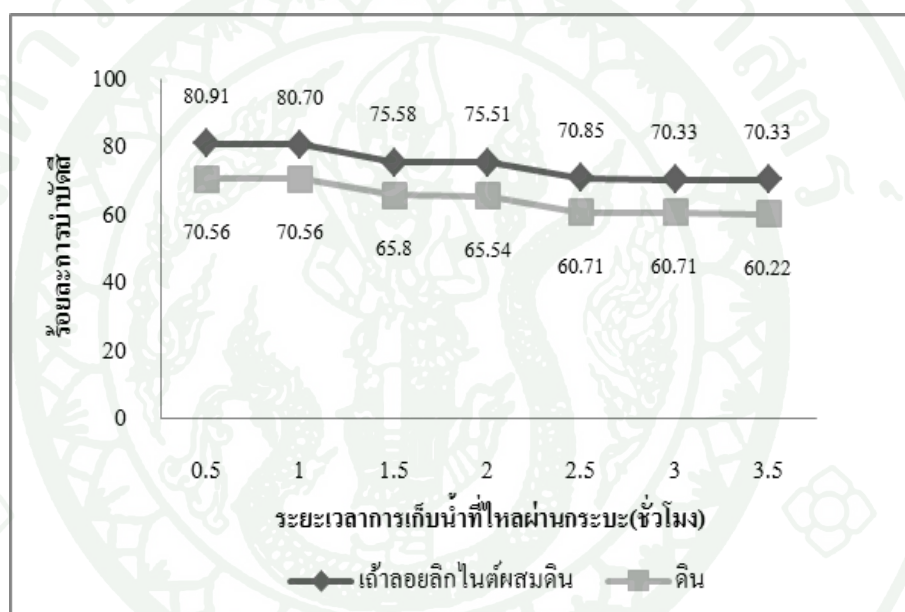
(ข.)

ภาพที่ 32 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ(ก.)และซีโอดี(ข.)ระหว่างการใช้ดินและถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกครึ่งชั่วโมงร่วมกับการปลูกกกกลม

6.2.2 หญ้าแฝก

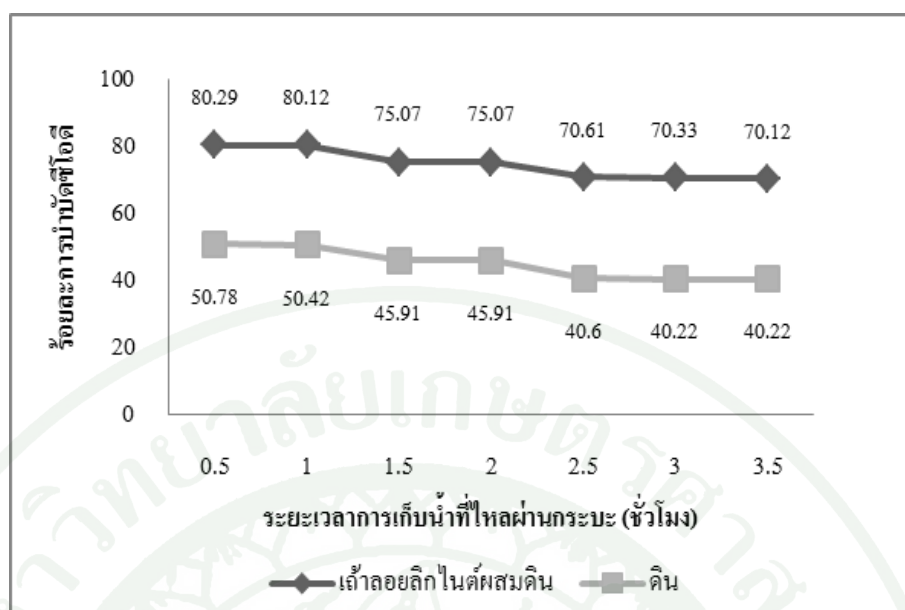
จากการทดลองโดยผ่านน้ำเสียลงไปในกระบะที่บรรจุวัสดุปลูกและปลูกหญ้าแฝกและเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านกระบะทุกครั้งชั่วโมง พบว่า กระบะที่ผสมเถ้ายลยลิกไนต์กับดินในอัตราส่วน 1:20 ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีไอดีได้ดีกว่าใช้ดินเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 10 และ 30 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.1 ดังภาพที่ 33

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของพืช พบว่า หญ้าแฝกและกกกลมให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีใกล้เคียงกัน และหญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีได้ดีกว่ากกกลมประมาณร้อยละ 5 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1.2



(ก.)

ภาพที่ 33 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี(ก.)และซีไอดี(ข.)ระหว่างการใช้ดินและเถ้ายลยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกหญ้าแฝก



(ข.)

ภาพที่ 33 (ต่อ)

6.3 ชุดควบคุม

จากการทดลองข้อ 7.4 เป็นการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อศึกษาว่ามีการชะสีและซีโอดีออกมาจากวัสดุปลูกหรือไม่ พบว่า น้ำกลั่นที่ผ่านชั้นวัสดุเพาะปลูกจากการทดลองไม่ได้ชะค่าสีและซีโอดีออกมาหรืออาจมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าสีและซีโอดีของน้ำกลั่นก่อนเข้าระบบบำบัดเท่ากับศูนย์และหลังจากจากระบบบำบัดมีค่าสีและซีโอดีเท่ากับ 0 Pt-Co Unit และ 8 mg/L ตามลำดับ แต่ด้วยข้อด้อยของระบบบำบัดนี้ ชั้นวัสดุเพาะปลูกของการทดลองเป็นดินนา ทราบและกรวด ทำให้เกิดการชะสิ่งเจือปนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ออกมา จึงส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และความเค็มสูงกว่าผลวิเคราะห์น้ำกลั่นเริ่มต้น ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดควบคุม

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์น้ำกลั่น	ผลวิเคราะห์น้ำหลังผ่านระบบบำบัด
พีเอช	7.1	7.6
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	404	714
TDS (mg/L)	274	849
ความเค็ม (ppt.)	0	1.30
ความขุ่น(NTU)	0.2	0.39

7. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยด้วยระบบหมุนกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์

คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ทั้งแบบด้วยระบบหมุนกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พร้อมทั้งการปลูกพืช คือ กกกล่มและหญ้าแฝก พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ ระบบบำบัดน้ำเสียทั้งสองระบบให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีใกล้เคียงกันทั้งที่ปลูกพืชชนิดเดียวกันและต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบห้ำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

พารามิเตอร์	ค่าวิเคราะห์น้ำเสียเริ่มต้น	ค่าวิเคราะห์น้ำเสียหลังการบำบัด			
		ระบบห้ำกรองน้ำเสีย		ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	
		กกกลม	ห้ำแฝก	กกกลม	ห้ำแฝก
พีเอช	7.4	7.8	7.8	7.8	7.8
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	2,600	7,800	6,400	7,600	6,300
TDS (mg/L)	1,700	6,700	6,100	6,500	6,100
ความเค็ม (ppt.)	1.2	3.7	2.9	3.5	3.1
ความขุ่น(NTU)	2.7	4.70	3.99	4.43	4.0
ซีโอดี (mg/L)	472	117	92	116	93
สี (PtCo Unit)	120	24	21	24	23

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหมุนกรองน้ำเสียโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษด้วย พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์ที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้

โดยการทดลองแบบเบตซ์ พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัมต่อน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง 50 มิลลิลิตรและเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ร้อยละ 72.58 และ 60.76 ตามลำดับและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:20 ซึ่งสามารถบำบัดสีและซีโอดีได้ร้อยละ 65.77 และ 52.79 ตามลำดับ จากผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการจำลองพื้นที่ปลูกของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยฯ แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ระบบหมุนกรองน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีร้อยละ 77.67 และ 73.09 ตามลำดับและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีร้อยละ 75.76 และ 70.72 ตามลำดับ ส่วนการทดลองการบำบัดแบบประยุกต์สำหรับใช้งานจริงโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ กกกลมและหญ้าแฝก พบว่า หญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่ากกกลมและระบบบำบัดน้ำเสียทั้งสองระบบให้ประสิทธิภาพในการบำบัดใกล้เคียงกันจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถ้ำลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียแบบหมุนกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ซึ่งจะถูกนำมาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่ 3 ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ยังคงมีปัญหาเรื่องสีและซีโอดีอยู่ หลังจากบำบัดด้วยวิธีตะกอนเร่งแล้ว

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากระบบนั้น มีค่าสีเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ดังนั้น จึงควรมีการพัฒนาและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการอื่นๆ ในการลดความเข้มข้นของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
2. ศึกษาตัวดูดซับประเภทอื่นๆ เช่น ตัวดูดซับชีวมวล ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษต่อไป
3. ควรมีการศึกษความเป็นไปได้ของการใช้ดินในพื้นที่อื่นๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในการทดลอง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2548. คู่มือเรื่องการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกเพื่อการพัฒนาที่ดิน. กรมพัฒนาที่ดิน. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

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

การประปาส่วนภูมิภาค. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค.

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

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

จุลวรรณ จิงสุพัฒนานนท์. 2544. การลดสีของน้ำเสียจากโรงงานเยื่อและกระดาษด้วยวิธีการตรึงเซลล์ *Phanerochaete Chrysosporium* ในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบฟลูอิดไคซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ต่อพงศ์ กริธาชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคทิเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. 2554. ผลกระทบของความละเอียดถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในพสต์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 9(1): 40-48.

นนทพงษ์ ภาณุกุลกิตติ. 2548. การลดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการโอโซนเนชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด. 2556. ข้อมูลน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย.

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

พรรัตน์ ดีสงคราม. 2547. การใช้ระบบหญ้ากรองบำบัดน้ำเสียชุมชนจังหวัดจันทบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนพ รุ่งสุข. 2538. การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกหอม *Vetiveria zizanioides*(L.) Nash ที่รอดด้วยน้ำทิ้งจากชุมชนจังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2543. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ. วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรวุฒิ มัชฌันต์, โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์ และ โจเซฟ เคดารี. มปป. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพปลูกดินดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. แหล่งที่มา http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEconomic/43-Worawut_mat/template.html, 18 ตุลาคม 2555.

วิจิตอจรรยา สรรพกิจจานง. 2536. เถ้าลอยในงานทางรายงานฉบับที่ วพ.131, ศูนย์วิจัยและพัฒนา, กรมทางหลวง.

สิทธิชัย ตันชนะสกุลย์. 2538. การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา ศรีเพ็ญ, วีรชัย เดชคง และ อมร พันทุศรี. 2537. การคัดเลือกพืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธี grass filtration. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ(สำนักงาน กปร.). 2536. รายงานสรุปผลการดำเนินงานโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้แก๊สอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. คณะทำงานติดตามและประเมินผลการพัฒนาและรณรงค์การใช้แก๊สฯ สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2535. เทคโนโลยีการทำผลิตภัณฑ์จากกก. กองส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

_____. 2546. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมสำหรับโรงงานเยื่อและกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ. 242 น.

อัมไพวรรณ พุกประเสริฐ. 2550. การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยดินที่มีการปลูกพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

Buddhawong, S. 1996. **Efficiency of *Cyperus corymbosus* and *Eleocharis dulcis* in constructed wetlands for municipal wastewater treatment.** M.S. thesis, Chulalongkorn University, Bangkok.

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

Kadlac, J.A. 1962. **Effect of a drawdown on a waterfowl impoundment.** *Ecol.* 43: 267- 281.

Livernoche, D., L. Jurasek, M. Desrochers, J. Dorica, and I. A. VELIKY. 1983. **Biotechnol. Bioeng.** 25: 2055-2067.

Mehna A, Bajpai P, Bajpai PK. Studies on decolorization of effluent from a small pulp mill Utilizing agriresidues with *Trametes versicolor*. **Enzyme Microb. Technol.** 1995; 17 (1):18-22.

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.

Xia, H., H. Ke, Z. Deng, P. Tan and S. Liu. 2003. Ecological effectiveness of vetiver constructed wetlands in treating oil-refined wastewater. pp. 115-127. **In the Third International Conference on Vetiver and Exhibition – Vetiver and water**. Guangdong Academy of Agriculture Sciences, South China Institute of Botany, Chinese Academy Sciences, South China Agricultural University, Guangdong Association of Grass Industry and Environment, Guangz.



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์

ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.31	0.31	0.30	0.31	50.00
2	0.25	0.26	0.26	0.26	58.06
3	0.22	0.21	0.22	0.22	64.51
4	0.18	0.19	0.19	0.19	69.35
5	0.16	0.17	0.17	0.17	72.58
6	0.17	0.17	0.16	0.17	71.88
7	0.20	0.18	0.18	0.19	69.56
8	0.19	0.20	0.19	0.19	69.03

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอคิกับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละของการกำจัด
1	40.02
2	50.12
3	50.12
4	55.23
5	60.76
6	58.16
7	58.04
8	57.56

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับระยะเวลาสัมผัส(ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.24	0.25	0.25	0.25	59.76
2	0.25	0.22	0.24	0.24	61.45
3	0.22	0.22	0.21	0.22	64.23
4	0.20	0.18	0.19	0.19	69.34
5	0.21	0.20	0.20	0.20	67.12

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส(ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการกำจัด
1	40.09
2	43.12
3	45.45
4	49.33
5	46.11

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีกับระยะเวลาสัมผัส(วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.24	0.25	0.26	0.25	60.45
2	0.22	0.21	0.22	0.22	64.76
3	0.23	0.20	0.19	0.21	66.23
4	0.18	0.18	0.19	0.18	70.31
5	0.20	0.21	0.20	0.20	68.22

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดชีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส(วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละของการกำจัด
1	50.56
2	54.21
3	56.09
4	60.29
5	59.11

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดชีโอดีกับปริมาณดิน

ปริมาณดิน(กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.37	0.36	0.37	0.37	41.12
2	0.35	0.35	0.37	0.36	41.56
3	0.36	0.36	0.35	0.36	42.59
4	0.34	0.34	0.34	0.34	44.55
5	0.34	0.35	0.35	0.35	43.67

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดชีโอดีกับปริมาณดิน

ปริมาณดิน(กรัม)	ร้อยละของการกำจัด
1	32.33
2	33.11
3	33.67
4	35.89
5	33.89

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสี ของปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินใน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน เถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การกำจัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1:1	0.31	0.30	0.32	0.31	50.13
1:5	0.27	0.28	0.28	0.28	55.48
1:10	0.25	0.26	0.24	0.25	60.09
1:20	0.21	0.20	0.21	0.21	65.77
1:40	0.23	0.23	0.24	0.23	62.11

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสีโอดี ของเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินใน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนเถ้าลอยลิกไนต์ : ดิน	ร้อยละของการกำจัด
1:1	40.12
1:5	40.68
1:10	50.11
1:20	52.79
1:40	51.04

ตารางผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์

ปริมาณเถ้าลอย (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	log q	log C
1	120	56	0.05	3.200	0.313	0.018	0.505	1.748
2	120	45	0.05	1.875	0.533	0.022	0.273	1.653
3	120	37	0.05	1.383	0.723	0.027	0.141	1.568
4	120	31	0.05	1.113	0.898	0.032	0.046	1.491
5	120	27	0.05	0.930	1.075	0.037	-0.032	1.431

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.14	0.14	0.15	0.14	77.67
2	0.19	0.18	0.18	0.18	70.92
3	0.20	0.21	0.20	0.20	67.25
4	0.22	0.20	0.20	0.21	65.58
5	0.22	0.21	0.22	0.22	65.31

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่านการบำบัด(สัปดาห์)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	73.09
2	63.71
3	58.33
4	52.66
5	52.21

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่ผ่าน
การบำบัด(ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	0.15	0.15	0.14	0.15	75.76
1	0.16	0.16	0.16	0.16	74.16
1.5	0.17	0.18	0.19	0.18	70.43
2	0.21	0.20	0.21	0.21	65.34
2.5	0.25	0.24	0.23	0.24	60.78
3	0.25	0.25	0.26	0.25	60.41
3.5	0.25	0.26	0.25	0.25	60.11

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับระยะเวลาเก็บน้ำในคอลัมน์ที่
ผ่านการบำบัด(ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
0.5	70.72
1	68.34
1.5	60.56
2	50.21
2.5	40.44
3	35.79
3.5	35.9

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.12	0.12	0.11	0.12	80.21
2	0.14	0.15	0.15	0.15	76.55
3	0.20	0.21	0.20	0.20	68.04
4	0.25	0.25	0.25	0.25	60.33
5	0.27	0.26	0.27	0.27	55.72

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของเถาลอยลิกไนต์ผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	75.21
2	70.61
3	65.09
4	60.45
5	55.57

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา
เก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.22	0.24	0.23	0.23	63.09
2	0.29	0.29	0.28	0.29	53.17
3	0.30	0.31	0.31	0.31	50.34
4	0.32	0.32	0.32	0.32	47.80
5	0.35	0.33	0.33	0.34	45.21

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของการใช้ดินอย่างเดียวกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	50.09
2	45.34
3	40.90
4	35.32
5	35.14

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.11	0.11	0.10	0.11	82.50
2	0.12	0.13	0.13	0.13	79.09
3	0.16	0.16	0.15	0.16	73.45
4	0.20	0.21	0.21	0.21	65.78
5	0.25	0.26	0.26	0.26	58.11

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	80.50
2	75.56
3	70.21
4	65.56
5	60.09

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา
เก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.21	0.22	0.22	0.22	63.71
2	0.26	0.27	0.27	0.27	56.44
3	0.29	0.28	0.29	0.29	53.12
4	0.31	0.31	0.31	0.31	50.01
5	0.33	0.34	0.34	0.34	45.66

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับการใช้ดินอย่างเดียวกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกสัปดาห์ร่วมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัด
1	50.71
2	45.90
3	40.11
4	35.78
5	35.34

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	0.11	0.13	0.12	0.12	80.00
1	0.14	0.13	0.14	0.14	78.12
1.5	0.15	0.15	0.17	0.16	74.87
2	0.17	0.17	0.17	0.17	73.32
2.5	0.20	0.21	0.19	0.20	67.65
3	0.19	0.20	0.20	0.20	67.51
3.5	0.21	0.21	0.19	0.20	67.12

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
0.5	75.42
1	75.28
1.5	70.45
2	70.56
2.5	65.87
3	65.57
3.5	65.31

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา
เก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	0.17	0.18	0.18	0.18	70.77
1	0.19	0.18	0.20	0.19	70.09
1.5	0.22	0.23	0.23	0.23	63.32
2	0.23	0.22	0.23	0.23	62.23
2.5	0.27	0.28	0.26	0.27	55.71
3	0.28	0.28	0.28	0.28	55.53
3.5	0.27	0.27	0.29	0.28	55.22

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของการใช้ดินอย่างเดียวกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
0.5	50.67
1	50.42
1.5	45.71
2	45.33
2.5	40.68
3	40.68
3.5	40.11

ตารางผนวกที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	0.11	0.12	0.12	0.12	80.91
1	0.12	0.12	0.12	0.12	80.70
1.5	0.15	0.16	0.15	0.15	75.58
2	0.15	0.14	0.16	0.15	75.51
2.5	0.19	0.18	0.18	0.18	70.85
3	0.18	0.18	0.17	0.18	70.33
3.5	0.17	0.18	0.18	0.18	70.33

ตารางผนวกที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของเถาลอยลิกในต้นผสมดินกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
0.5	80.29
1	80.12
1.5	75.07
2	75.07
2.5	70.61
3	70.33
3.5	70.12

ตารางผนวกที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของการใช้ดินอย่างเดียวกับระยะเวลา
เก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0.5	0.17	0.18	0.18	0.18	70.56
1	0.17	0.19	0.18	0.18	70.56
1.5	0.21	0.21	0.20	0.21	65.80
2	0.20	0.21	0.22	0.21	65.54
2.5	0.24	0.25	0.23	0.24	60.71
3	0.24	0.24	0.24	0.24	60.71
3.5	0.25	0.25	0.26	0.25	60.22

ตารางผนวกที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีของการใช้ดินอย่างเดียวกับ
ระยะเวลาเก็บน้ำทุกครั้งชั่วโมงรวมกับการปลูกพืชหญ้าแฝก

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
0.5	50.78
1	50.42
1.5	45.91
2	45.91
2.5	40.60
3	40.22
3.5	40.22

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสฤทัย แสนสม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 กรกฎาคม 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรและสิ่งแวดล้อมศึกษา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-