



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
สาขา
.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์สำหรับดูดซับมลสาร
ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

Development of Natural Treatment by Using Lignite Fly Ash for Pollutants Adsorption
in Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment

นามผู้วิจัย นางสาวเบญจพรรณ อินแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

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

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์สำหรับดูดซับมลสาร
ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

Development of Natural Treatment by Using Lignite Fly Ash for Pollutants Adsorption
in Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment

โดย

นางสาวเบญจพรรณ อินแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เบญจพรรณ อินแก้ว 2557: การพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์
สำหรับดูดซับมลสารในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ ปริญญาวิทยา
ศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
นิพนธ์ ตั้งกณานุรักษ์, Ph.D. 133 หน้า

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ ในการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ ซึ่งเป็นของเสียจาก
กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ 70 เปอร์เซนต์ และชีวมวล 30 เปอร์เซนต์ ของ
โรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ เพื่อเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม
ผลการทดลองการดูดซับแบบแบตช์เพื่อศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดของการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี
พบว่า ถ้ำลอยลิกไนต์ 14 กรัม และระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ
และซีโอดีในน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ 50 มิลลิตร ได้ร้อยละ 21.79 และ 57.10
ตามลำดับ ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ ฟรุนดลิช อัตราส่วนที่เหมาะสม
โดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินคือ 1:60 ผลการทดลองแบบไหลต่อเนื่องโดยบรรจุชั้น กรวด
ทรายหยาบ ทรายละเอียด และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน (1:60) จากล่างขึ้นบน ลงในคอลัมน์ ขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 ซม. สูง 40 ซม. พบว่าที่ระยะเวลาการบำบัด 3 ชั่วโมง ให้ผลการบำบัดดีกว่า
การบำบัดแบบอื่น โดยสามารถบำบัดสีของน้ำและ ซีโอดี ได้ร้อยละ 72.58 และ 75.00 ตามลำดับ
นอกจากนี้การบำบัดแบบธรรมชาติถูกจำลอง ในกระเบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร
ร่วมกับการปลูกพืชบำบัด 2 ชนิดคือ หญ้าแฝก และ รุปรฤาษี ที่ระยะเวลาแช่ 3 ชั่วโมง ผลการ
ทดลองพบว่า หญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีที่สูงกว่า คือร้อยละ 82.07
และ 84.61 ตามลำดับ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Benjapan Inkaew 2014: Development of Natural Treatment by Using Lignite Fly Ash for Pollutants Adsorption in Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 133 pages.

This research was to investigate the feasibility of using lignite fly ash (LFA) residue that results from the combustion of lignite coal 70% and biomass 30% of the pulp and paper industry as pollutants adsorbent in the constructed wetland treatment system. Batch adsorption experiments were conducted to study the optimum removal of water color and COD. The results revealed that 14 g of LFA and contact time 3 h could remove water color and COD in 50 mL of pulp and paper industry wastewater at 21.79% and 57.10% respectively. The adsorption isotherm was conformed to Freundlich and the suitable ratio by weight of LFA to soil was 1:60. Continuous experiments were performed by filled the column size 6.5 cm i.d.x40 cm L with gravel, coarse sand, sand and mixture of fly ash and soil (1:60) from the bottom to the top. It was found that treatment time 3 h gave a better results than the others treatment and 72.58% and 75.00% removal of water color and COD respectively were achieved. Furthermore, the natural treatment was simulated in plastic tank size 51x51x54 cm, growing two types treatment plants (*Typha angustifolia* L. and *Vetiveria zizanioides*) and treated by retention time 3 h. The result was found that *Vetiveria zizanioides* gave a higher removal of water color and COD at 82.07% and 84.61% respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ คณิดา ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
ที่ให้ความรู้คำปรึกษาแนะนำและสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไป
ได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณคณาจารย์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและคำสั่งสอน
แก่ผู้วิจัยเพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ตลอดจนขอขอบใจเพื่อนๆ นิสิต
ปริญญาโท วิทยาลัยสิ่งแวดล้อมรุ่น 36 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังใจและกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอื่นแก้ว ที่คอยเป็นกำลังใจใน
การศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งเมตตา อบรม สั่งสอน และคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุน
ทุนการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เบญจพรรณ อินแก้ว
พฤษภาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	67
อุปกรณ์	67
วิธีการ	69
ผลและการวิจารณ์	74
สรุปและข้อเสนอแนะ	104
สรุป	104
ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	106
ภาคผนวก	113
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆของ โรงงานขนาดกลาง	17
2 สมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ	18
3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์	24
4 ความสามารถของหญ้าแฝกที่ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ	58
5 คุณภาพน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตเยื่อและกระดาษ	76
6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ของชั้นวัสดุปลูก ด้วยระยะเวลาบำบัดต่างๆกัน โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์	96
7 คุณภาพน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ หลังการบำบัดแบบธรรมชาติ	101
ตารางผนวกที่	
1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ ที่เหมาะสม	114
2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ ที่เหมาะสม	115
3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	116
4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับระยะเวลา ที่เหมาะสม(ชั่วโมง)	116
5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	117
6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของเถาลอยลิกไนต์ผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ กัน	118
8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของเถาลอยลิกไนต์ผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ กัน	119
9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับของเถาลอยลิกไนต์	120
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 15 นาที	120
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 15 นาที	121
12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง	122
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง	123
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน	124
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน	124
16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที	125
17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที	126
18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 ชั่วโมง	127
19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 ชั่วโมง	128

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 วัน	129
21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 วัน	129
22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	130
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการ ปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	130
24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการ ปลูกพืช (ธูปฤาษี) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	131
25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการ ปลูกพืช (ธูปฤาษี) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	131
26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ ปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	132
27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ ปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง	132

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ผังกระบวนการผลิตกระดาษ และค่า TSS และ BOD ของน้ำเสีย	6
2 กระบวนการผลิตกระดาษ	15
3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ	20
4 รูปร่าง และลักษณะผิวของถ้ำลอย	25
5 การแบ่งประเภทถ้ำลอย	26
6 บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด	27
7 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด	28
8 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	31
9 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	32
10 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	33
11 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว	33
12 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	35
13 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	35
14 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	39
15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	42
16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนดิช	43
17 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช	44
18 กลไกการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว	44
19 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ผิวเท่ากับ q_m	45
20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	46
21 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	47
22 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	48
23 Breakthrough Curve ของ Fixed-bed adsorption column	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
24	รูปของกราฟเบรคทรูจีในกระบวนการดูดคิดผิว
25	ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก
26	ลักษณะรากของหญ้าแฝก
27	รูปถ่าย <i>Typha angustifolia</i> Linn 1. ลักษณะต้น 2. ช่อดอก 3. ดอกตัวเมียที่เป็นหมัน 4. ดอกตัวเมียปกติ
28	ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ผ่านการอบ
29	กราฟมาตรฐานแฟลตทึนัม – โคบอลต์
30	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีกับปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์
31	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีกับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง(ก.) และวัน(ข.)
32	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์(ก.)และไอโซเทอมฟรุนดิช(ข.) การดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดี ของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆกัน
34	คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ
35	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดี กับรอบการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที
36	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง
37	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอดีของน้ำที่เหลือ กับปริมาตรน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง
38	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดี กับรอบการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 ชั่วโมง	91
40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไซด์ของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 ชั่วโมง	92
41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีโอไซด์ กับรอบการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน	93
42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 วัน	94
43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีโอไซด์ของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 วัน	95
44 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ (ข.) ของระบบบำบัดแบบไหลต่อเนื่องของการทดลองชุดควบคุมดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์	97
45 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ (ข.) ของระบบบำบัดแบบแข่งขันน้ำเสีย แบบ 3 ชั่วโมงของการทดลองชุดควบคุมดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์	98
46 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ (ข.) ของระบบบำบัดแบบแข่งขันน้ำเสีย แบบ 3 วัน และปล่อยแห้ง 2 วันของการทดลองชุดควบคุมดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์	99
47 กระบะเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ การบรรจุชั้นวัสดุปลูก	100
48 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ (ข.) ของระบบบำบัดแบบธรรมชาติระหว่างกระบะที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพีช (หญ้าแฝก) กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 49 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดสีโอดี (ข.)
 ของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ระหว่างกระบะที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์
 ผสมดินปลูกพืช(ธูปฤาษี) กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว

103

**การพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์สำหรับดูดซับมลสาร
ในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ**

**Development of Natural Treatment by Using Lignite Fly Ash for Pollutants
Adsorption in Pulp and Paper Industry Wastewater Treatment**

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ยังคงความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจและสังคม และมีความจำเป็นต่อการพัฒนาประเทศในฐานะที่เป็นอุตสาหกรรมต้นทางที่ส่งทอดเชื่อมโยงไปยังอุตสาหกรรมขั้นกลางและอุตสาหกรรมปลายทาง อันได้แก่ อุตสาหกรรมกระดาษ บรรจภัณฑ์ และสิ่งพิมพ์ ทั้งนี้ แม้อุตสาหกรรมนี้จะไม่ใช่อุตสาหกรรมที่สร้างเม็ดเงินหรือความมั่งคั่งให้กับเศรษฐกิจของประเทศโดยตรง แต่ก็มีส่วนส่งเสริมให้เกิดการจ้างงาน การกระจายรายได้ รวมไปถึง สามารถสร้างรายได้เข้าประเทศจากการผลิตเพื่อส่งออก ซึ่งจากแนวโน้มความต้องการใช้เยื่อกระดาษทั้งในประเทศและในตลาดโลกที่ขยายตัวสูงในช่วงที่ผ่านมา ทำให้ปฏิเสธไม่ได้ว่าอุตสาหกรรมนี้เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่นับวันจะยิ่งมีความสำคัญ มีความน่าสนใจ และเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่น่าจะได้รับการสนับสนุนส่งเสริมให้มีการขยายการลงทุนเพิ่มขึ้นในอนาคต เมื่อความต้องการมากขึ้นกำลังการผลิตจึงมากขึ้นตามไปด้วย อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตมากเป็นอันดับสามรองจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะและสารเคมี โดยปริมาณน้ำที่ใช้นั้นจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของกระดาษที่ผลิต ซึ่งสูงสุดถึงร้อยละ 30-100 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ขึ้นอยู่กับคุณภาพของกระดาษที่ต้องการผลิตและความทันสมัยของเครื่องจักร โดยน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในกระบวนการล้างเยื่อกระดาษ และผสมเยื่อกระดาษ ทำให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีมลพิษปนเปื้อนสูง ทั้งจากเยื่อกระดาษในขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการขัดแต่งกระดาษ ซึ่งพบว่าโรงงานบางแห่งอาจมีค่าซีโอดีของน้ำเสียสูงถึง 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Thompson and Forster, 2003) ประกอบกับการที่วัตถุดิบหลักของการผลิตกระดาษคือ ไม้ ดังนั้นจึงทำให้ลักษณะของน้ำเสียนั้นจะมีสีน้ำตาลเข้มที่เกิดจากสีของลิกนินในเปลือกไม้ จึงทำให้สีของน้ำ, ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการใช้เพื่อออกซิเดชัน สารอินทรีย์ใน น้ำ ให้เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ และ น้ำ, ฟิเอช และค่าของแข็งแขวนลอยรวม ที่มีปริมาณค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าโรงงานจะมีการบำบัดน้ำเสียด้วย

กระบวนการตะกอนเร่ง ที่สามารถบำบัดความสกปรกของน้ำเสียได้ แต่ก็ยังไม่สามารถลดปริมาณสีของน้ำและซีโอดี ที่ยังคงมีปริมาณสูงได้ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ รวมทั้งคุณภาพชีวิตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงอีกด้วย นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีเถาลอยลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำที่มีสัดส่วนของถ่านหินลิกไนต์อยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับชีวมวล 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเถาลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งในแต่ละปีนั้นมีปริมาณมากถึง 49,000 ตัน/ปี ถึงแม้ว่าทางบริษัทจะมีการนำไปขายเพื่อเป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ หรือการนำไปเพื่อฝังกลบที่ดินบางส่วนแล้วก็ตาม แต่ก็ยังมีเถาลอยลิกไนต์อีกปริมาณมากที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงได้มีการศึกษาที่จะนำเถาลอยลิกไนต์ที่มีคุณภาพต่ำมาพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยผสมกับดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เนื่องจากเถาลอยลิกไนต์นั้นมีลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุน มีทรงกลม และมีขนาดเล็ก จึงสามารถที่จะเข้าไปช่วยอุดช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเม็ดดิน ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของดิน และช่วยลดชั้นสารมลพิษในน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษได้ดียิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อพัฒนาระบบบำบัดแบบธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพ สามารถลดค่าซีโอดีและสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ้ำลอยลึกในทัศนภาพดำมาเป็นตัวดูดซับมลสาร เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ
2. เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์กากของเสียอุตสาหกรรม ในงานทางสิ่งแวดล้อม

การตรวจเอกสาร

1. อุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตมากเป็นอันดับสามรองจากอุตสาหกรรมผลิตโลหะและสารเคมี แต่สำหรับในปัจจุบันและแนวโน้มในอนาคต คาดว่าอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษจะเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำมากที่สุด นอกจากนี้ อุตสาหกรรมกระดาษยังเป็นอันดับห้าของอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุของมลภาวะทางน้ำ โดยมีปริมาณน้ำที่ใช้แตกต่างกันตามชนิดของกระดาษที่ผลิต ซึ่งมีปริมาณถึง 30-100 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของกระดาษที่ต้องการผลิตและความทันสมัยของเครื่องจักร โดยน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้ในกระบวนการล้างเยื่อกระดาษ (Pulp Washing) และการผสมเยื่อกระดาษ (Pulp Mixing) ทำให้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีมลพิษปนเปื้อนสูง ทั้งจากเยื่อกระดาษในขั้นตอนการล้างวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการขัดแต่งกระดาษ ซึ่งพบว่าในโรงงานบางแห่งอาจมีค่าซีไอดัชนีของน้ำเสียสูงถึง 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Thompson and Forster , 2003)

อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องมาจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยเป็นการใช้เยื่อกระดาษมาผลิตกระดาษชนิดต่างๆ และเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจซึ่งจะสามารถทดแทนการนำเข้ากระดาษจากต่างประเทศได้อย่างมาก ซึ่งอัตราการบริโภคกระดาษของคนไทยนั้น โดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 40 กิโลกรัมต่อคนต่อปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (กลุ่มงานบริการส่งออก 4, 2545)

1.1 วัตถุดิบในการผลิตกระดาษ

พืชทุกชนิดประกอบด้วยเส้นใย ซึ่งมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก พืชทุกชนิดจะสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษได้ทั้งหมด พืชที่สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบได้นั้น จำเป็นที่จะต้องมียเส้นใยที่แข็งแรง นอกจากคำนึงถึงคุณสมบัติของเส้นใยแล้วยังต้องมีความเป็นไปได้ทางธุรกิจด้วยเช่นกัน คือ จำเป็นต้องหาง่าย การเก็บและการขนส่งต้องไม่ยุ่งยากพืชที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.1.1 ไม้ยืนต้น (Wood) หมายถึง พืชที่มีลักษณะเป็นลำต้นแข็งแรง อายุยืน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. ไม้เนื้ออ่อน (Softwood) เป็นไม้ที่ขึ้นในที่สูง อากาศเย็น โตช้า ใบมีลักษณะแคบ เรียวยาว เส้นใยไม้เนื้ออ่อนเรียกว่า เยื่อยาว มีลักษณะหยาบ ความแข็งแรงสูง พืชในกลุ่มนี้ได้แก่ สน (Pine)

ข. ไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) เป็นไม้ที่ขึ้นในบริเวณเขตร้อน โตเร็ว ใบมีลักษณะกว้าง เส้นใยในเนื้อไม้แข็ง เรียกว่า เส้นใยสั้น มีลักษณะเล็ก ละเอียด ความแข็งแรงต่ำ ไม้ในกลุ่มนี้ได้แก่ ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) เบิร์ช (Birch) แอสเพน (Aspen) กระถินเทพา (Acacia)

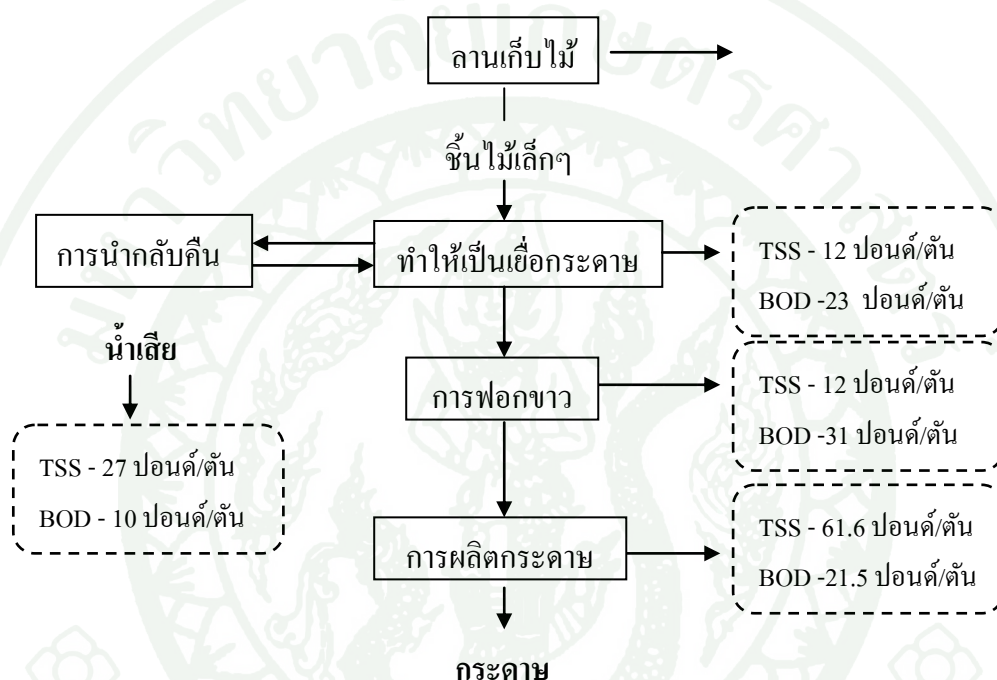
1.1.2 ไม้ล้มลุก (Nonwood) ได้แก่ พืชอื่นนอกเหนือจากไม้ยืนต้น ที่เส้นใยนั้นมีคุณสมบัติเหมาะสม สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ ได้แก่ ปอ ฝ้าย หรือส่วนที่เหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย เป็นต้น ข้อเสียของเส้นใยที่ได้จากไม้ล้มลุก คือ จะทำให้ได้กระดาษที่มีคุณสมบัติที่ไม่แน่นอน

นอกจากนี้ไม้ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักแล้วยังมีการใช้น้ำ สารเคมี และน้ำมันเตาในการผลิตกระดาษร่วมด้วย

1.2 กระบวนการผลิตกระดาษ

ไม้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ ซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส ประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เช่น เรซิน ไขมัน เป็นต้น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษมีกระบวนการผลิตหลักๆ ที่สำคัญ คือ กระบวนการเตรียมเยื่อ (Pulping Process) กระบวนการฟอกเยื่อกระดาษ (Bleaching Process) และการสร้างกระดาษ (Paper Manufacturing) ซึ่งประกอบไปด้วย การบีบอัดกระดาษ การทำแผ่นกระดาษ (Papermaking) การปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะเดินแผ่น (Web modification) การเป่าแห้งและการแปรรูป (Converting) (Simon and Bruce, 2003)

กระบวนการทำเยื่อกระดาษที่ใช้อย่างกว้างขวางได้แก่ กระบวนการคราฟท์ (Kraft) เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถผลิตเยื่อกระดาษที่มีความแข็งแรงได้จากเยื่อหลายชนิด โดยแผนผังกระบวนการผลิตกระดาษ ซึ่งใช้เยื่อกระดาษคราฟท์ฟอกขาว รวมทั้งค่าบีโอดี และค่าของแข็งแขวนลอยรวม ของน้ำเสียจากกระบวนการ ได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังกระบวนการผลิตกระดาษ และค่า TSS และ BOD ของน้ำเสีย

ที่มา: ปิยะนันท์ (2539)

กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษ (Pulping) เป็นกระบวนการแยกกลินิน เรซิน และไขมันออกจากเยื่อเซลลูโลส ขั้นตอนในส่วนของการเตรียมเยื่อกระดาษนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการคัดแยกเส้นใยออกมาจากองค์ประกอบอื่นๆ ของไม้ ซึ่งการผลิตเยื่อนั้นสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ทั้งทางกลและทางเคมี ซึ่งสำหรับบางกรณีนั้นต้องมีการนำเยื่อไม้ไปผ่านกระบวนการฟอกขาวก่อน ในการผลิตเยื่อนั้นจึงประกอบด้วย กรรมวิธีการผลิตเยื่อและการฟอก การผลิตเยื่อมีด้วยกันหลายวิธี ดังนี้

1.2.1 ประเภทของการเตรียมเยื่อกระดาษ

ก. การผลิตเชิงกล (mechanical pulping process) จะเป็นการใช้พลังงานกลควบคู่ไปกับพลังงานความร้อนในการแยกเส้นใยออกมา โดยท่อนไม้/ชิ้นไม้จะถูกส่งเข้าเครื่องบดซึ่งจะทำหน้าที่บดและตัด จนชิ้นไม้นั้นแหลกละเอียดเป็นเยื่อไม้ เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อไม้บดหรือเยื่อเชิงกล ให้ผลผลิตเยื่อในช่วงนี้มากกว่าร้อยละ 85 เยื่อไม้บดนี้จะมีลักษณะที่ค่อนข้างหยาบกระด้าง เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่จะไม่สมบูรณ์ มีการตัดขาดและตัดเป็นท่อนๆ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของเส้นใยปนอยู่ด้วย ดังนั้นในเยื่อไม้บดจึงประกอบด้วย

1) เส้นใยฝอย (fines) ซึ่งเกิดการฉีกขาดของเส้นใย

2) เส้นใยเดี่ยว (individual fiber) ไม่ค่อยสมบูรณ์

3) มัดของเส้นใย (bundle of fiber) ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยหลายๆเส้นเกาะติดกันเป็นมัด ซึ่งเยื่อชนิดนี้เมื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการทำกระดาษ จะให้คุณสมบัติตามส่วนประกอบทั้ง 3 คือ เส้นใยฝอยจะเพิ่มคุณสมบัติด้านทึบแสง เส้นใยซึ่งไม่ค่อยสมบูรณ์และยังคงมีลิกนินตกค้างอยู่มาก ทำให้พันธะระหว่างเส้นใยนั้นต่ำ การกลับสีเร็ว เยื่อชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่จะนำไปทำกระดาษที่ต้องรับแรงสูงๆ หรือเก็บไว้เป็นเวลานานๆ จึงทำให้มีราคาถูก เหมาะสำหรับการทำสิ่งพิมพ์ราคาถูก เช่น หนังสือพิมพ์ หรือใช้เป็นเยื่อชั้นใน

ข. การผลิตเยื่อเชิงเคมี (chemical pulping process) การผลิตเยื่อตามกรรมวิธีนี้จะใช้พลังงานเคมีและพลังงานความร้อนในการทำที่เส้นใยนั้นแยกจากกัน โดยชิ้นไม้นั้นจะถูกส่งเข้าหม้อต้มเยื่อ (digester) สารเคมีและความร้อนนั้นจะละลายลิกนินออกไป และเหลือส่วนที่ไม่ละลายคือ เยื่อ เยื่อเคมีนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน และสามารถเรียกชื่อตามสารเคมีที่ใช้ในการผลิต เช่น เยื่อซัลเฟต เยื่อซัลไฟต์ และเยื่อโซดา เยื่อเคมีนี้ให้ผลผลิตประมาณร้อยละ 40 ซึ่งจะมีลักษณะนุ่มสีค่อนข้างคล้ำ เส้นใยที่ได้จะสมบูรณ์เยื่อชนิดนี้มีปริมาณการใช้สูงมาก เพราะสามารถพัฒนาศักยภาพของเส้นใยให้สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เหมาะทั้งใช้ในงานรับแรงและเพื่อการสื่อสาร ถ้าเพื่อใช้งานรับแรง เช่น การนำไปทำกระดาษบรรจุภัณฑ์ไม่จำเป็นต้องผ่านการฟอก แต่ถ้าใช้เพื่อการสื่อสารจะต้องมีการนำไปฟอกให้ขาวก่อน

เยื่อและเศษกระดาษ (secondary pulp) ในปัจจุบันเศษกระดาษ (reclaimed and waste paper) ถือได้ว่าเป็นแหล่งเส้นใยที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของการที่นำเส้นใยกระดาษที่ใช้แล้วทั้งจากภายในประเทศและภายนอกประเทศมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ เยื่อที่ได้จากเศษกระดาษที่ใช้แล้วนั้นเรียกว่า secondary pulp ส่วนเยื่อที่ยังไม่เคยใช้ทำกระดาษ เรียกว่า virgin pulp เส้นใยที่ได้จากเศษกระดาษชนิดนี้เรียกว่า recycled fiber เนื่องจากกระดาษที่ผ่านการใช้มาแล้วนั้นมีหลายประเภท เช่น ถ้าเป็นกระดาษที่ผ่านการพิมพ์ต่างๆ ก่อนนำมาทำเป็นเยื่อต้องผ่านกระบวนการเอาหมึกออก (deinking) เสียก่อนแล้วจึงนำไปฟอกให้ขาว สำหรับนำไปผลิตกระดาษสำหรับพิมพ์หรือกระดาษชำระ แต่ถ้าจะนำไปผลิตกระดาษเหนียว หรือกระดาษสีน้ำตาลก็ไม่จำเป็นต้องเอาหมึกออก เยื่อจากกระดาษหรือเศษกระดาษที่ได้ส่วนมากจะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ทำเป็นเยื่อชั้นในกระดาษแข็ง หรือทำเป็นกระดาษชำระ

1.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเยื่อกระดาษ/ผลิตเยื่อกระดาษ

โดยทั่วไปขั้นตอนการผลิตเยื่อกระดาษ จะมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

ก. การจัดเตรียมวัตถุดิบ

จุดประสงค์ของการจัดเตรียมวัตถุดิบ คือ เพื่อทำการแยกและกำจัดสิ่งปะปนที่ไม่ต้องการออกและแปรรูปให้มีขนาดที่เหมาะสม เช่น วัตถุดิบประเภทไม้ นั้นจะถูกปอกเปลือกออก จากนั้นจะถูกล้างด้วยน้ำก่อนนำเข้าเครื่องสับชิ้นไม้ และคัดแยกขนาดชิ้นไม้เพื่อกำจัดเสี้ยนไม้ และฝุ่นไม้ออกไป

ข. การแยกเส้นใย (Pulp Disintegration)

วิธีการแยกเส้นใยมีด้วยกันอยู่ 3 กลุ่ม คือ กระบวนการกล กระบวนการกึ่งเคมี และกระบวนการเคมี โดยกลุ่มแรกวัตถุดิบจะเข้าเครื่องบดเพื่อกระจายเส้นใยออกจากกัน ซึ่งอาจจะใช้สารเคมีและความร้อนเข้าช่วย ส่วนสองกลุ่มหลังวัตถุดิบจะเข้าสู่หม้อต้มเยื่อเพื่อทำการแยกเส้นใยซึ่งวิธีการแต่ละกลุ่มจะให้คุณสมบัติของเยื่อแตกต่างกัน

ก. การคัดขนาด

เส้นใยที่ถูกคัดขนาดแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการคัดขนาดของเยื่อ เพื่อแยกเยื่อออกจากสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ต้องการ เช่น ดาไม้ ชี้นไม้สับที่ผ่านการต้มเยื่อไม่สมบูรณ์ และเส้นใยที่ยังไม่สมบูรณ์

ง. การล้างเยื่อ

หากทำการแยกเส้นใยโดยใช้กระบวนการกึ่งเคมี กระบวนการเคมี เมื่อผ่านขั้นตอนการคัดขนาดเยื่อแล้วจะต้องผ่านขั้นตอนการล้างเยื่อ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของเยื่อกึ่งเคมี จุดประสงค์ในการล้างเยื่อคือ ต้องการล้างของเหลวค่า ซึ่งประกอบด้วยสารเคมี ลิกนิน และส่วนประกอบอื่นๆ ของเส้นใยออกจากเยื่อ

จ. การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O_2 Delignification)

ในการผลิตเยื่อเคมีโดยใช้ยูการ์ลิปดัส และไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบ จะถูกสกัดลิกนินออกจากเยื่อโดยใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับลิกนินช่วยให้ลิกนินหลุดออกเพิ่มมากขึ้น หลังจากลิกนินบางส่วนได้หลุดไปแล้วในขั้นตอนการล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อขั้นตอนแรกก่อนเข้าสู่การฟอกเยื่อขาว

ฉ. การฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อเป็นการทำให้เยื่อมีสีขาวเหมาะกับการใช้กระดาษเพื่อการสื่อสารต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

- 1) วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออก
- 2) วิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี

เยื่อเคมีจะฟอกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนินให้ออก การฟอกแบบนี้มีหลายขั้นตอนโดยทั่วไปแล้วนั้นจะมีตั้งแต่ 3-6 ขั้นตอน (CEH CEDEP CEOP) เยื่อที่มีความ

สว่างสูงประมาณร้อยละ 80-95 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดแบบ Elrepho ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อที่เรียกตามสารเคมีที่ใช้ในการฟอก และขั้นตอนการฟอกนั้นจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้ในการเรียก เช่น การฟอกแบบ CEDED

สารเคมี	สัญลักษณ์	เรียกชื่อขั้นตอนการฟอก
Chlorine	C	ชั้นคลอรีเนชัน (chlorination stage)
Sodium hydroxide	E	ชั้นเอ็กแทรกชัน (extraction stage)
Calcium hypochlorite	H	ชั้นไฮโปคลอไรต์ (hypochlorite stage)
Chlorine dioxide	D	ชั้นคลอรีนไดออกไซด์ (chlorinedioxide stage)
Hydrogen peroxide	P	ชั้นเปอร์ออกไซด์ (peroxide stage)
Oxygen	O	ชั้นออกซิเจน (oxygen stage)
Ozone	Z	ชั้นโอโซน (ozone stage)
Acid	A	ชั้นแอซิด (acid stage)

ที่มา: โครงการฉลากเขียว สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ข. หน่วยทำความสะอาดเชื้อหลังการฟอก

สำหรับขั้นตอนนี้เชื้อกระดาษจะถูกทำความสะอาดขั้นตอนสุดท้าย เพื่อแยกสิ่งสกปรกที่อาจปะปนไปกับผลิตภัณฑ์หลังเชื้อกระดาษเข้าสู่ขั้นตอนการเดินแผ่น

ข. การเตรียมน้ำเยื่อ

ในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาคุณภาพของเส้นใย โดยการนำเยื่อไปบด และปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยการผสมใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า “น้ำเยื่อ” หรือ “สต็อก (stock)” เยื่อที่นำมาทำกระดาษทุกชนิดนั้นจะต้องผ่านการบด ซึ่งจะบดมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของเยื่อ ซึ่งสำหรับเยื่อบางชนิดนั้นไม่จำเป็นต้องบด เช่น

เยื่อไม้บด หรือเยื่อเวียนทำใหม่ ในขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการบดและผสม โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติการเรียงลำดับดังนี้

1) การตีเยื่อกระดาษ การผลิตกระดาษเริ่มจากการนำเยื่อแห้งหรือเศษกระดาษมาตีผสมกับน้ำในถังตีเยื่อ โดยเยื่อจะถูกใบกวนก้นถังตีจนเส้นใยกระจายตัว และมีอุปกรณ์ช่วยกำจัดเศษเชือก พลาสติก ถวดออกจากเยื่อ

2) การบดเยื่อ (Refining) เยื่อที่ผ่านการตีจนเส้นใยกระจายตัวดีแล้วจะผ่านเครื่องบดเยื่อ ให้แตกตัวออกมาเป็นเส้นใยย่อยๆ โดยเยื่อจะเสียดสีกับ Refiner plate ทำให้เยื่อมีขนาดเล็กลง พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เส้นใยอุ้มน้ำได้ดีขึ้นและเกิดพันธะระหว่างกันได้ง่ายขึ้น มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของเส้นใยสูงขึ้น

3) การผสมเยื่อ (Propotioning) การผลิตกระดาษนั้นใช้วัสดุหลายประเภททั้งเยื่อใหม่ที่มีลักษณะเป็นเยื่อสีขาว เยื่อใยสั้น เยื่อจากเศษกระดาษและเยื่อจากน้ำใต้ตะแกรงลวดเดินแผ่น ขั้นตอนนี้เป็น การนำเยื่อตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมกันในถังผสมและเติมสารเคมีที่ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษ เมื่อการผสมเสร็จสิ้น น้ำเยื่อจะมีความเข้มข้นประมาณ 3-3.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่จะนำไปทำแผ่นต่อไป

4) การทำความสะอาดเยื่อ ในขั้นตอนนี้เยื่อจะถูกเหวี่ยงในภาชนะทรงกรวย เรียกว่า centrifugal cleaner ส่วนที่เบา เช่น เส้นใยและสารเคมีที่เติมลงไปจะลอยขึ้นสู่ด้านบน ส่วนกรวดและทราย จะตกลงมาข้างล่างและถูกแยกออกไป หรือการทำความสะอาดอีกรูปแบบหนึ่งคือ บั้มเยื่อผ่านตะแกรงกรองเพื่อแยกสิ่งแปลกปลอมออกก่อน เรียกว่า pressure screen จากนั้นบั้มเยื่อสะอาดขึ้นสู่ head box ต่อไป

5) การกำจัดหมึก ในกรณีที่มีการนำเศษกระดาษเก่าที่มีการพิมพ์มาใช้ จะต้องผ่านกระบวนการกำจัดหมึก ซึ่งการกำจัดหมึกนั้นจะต้องเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาให้หมึกแยกตัวออกจากเยื่อกระดาษ สารเคมีที่ใช้ในการกำจัดหมึกได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สบู่หรือกรดไขมัน และ chelating agen

ฉ. ขั้นตอนการทำแผ่นกระดาษ

ขั้นตอนการทำแผ่นกระดาษ หลังการผสมน้ำเรียบร้อยแล้ว น้ำเยื่อจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า เว็บเปเปอร์ (web paper) เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระดาษนั้นมีหลายรูปแบบ ส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดรีเนียร์ (fourdrinier) และแบบไซลินเดอร์ (cylinder) เครื่องจักรผลิตกระดาษทุกแบบจะมีส่วนประกอบต่างๆ เพื่อทำหน้าที่หลัก 3 ประการ คือ

1.2.3 หน้าที่หลักของเครื่องจักรผลิตกระดาษ

ก. การแยกน้ำออก ทำหน้าที่เป็นตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรง ทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก

ข. การกดน้ำออก ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ

ค. การอบกระดาษ แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งเพื่อไล่น้ำออกจนกระดาษแห้งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 4-6 ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรผลิตกระดาษ ได้แก่

- 1) ถังจ่ายเยื่อ (head box) ทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น
- 2) ส่วนตะแกรงลวดเดินแผ่น (wire section หรือ forming section) ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือ การก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรอง และการแยกน้ำออก แผ่นเปียกที่ออกจากส่วนนี้จะมีน้ำอยู่ร้อยละ 80
- 3) ส่วนกดกระดาษ ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียกทำให้เกิดการยึดแน่นภายในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ออกจากส่วนนี้จะมีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 55-60 การเอาน้ำออกมาให้ได้มากกว่านี้ด้วยแรงกดไม่สามารถจะทำได้เพราะจะทำให้กระดาษขาด

4) ส่วนอบกระดาศ ในส่วนนี้จะมีความร้อนกับกระดาศ ทำให้กระดาศแห้ง โดยกระดาศที่ออกมาจากส่วนนี้จะมีความชื้นประมาณร้อยละ 4-6

5) ส่วนรีดกระดาศ ทำหน้าที่ปรับแผ่นกระดาศให้เรียบ และมีเนื้อแน่นขึ้น แต่ไม่จำเป็นต้องใช้สำหรับกระดาศบางชนิด เช่น กระดาศชำระ

6) ส่วนพับกระดาศเข้าม้วน ทำหน้าที่นำกระดาศเข้าม้วน

1.2.4 ขั้นตอนการทำแผ่นกระดาศ

ก. การทำแผ่นกระดาศจากน้ำเชื้อ หลังจากเตรียมน้ำเชื้อเรียบร้อยแล้ว น้ำเชื้อจะถูกส่งไปยังถังจ่ายเชื้อซึ่งทำหน้าที่จ่ายน้ำเชื้อเข้าสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น (wire) เพื่อให้เชื้อก่อตัวเป็นแผ่นกระดาศ

ข. การรีดน้ำออกจากแผ่นกระดาศเปียก หลังจากที่อยู่ประสานตัวกันเป็นแผ่นเปียกในช่วงทำแผ่นแล้ว จะผ่านการรีดน้ำออกโดยลูกกลิ้งรีดน้ำ โดยน้ำส่วนหนึ่งจะถูกผ้าสักหลาดของชุดรีดน้ำซับไว้ และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านรูลมสูญญากาศของลูกกลิ้งลูกล่างซึ่งมีรูพรุนตลอดทั้งลูก ทำให้กระดาศที่ถูกรีดน้ำออกแห้งลง

ค. การอบแห้งกระดาศ แผ่นกระดาศที่ผ่านการรีดน้ำออกแล้ว จะมีความชื้นเหลืออยู่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ จะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้แห้งด้วยชุดลูกอบเพื่อให้เหลือความชื้นในแผ่นกระดาศ 5-10 เปอร์เซ็นต์โดยจะจ่ายไอน้ำอ้อมตัวความดันต่ำเข้าไปในลูกอบเพื่อให้ผิวลูกอบร้อนขึ้นสำหรับทำแผ่นกระดาศแห้ง

ฅ. การฉาบผิวกระดาศ กระดาศที่ผ่านส่วนอบแห้งชุดแรกจะถูกฉาบด้วยน้ำแป้งคัมสุกทั้งสองข้าง ทำให้ผิวกระดาศแข็งแรงขึ้นและทำให้กระดาศมีความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น เพราะน้ำแป้งจะไปอุดรูที่ผิวกระดาศ ถัดจากเครื่องฉาบผิวจะเป็นส่วนให้ความร้อนแบบลมร้อน และส่วนอบแห้งชุดหลังเพื่อให้กระดาศแห้ง อาจมีการเติมสารบางอย่างลงไปในน้ำแป้งด้วย

ง. การเคลือบผิวกระดาช เป็นขั้นตอนการเคลือบผิวกระดาชด้วยตัวเติมเพื่อช่วยให้กระดาชมีผิวที่เรียบขึ้น

ญ. การขัดผิวหน้ากระดาช กระดาชพิมพ์เขียนซึ่งต้องการความเรียบของผิวหน้า จะต้องผ่านเครื่องขัด เพื่อขัดผิวหน้าให้เรียบขึ้นและมีความหนาสม่ำเสมอทั้งแผ่น

ฎ. การเข้าม้วนกระดาชและการจัดการกระดาชตามขนาดมาตรฐาน ในขั้นนี้จะนำกระดาชมาเข้าม้วน เพื่อรอส่งต่อไปเพื่อทำผลิตภัณฑ์หรือจำหน่าย และบางส่วนจะมีการตัดเป็นแผ่นตามขนาดที่ต้องการ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

2. มลพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตกระดาษ

2.1 น้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก พารามิเตอร์คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตได้แก่ ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าปริมาณสารที่ละลายได้ และค่าปริมาณสารแขวนลอย คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจะแตกต่างกันไปตามลักษณะของกำลังการผลิต วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต และคุณภาพของกระดาษผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จะต้องผ่านกระบวนการการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ แตกต่างกันไปตามประเภทของกระบวนการผลิตรวมถึงสารเคมีที่ใช้ โดยเฉพาะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อเคมี ซึ่งจะมีอัตราส่วนค่าซีโอดีต่อบีโอดีสูง เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตในปริมาณสูง ในน้ำเสียจึงมีสารเคมีอยู่ปริมาณมากเช่นกัน ซึ่งอัตราค่าซีโอดีต่อบีโอดีสูงนี้ จะเป็นตัวที่บ่งบอกถึงว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษนั้นสามารถบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ค่อนข้างยาก นอกจากนี้ลิกนินนั้นก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้ น้ำเสียบำบัดได้ยากด้วยวิธีการชีวภาพแบบไร้อากาศ เนื่องจากลิกนินนั้นเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ อีกทั้งลิกนินเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดสีในน้ำเสีย ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญอีกข้อหนึ่งของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วยังไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกต้องเพียงพอ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตกระดาษชนิดต่างๆ ของโรงงานขนาดกลาง

ชนิดโรงงาน	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม/ตัน กระดาษ)	คุณสมบัติของน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
		บีโอดี	ซีโอดี	ของแข็ง แขวนลอย	ของแข็ง ละลายน้ำ
โรงงานผลิตกระดาษ					
หนังสือพิมพ์	34.54	0.8×10^3	3.0×10^3	3.5×10^3	2.7×10^3
โรงงานผลิตกระดาษ					
คราฟท์	17.00	0.756×10^3	1.273×10^3	0.165×10^3	3.076×10^3
โรงงานผลิตกระดาษ					
แข็ง	29.40	0.51×10^3	1.04×10^3	0.825	2.19×10^3
โรงงานผลิต					
กระดาษพิมพ์เขียน	92-133	86-136	192-235	213-405	448-819
โรงงานผลิตกระดาษ					
อนามัย	42.40	0.63×10^3	2.6×10^3	2.4×10^3	2.4×10^3

ที่มา: สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

2.1.1 ที่มาและปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นภายหลังจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษจะเกิดขึ้นในแต่ละส่วนของกระบวนการผลิต โดยเริ่มตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การลอกเปลือกไม้ การต้มเยื่อกระดาษ การล้างและฟอกเยื่อกระดาษ การทำเยื่อกระดาษให้เป็นแผ่น จากหม้อต้มไอน้ำ หม้อต้มระเหย การผลิตน้ำยาเคมีกลั่น และจากการเตรียมสารเคมี นอกจากนี้ยังมีน้ำทิ้งจาก ระบบระบายความร้อน (Blow down) ซึ่งปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

สมบัติ	Maximum	Minimum	Average
pH	9.5	7.6	8.2
Total alkalinity	300.0	100.0	175.0
Phenolphthalein alkalinity, mg/l	50.0	0.0	0.0
Total solids, mg/l	2,000.0	800.0	1,200.0
Volatile solids, %	75.0	60.0	65.0
Total suspended solid, mg/l	300.0	75.0	150.0
Volatile suspended solids, %	90.0	80.0	85.0
BOD, mg/l	350.0	100.0	175.0
Color, Pt-Co Unit	500.0	100.0	250.0

ที่มา: Nelson (1991)

2.1.2 การบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ

น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษนั้นจะมีค่าความสกปรกสูง ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงมีหลายขั้นตอน กว่าจะได้น้ำที่มีค่าความสกปรกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่หน่วยงานราชการกำหนด กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษมีขั้นตอนดังนี้

ก. การบำบัดขั้นต้น และการบำบัดขั้นปฐมภูมิ

การบำบัดน้ำเสียขั้นต้นและขั้นปฐมภูมิมียุทธวิธีขั้นตอนดังนี้ คือ

- 1) น้ำเสียจะถูกปรับสภาพให้เป็นกลางก่อนที่จะผ่านตะแกรงกรอง
- 2) น้ำเสียเข้าสู่ตะแกรงกรอง

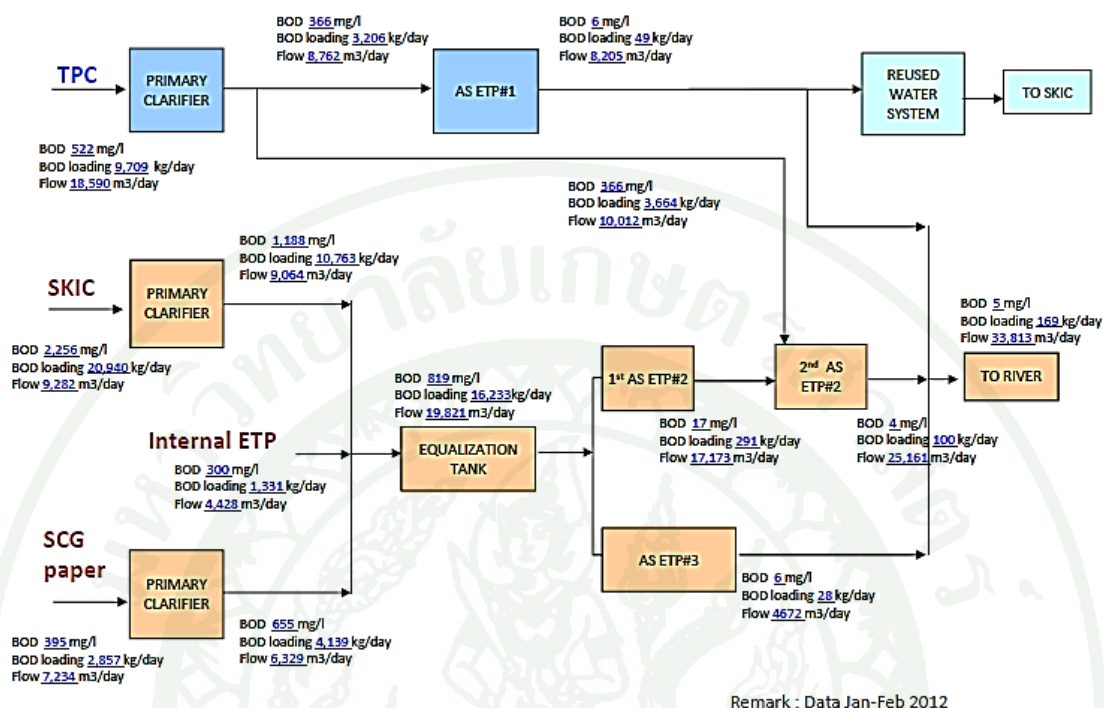
3) น้ำเสียเข้าสู่ถังตกตะกอนขั้นต้น

ข. การบำบัดขั้นทุติยภูมิ

หลังจากที่น้ำเสียผ่านการบำบัดขั้นต้น และระบบปฐภูมิแล้วน้ำเสียที่รวมกันแล้วจะไหลจากถังตกตะกอนขั้นแรกไปยังถังเติมอากาศ เพื่อบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพด้วยระบบตะกอนเร่ง ซึ่งมีหน่วยบำบัดต่างๆ ดังนี้

- 1) บ่อบำบัดอัตราการไหลของน้ำเสีย
- 2) หอหล่อเย็น
- 3) ระบบเติมสารเพื่อเติมสารละลายยูเรีย และโคแอมโมเนียมฟอสเฟตในบ่อเติมอากาศ
- 4) บ่อเติมอากาศ
- 5) ถังตกตะกอนขั้นที่ 2

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วก่อนที่จะไหลไปยังบ่อพักน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วต่อไป กากตะกอนที่เกิดขึ้นบางส่วนนั้นจะถูกส่งกลับไปยังบ่อเติมอากาศ และส่วนที่เกินความต้องการก็จะส่งไปยังระบบบริดน้ำจากกากตะกอน กากตะกอนที่รีดน้ำออกแล้วจะถูกส่งไปยังพื้นที่ฝังกลบ



ภาพที่ 3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

ที่มา: บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556), (บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด, 2556)

2.1.3 ภาวะมลพิษที่เกิดจากน้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษ

ก. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ น้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษมักมีสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา เช่น สารประกอบออกาโนคลอรีน เป็นต้น

ข. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ น้ำทิ้งจากการผลิตเยื่อและกระดาษเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณของออกซิเจนลดลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

ก. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมโทรม น้ำเสียจากการผลิตเชื้อและกระดาษ เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะก่อให้เกิดสภาพที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็น นอกจากนี้สีขุ่นที่มีความเข้มข้นของสีสูง ยังขัดขวางไม่ให้แสงอาทิตย์ผ่านผิวน้ำลงไปได้น้ำไม่ได้หรือได้น้อย ทำให้รบกวนการเจริญเติบโตของพืชน้ำและวงจรชีวิตของสัตว์น้ำ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำนั้น

2.2 สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เกิดจากลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินและโพลีเมอร์ของเทนิน ซึ่งลิกนินเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารในองค์ประกอบหลักของพืชทุกชนิด โดยลิกนินพบมากในผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืชทุกชนิดหน้าที่ทางกายภาพของสารประกอบลิกนินเป็นสารสร้างความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของเนื้อไม้โครงสร้างโมเลกุลของลิกนินมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของลิกนินในพืช นานาชนิด (อัมไพวรรณ, 2550)

2.2.1 ผลกระทบของสีและลิกนินในน้ำเสียที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้พืชเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต เช่น โรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ มีปริมาณลิกนินในน้ำเสียสูง หากไม่ได้มีการบำบัดอย่างเหมาะสม และปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมอาจจะส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ ดังนี้

ก. สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ เกิดจากสารประกอบลิกนินเป็นส่วนใหญ่หากปล่อยสู่แหล่งน้ำโดยตรงปริมาณมาก นอกจากจะทำให้แหล่งน้ำมีสีที่ไม่น่าใช้แล้ว ยังบดบังการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ในน้ำ ทำให้สาหร่ายหรือแพลงตอนพืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งอาจเกิดปัญหาขาดแคลนออกซิเจนน้ำ เป็นเหตุให้แหล่งน้ำเกิดปัญหาน้ำเสีย

ข. คุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบลิกนินบางประเภท จะถูกปลดปล่อยจากกระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อ ฟอกเยื่อ และส่วนการนำสารเคมีกลับคืน ซึ่งสารเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น มีผลต่อการทำให้กระดูกปลาเปลี่ยนรูปร่าง มีผล

ในดับ ไต ม้าม และทางเดินอาหารของปลานิล รวมทั้งยับยั้งการเจริญเติบโตของปลาเทราท์สีรุ้งและทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของพืชและสัตว์น้ำอีกด้วย

2.3 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี

การวิเคราะห์หาค่าของ COD ใช้สำหรับปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั่วไปโดยที่สารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดส์โดยปริมาณที่มากเกิดพอกของสารเคมีประเภทออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในสภาพของความเข้มข้นสูง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Silver sulfate โดยทั่วไปแล้วค่าของ COD จะมีค่ามากกว่าค่า BOD_5 เสมอ และใช้เวลาในการหาประมาณ 3 ชม. ซึ่งรวดเร็วกว่าการหาค่า BOD และปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดส์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดส์โดยวิธีทางชีวภาพ หรือกล่าวได้ว่า 20 ปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในเทอมของ COD เป็นการวัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทั้งที่ย่อยสลายได้ ย่อยสลายได้ช้า และย่อยสลายไม่ได้ด้วยจุลินทรีย์) เช่น กลูโคส ลิกนิน และเซลลูโลส น้ำมัน ไขมันจากเนย พืชและสัตว์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม นอกจากนั้นยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น เฟอร์ริอออน (Fe^{2+}), แมงกานีสอออน (Mn^{2+}), คลอไรด์อออน (Cl^-), ซัลไฟด์อออน (S^{2-}) สารประกอบคลอไรด์ที่แขวนลอยและสารละลายในน้ำเสียของสารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $K_2Cr_2O_7$ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในขณะที่ BOD เป็นการวัดสารอินทรีย์เฉพาะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เท่านั้น นอกจากนี้การที่ค่า COD สูงกว่าค่า BOD เนื่องจากสารอินทรีย์คาร์บอนถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยไม่ต้องอาศัยการดูดซึมทางชีวโดยจุลินทรีย์ เช่น เซลลูโลส และลิกนิน และจะถูกออกซิไดส์อย่างแรง และถ้ามีสารที่ไม่สามารถถูกย่อยทางชีวอยู่ด้วยเช่น เซลลูโลส จะทำให้ค่า COD ยิ่งสูงกว่าค่า BOD มากขึ้น

2.4 แก๊สออกซิเจน

2.4.1 สภาพของแก๊สออกซิเจน

แก๊สออกซิเจนเป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะ

ช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด

ก. เถ้าหนัก เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกันกับผนังเตาและหลอมติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

ข. เถ้าลอย เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาลานหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้า เถ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บเถ้าปริมาณของเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะมีปริมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักถ่านหินที่เผา (วิจิตรอัจฉรา, 2536)

2.4.2 คุณสมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์

ก. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

จากการส่งตรวจตัวอย่างของเถ้าลอยลิกไนต์ไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่าในเถ้าลอยลิกไนต์ประกอบด้วยซิลิกอนออกไซด์ร้อยละ 40.89 โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 14.54 โดยน้ำหนักและองค์ประกอบอื่นๆ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

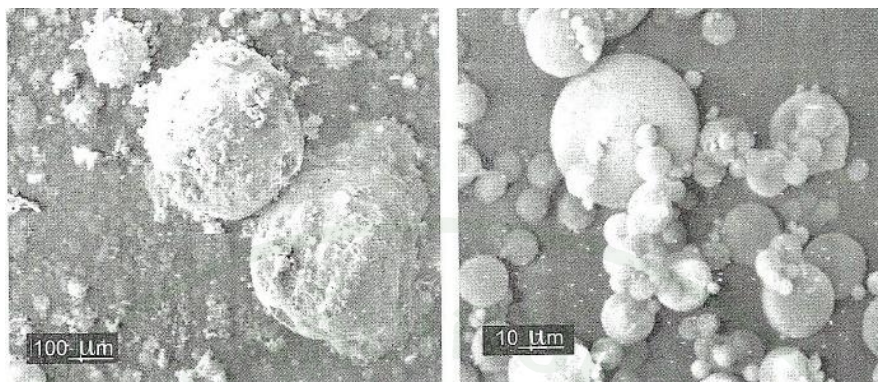
องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าลอยลิกไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	40.89
CaO	14.54
Al ₂ O ₃	13.33
SO ₃	2.71
K ₂ O	2.25
MgO	2.08
MnO	0.39
Fe ₂ O ₃	19.79
P ₂ O ₅	0.57
TiO ₂	0.48
LOI	0.35

หมายเหตุ LOI (Loss On Ignition) คือค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา หรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: วรวิทย์ และคณะ (2553)

ข. คุณสมบัติทางกายภาพ

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลง หลังออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าลอยที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว เถ้าลอยส่วนหนึ่งเกิดจากการปะทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ ทั้งนี้เถ้าลอยขนาดใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง เถ้าลอยขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า และจะมีทรงกลมและผิวเรียบดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 รูปร่าง และลักษณะผิวของเถ้าลอย

ที่มา: ปริญญ (2547)

โครงสร้างทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดที่ผ่านการเผาไหม้จะ สันดาปและหลอมละลายเมื่อเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินขนาดเล็กสามารถลอยตามอากาศ ร้อนไปได้ เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จึงมีทรงกลม เถ้าถ่านหินที่มีขนาด ใหญ่จะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุน ที่ผิวอาจมีปริมาณของคาร์บอนสูง อนุภาคของ เถ้าถ่านหินมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 15-30 ไมครอน เถ้าถ่านหินประกอบด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในเรียกว่า เถ้าถ่านหินกลวง (Chemosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าถ่านหิน และยังมีเถ้าถ่านหิน กลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆอยู่ภายในโพรง เรียกว่า พลีโอสเฟีย (Plerosphere)

เถ้าลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในเถ้าลอย และยังมี เถ้าลอยกลวงที่มีอนุภาคเถ้าถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่า พลีโอสเฟีย (Plerosphere) เถ้าลอยกลวงมี ตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของเถ้าลอยกลวง คือ แก้วอลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากเถ้าลอยกลวงเป็นเถ้าลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมี คุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าลอยกลวงมาใช้ประโยชน์ใน ด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง

ความถ่วงจำเพาะของเถ้าถ่านหินอยู่ที่ 2.0-2.2 องค์ประกอบทางเคมี เถ้าถ่าน หินมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3)

อัตราส่วนของออกไซด์ทั้งสามชนิดจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะเผา ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภทคือ Class C และ Class F โดยเถ้าถ่านหิน Class C มีปริมาณของออกไซด์ดังกล่าวน้อยกว่าร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก ส่วนเถ้าถ่านหิน Class F มีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก โดยส่วนใหญ่แล้วเถ้าถ่านหินซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) และถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) เมื่อเผาแล้วจะให้ถ่านหิน Class C เป็นส่วนใหญ่ ขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) และบิทูมินัส (Bituminous) เมื่อเผาแล้วจะให้ถ่านหิน Class F เป็นส่วนใหญ่ ดังภาพที่ 4



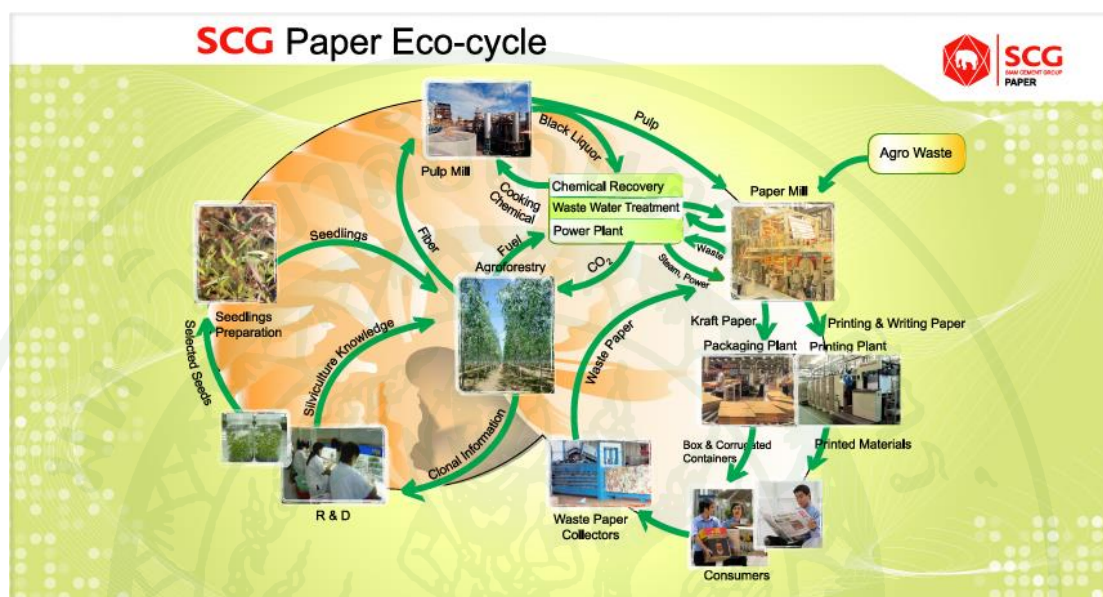
ภาพที่ 5 การแบ่งประเภทเถ้าลอย

ที่มา: ชีรวัดน์ (2554)

3. บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด เป็นส่วนหนึ่งในกลุ่มโรงงานกระดาษ SCG จังหวัดราชบุรี ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กลุ่มโรงงาน ได้แก่ Thai Paper (TPC), Siam Kraft Industry (SKIC) และ SCG Paper ซึ่งมีอัตราการผลิตน้ำเสียต่อวันเท่ากับ 18,590.0, 9,282.0, และ 7,234.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ และมีความสกปรกในรูป (BOD) เท่ากับ 522.0, 2,256 และ 395.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยน้ำเสียจะถูกรวบรวมมายังถังปรับเสถียร (Equalization Tank; EQ) เพื่อปรับความเป็นกรดด่างให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย จากนั้นน้ำเสียจะถูกสูบไปยังระบบบำบัดน้ำเสียแบบ Activated Sludge (AS) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดบีโอดีให้ลดลง

เหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วจึงปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ผลิตภัณฑ์ ของบริษัท สยามคราฟท์ อุตสาหกรรม จำกัด คือ Packaging Paper (บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด, 2556)

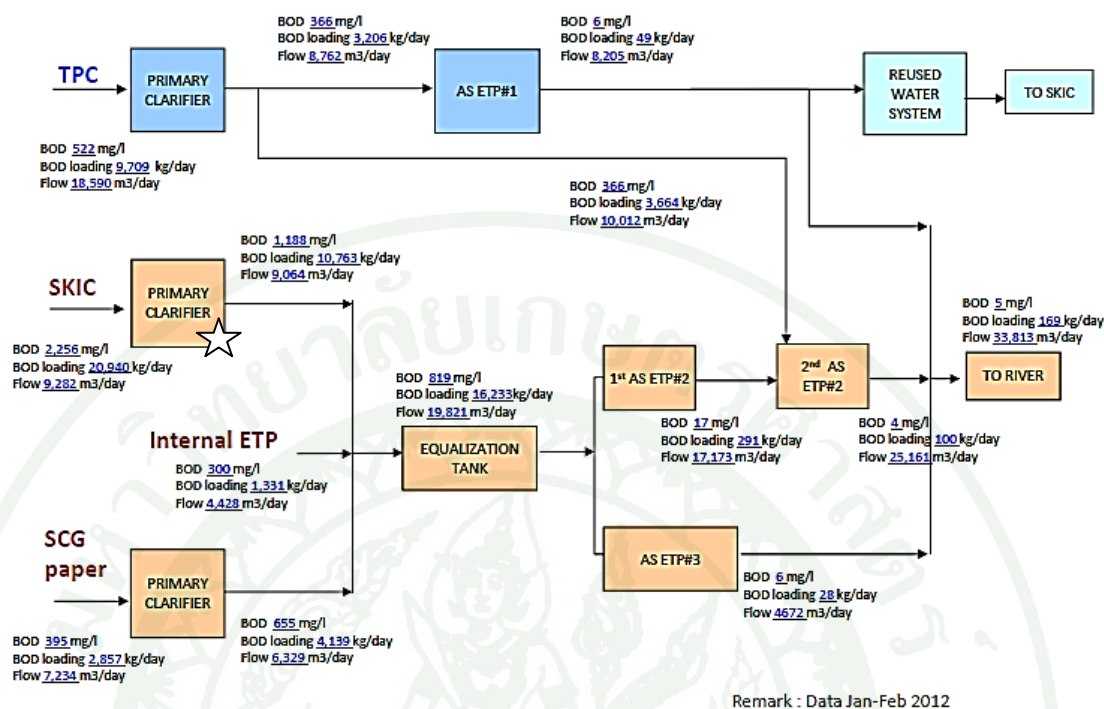


ภาพที่ 6 บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

ที่มา: บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556)

3.1 น้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด”

ทางบริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด มีหลักการและแนวทางในการปฏิบัติเกี่ยวกับ การจัดการสิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากกิจกรรมต่างๆ ของบริษัท เช่น ผลกระทบด้านน้ำ ผลกระทบด้านอากาศ ผลกระทบทางด้านเสียง และผลกระทบจากกากของเสีย อันเนื่องมาจากระบวนการผลิต สินค้าและบริการ ตลอดจนการดำเนินงานด้านอื่นๆ อาทิ พื้นที่จัดเก็บถ่านหินลิกไนต์ เป็นต้น



ภาพที่ 7 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

หมายเหตุ: ☆ คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัด

ที่มา: บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด (2556) (บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด, 2556)

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

3.1.2 มุ่งมั่นในการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า กากของเสียต่างๆ และน้ำเสียที่ต้องบำบัดหรือทิ้งนั้น ให้พยายามหาวิธีหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด หรือส่งให้กับอุตสาหกรรมอื่นนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมถึงการใช้พลังงานควรที่จะคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมี

ประสิทธิภาพสูงสุด และเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ทั้งนี้ตั้งแต่การเลือกใช้วัตถุดิบ กระบวนการออกแบบ กระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์ ตามหลักเทคโนโลยีสะอาด รวมถึง การฟื้นฟูและปรับปรุงทรัพยากรธรรมชาติ เพื่อให้มีระบบนิเวศที่ดี

4. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับหรือติดบนผิว ซึ่งปรากฏการณ์ เคลื่อนย้ายของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาดและความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการแยกออกมา โดยให้ตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับเอาไว้ ออก โดยการที่เปลี่ยน สภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิว ของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับ โดยที่ตัวดูดซับจะไปเกาะที่ ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิว ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้ สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินใน ทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการ ดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้าน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับ โลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทหน้าที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และเปลี่ยนแปลงรูปของสารเคมีใน สิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่

ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสงหรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

4.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวที่ห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

4.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

4.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ

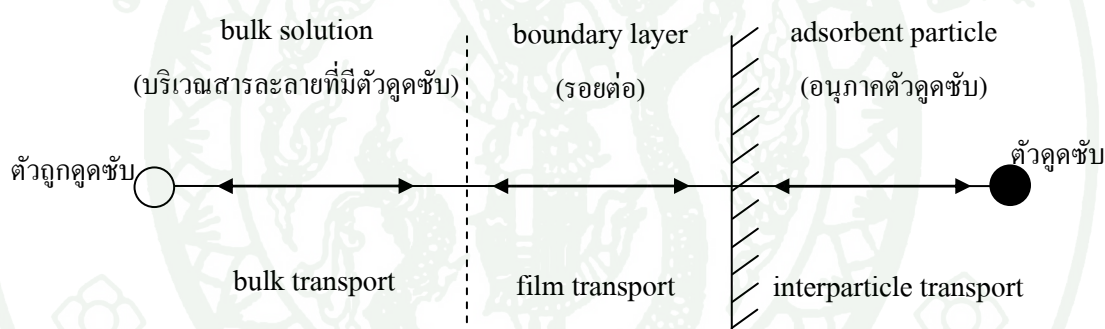
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

4.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

4.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม(film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้น

การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport)เป็นการเผยแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 8 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

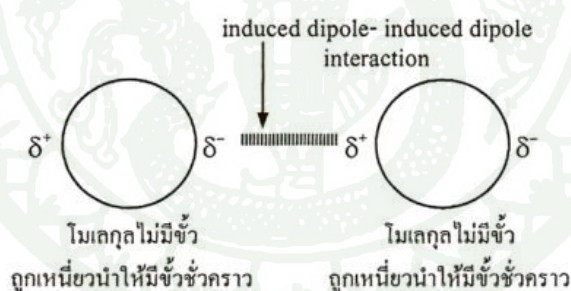
4.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

4.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) คือ แรงยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดย

โมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภทดังนี้

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induce dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกันโดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole – induced dipole attraction)



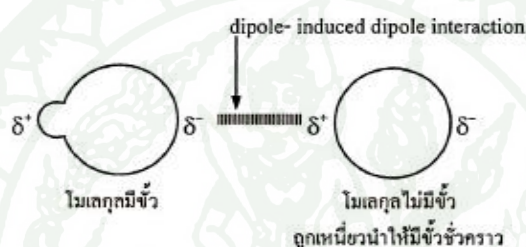
ภาพที่ 9 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อยเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง จะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้ว รูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่ง

ได้ง่าย การเหนี่ยวนำทำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

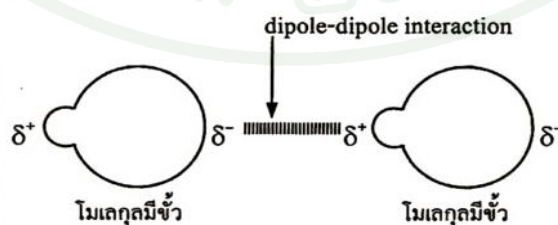
ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)



ภาพที่ 10 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ค. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดูดกันเรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole attraction)



ภาพที่ 11 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องการใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์จะมีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือคายสารออก (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

4.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตรอน) และแรงผลักกัน (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และ โปรตรอนกับโปรตรอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

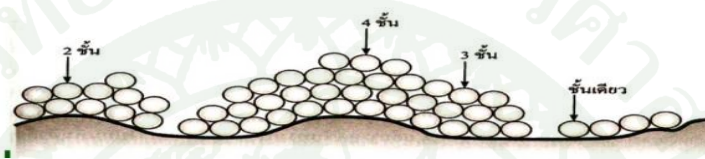
4.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

4.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waal adsorption)

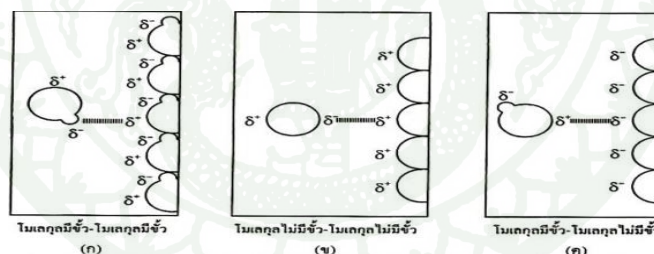
เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

โดยที่โมเลกุลของตัวดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านั้นและจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ภาพที่ 13 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

4.4.2 การดูดซับทางเคมี

จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือจะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผ่นกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียวและเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงแต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.5.1 ความดันป่วนและอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ในขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมสารดูดซับ จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับในทางตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาสารดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ซึ่งการแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

4.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่พื้นผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC) Chanuwat *et al.*, 2002 รายงานว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็น

การเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับในขณะที่ปริมาตรของสารละลายคงที่ จะเพิ่มร้อยละของการกำจัด สีข้อมuddy

4.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอร์ (พอร์เข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจจะกล่าวได้ว่า ความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง Mehmet *et al.*, 2009 รายงานว่าจากการทดลองการที่มีการใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เท่ากัน แต่มีขนาดต่างกันจะพบว่า ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถดูดซับปริมาณสีข้อมuddyได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กนั้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวกับสารละลายมาก ดังนั้นการดูดซับจึงเกิดได้ดีกว่า

4.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ เป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นั่นคือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือ สารที่ละลายน้ำได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

4.5.5 พีเอช การดูดซับขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออนบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดขึ้นได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีพีเอชเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ OH⁻ บนพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่สารละลายมีพีเอชสูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

4.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

4.5.7 เวลาสัมผัส เป็นอิทธิพลที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

4.6 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ

4.6.1 ประเภทสารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และ แอคติเวเตดซีลิกา (Zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลหรือคลอลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอินทรีย์ที่มีขีดจำกัดมาก

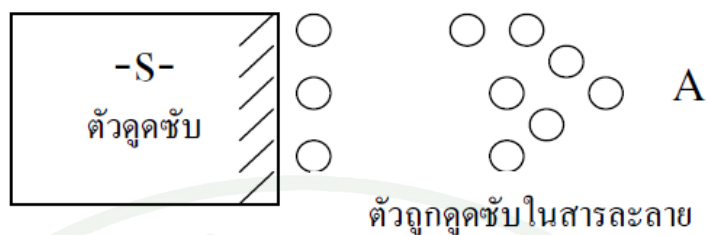
4.6.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,000 ตารางเมตรต่อกรัม

4.6.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม

4.6.4 วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี้เลื่อย ใคโตซาน กาแฟที่เหลือใช้ ชา ฟางข้าว เปลือกไม้ หรือเถาเถาวัลย์ เป็นต้น

4.7 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวดูดซับเข้มข้นในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลจะถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ณ สถานะการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมาจะมีปริมาณคงที่



ภาพที่ 14 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

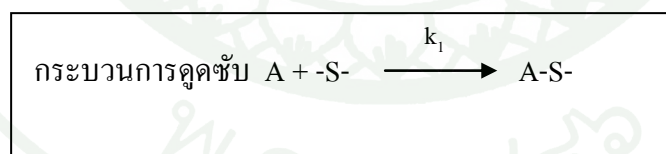
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

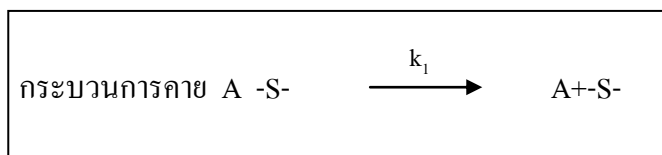
(1-q) เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคายซับ ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย 1

$$r_2 = k_2(q)$$

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

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับมีหน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

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

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³) หรือ (l)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

q อาจเรียกว่า ความจุของตัวดูดซับ (Adsorption Capacity)

ณ สภาวะสมดุลของตัวดูดซับ จะได้ว่า

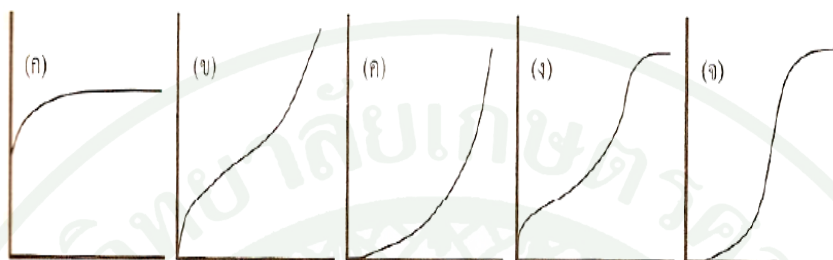
ปริมาณตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

4.8 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นสมการแสดงอิทธิพลปริมาณตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากภาพ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียวส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นสมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.8.1 สมการการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Freundlich (1880-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมุติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous Adsorption Surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการดังนี้

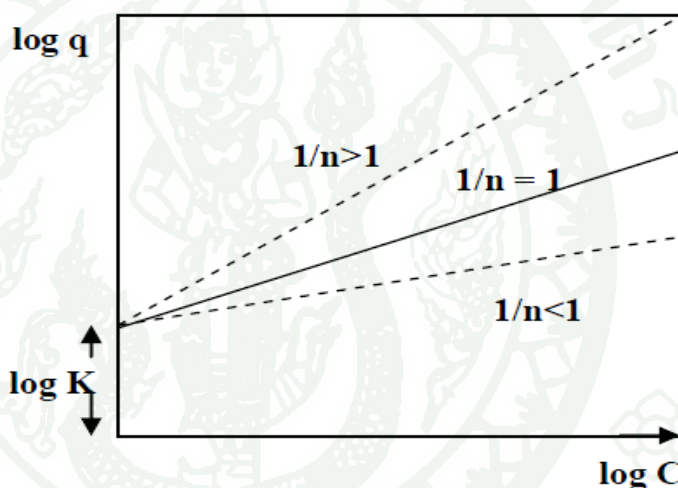
$$q = KC^{1/n} \quad (4)$$

สมการที่ (4) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

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



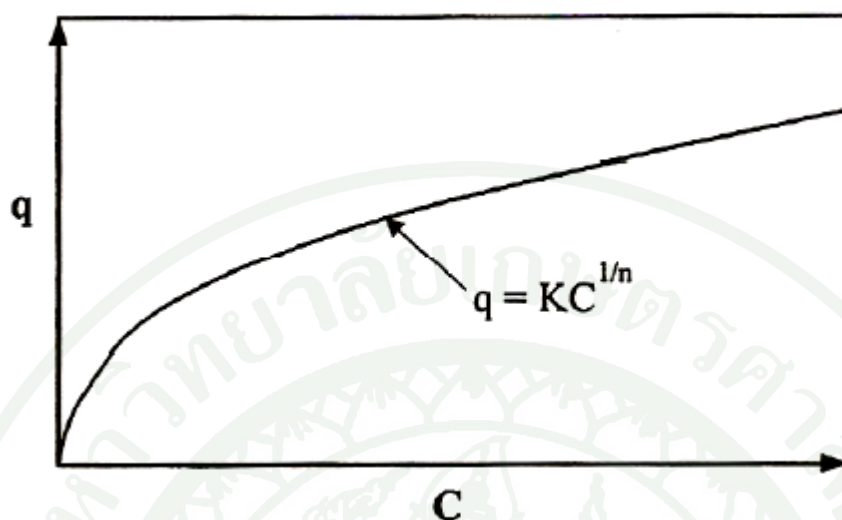
ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรุนดลิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

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

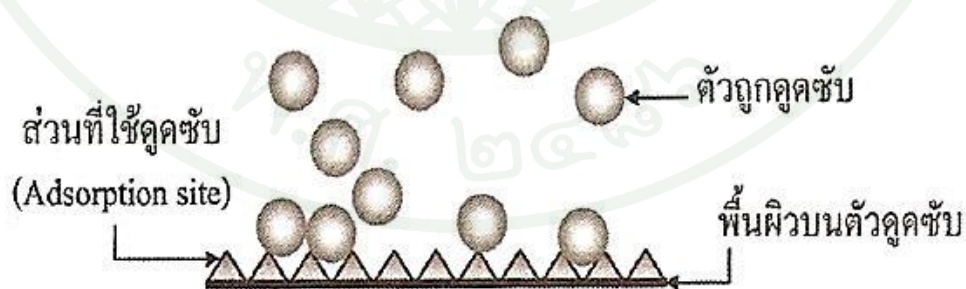
ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับได้มากหรือกล่าวว่าการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

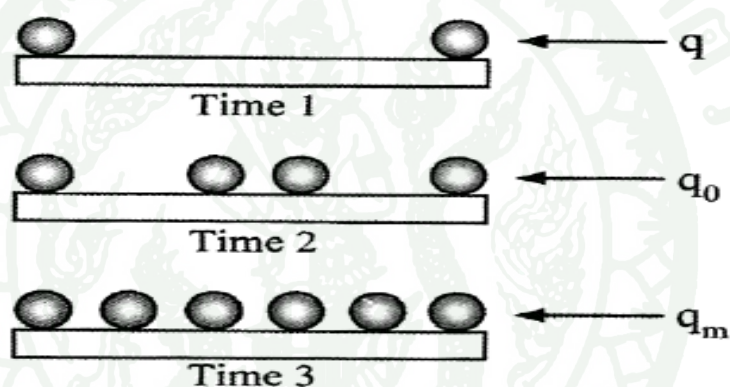
4.8.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวอเมริกัน Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



ภาพที่ 18 กลไกการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะปกคลุมไปด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นที่ผิวเท่ากับ q_m

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

สมการการดูดซับ และจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากเท่ากับหนึ่ง รูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ดังนั้นสมการที่ (1) จึงมีรูปแบบดังนี้

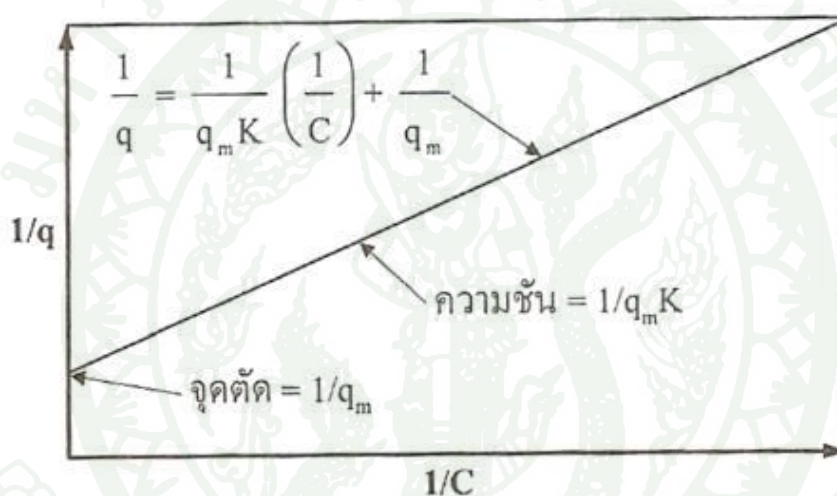
$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad (6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) .ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

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

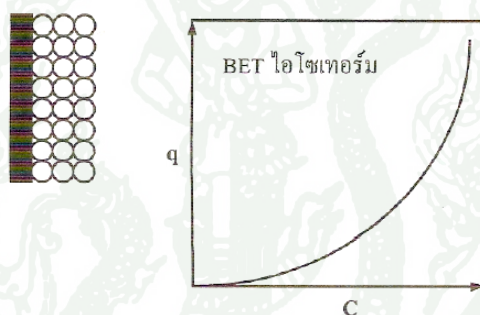
- ก. การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- ข. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- ค. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

ง. แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตส์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{(C_0 - C) [1 + (K-1)C/C_0]} \quad (13)$$

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



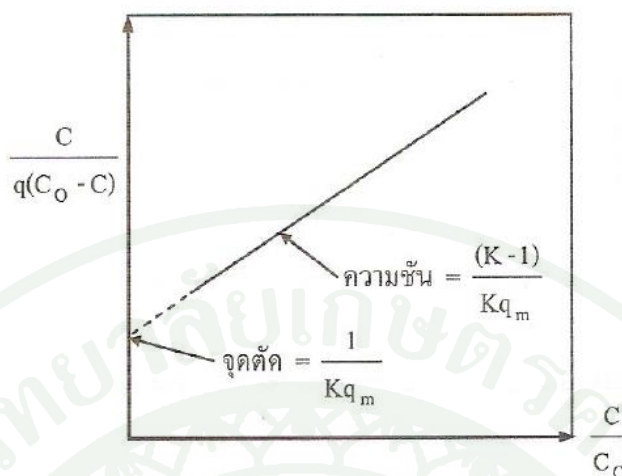
ภาพที่ 21 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบต

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (13) ใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{K-1}{q_m K} \left[\frac{C}{C_0} \right] \quad (14)$$

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



ภาพที่ 22 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

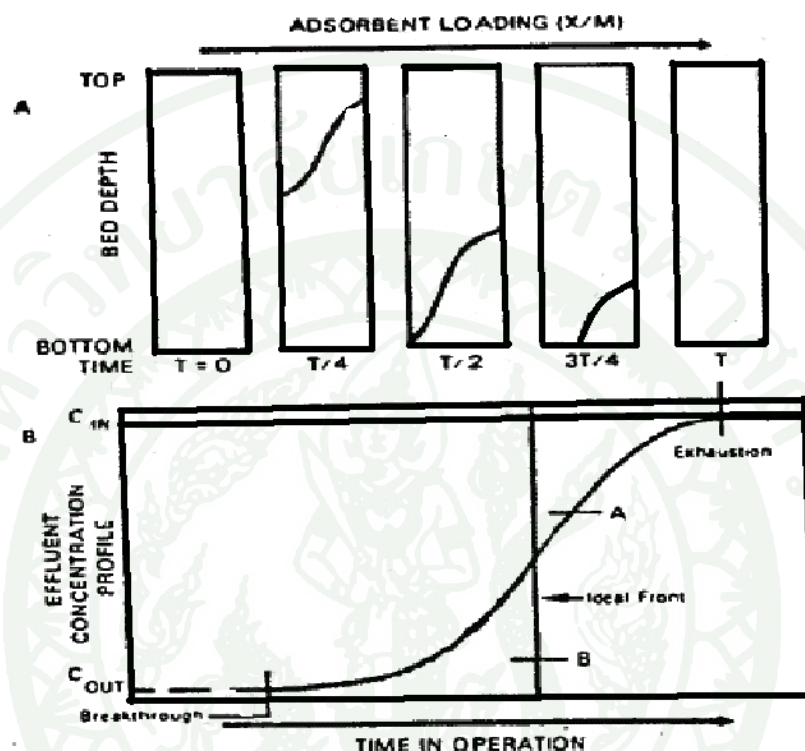
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

4.9 ลักษณะของกราฟเบรคทรูจ (Breakthrough Curve) และการเคลื่อนย้ายมวลสารสำหรับ Fixed-bed adsorption column

Fixed-bed adsorption column เป็นระบบการดูดซับที่ให้น้ำไหลผ่านชั้นดูดซับที่อยู่กับที่ ไม่มีการขึ้นลงในลักษณะเดียวกับการกรอง ลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับจะเริ่มเคลื่อนที่ลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นสารดูดซับ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนของชั้นสารดูดซับ ดังแสดงในภาพที่ 23 ณ จุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakthrough) หรือจุด C_B และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้น คือ การดูดซับค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำได้อีก ซึ่งนิยมเรียกโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve จนถึงจุด C_E ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) นิยมใช้กันที่ 95% ของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบ

กราฟเบรคทรูจโดยทั่วไปจะมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) กรณีที่เส้นกราฟมีความลาดชันมากๆ แสดงว่า ในการดูดซับจะมี Film Transfer Coefficient และ Internal Diffusion Coefficient สูง หรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะลาดชันต่ำ ($1/n$ มีค่าน้อย) เมื่อกรองน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (ปริมาตรต่างๆ) คือ

C_e ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่สนใจคือ เบรคทรูจ และ จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ $0.95C_e$ หรือจุด C_E ซึ่งปริมาณที่สารดูดติดผิวหมดสภาพ



ภาพที่ 23 Breakthrough Curve ของ Fixed-bed adsorption column

ที่มา: Faust and Aly, 1987

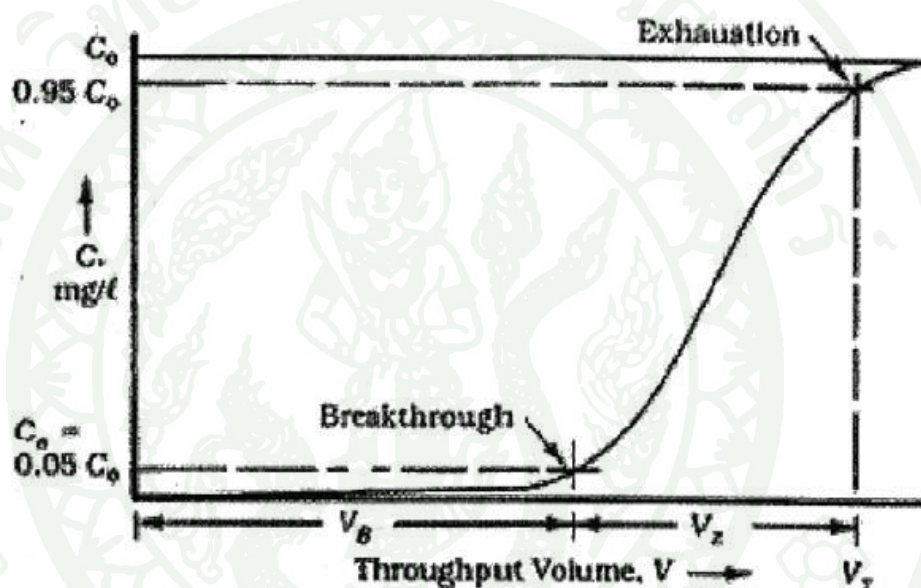
ภาพที่ 24 ถ้าคำนวณพื้นที่ภายใต้เส้น $0.95C_e$ จนมาถึงเส้น C_e จะได้ปริมาณสารในของเหลวทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์ และถ้านำสารปริมาณสารดูดติดผิวที่บรรจุในคอลัมน์มาหารจะได้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของวัสดุดูดติดที่สามารถดูดติดสารที่อยู่ในของเหลวนั้นๆ ความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็กๆ หารด้วยวัสดุดูดติดที่นำมาใช้เป็นสารดูดติดผิวในคอลัมน์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนสมการที่ได้นั้นคือ

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

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่จุดสมดุล (95% ของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่เข้าระบบ)

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

V_i = ปริมาตร ณ เวลา i



ภาพที่ 24 รูปของกราฟเบรคทรูจในกระบวนการดูดติดผิว

ที่มา: Faust and Aly, 1987

5 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติ

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึงการดำเนินการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสีย ให้อยู่ในสภาพที่มีความเหมาะสมพอที่จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อแหล่งรองรับน้ำเสียนั้นๆ ซึ่งโดยปกติแล้วในธรรมชาติจะสามารถปรับสภาพน้ำเสียได้เอง ถ้าปริมาณความสกปรกของน้ำเสียไม่มากจนเกินไป แต่ในกรณีของน้ำเสียที่ออกจากกิจกรรมของอุตสาหกรรมที่มากยิ่งขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มทั้งปริมาณและความสกปรกของน้ำ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยกระบวนการต่างๆ หรือเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามามีส่วนร่วมในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ดียิ่งขึ้น

การแก้ไขปัญหาน้ำเสียโดยใช้เทคโนโลยีพืชบำบัด (Phytoremediation) เป็นการใช้ความสามารถในการดูดซับและการสังเคราะห์แสงของพืชร่วมกับจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมอื่นๆ เพื่อบำบัดสารมลพิษทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ตะกอนดิน อากาศหรือในสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็น การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพพึ่งพาสิ่งที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติจึงเป็นการบำบัดที่มีค่า ค่าเนิการบำรุงรักษาต่ำ สามารถบำบัดได้ในพื้นที่ปนเปื้อน และเป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมีที่มีการลงทุนก่อสร้างหรือมีค่า บำรุงรักษาระบบสูง ใช้สารเคมีราคาแพง เป็นต้น

5.1 กลไกการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบดินขังน้ำสลับแห้งร่วมกับพืช

หลักการการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ซึ่งเป็นลักษณะของกลไก การบำบัดน้ำเสียด้วยดินน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช หลักการบำบัดน้ำเสียโดยระบบขังสลับแห้งจะมี ความสัมพันธ์ระหว่างดิน น้ำ และพืช โดยการปล่อยในน้ำขังดินอยู่ระยะเวลาหนึ่งแล้วระบายออก ให้แห้ง (Flooding and drying) เป็นรอบๆ ไป การบำบัดน้ำเสียระบบนี้เป็นการนำหลักของระบบ นิเวศดินมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีววิทยาที่ เกิดขึ้นสองแบบในแต่ละรอบของการทดลองบำบัดน้ำเสีย กล่าวคือ สภาพที่มี O_2 (aerobic หรือ oxidative) เมื่อก่อนมีการขังน้ำครั้งแรก และเมื่อมีการระบายน้ำออกแล้วปล่อยดินแห้ง และสภาพไร้ออกซิเจน O_2 (anaerobic หรือ reductive) เมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าแปลงแล้วขังน้ำไว้ก็จะเกิดสภาพไร้ออกซิเจน ทำให้เกิดการสะสมธาตุอาหารของพืชในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ และถ้าหากปล่อยให้ อยู่ในสภาพที่ดึกขังที่นานขึ้น ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจุลชีววิทยาเป็น obligated anaerobes ดังเช่นการศึกษาการทำนาซึ่งจะมีการขังน้ำต่อเนื่องกันไม่น้อยกว่า 60 วัน (ไพบุลย์, 2528) ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ obligated anaerobes นั้นต่ำกว่าของ facultative anaerobes (อรทัย, 2550) การขังน้ำทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจน เพราะทันทีที่ดินมีน้ำขังจะเกิด การลดน้อยลงของก๊าซออกซิเจนในดินจนปราศจากออกซิเจนในที่สุด เพราะน้ำที่ขังอยู่บริเวณ หน้าดินจะทำหน้าที่ป้องกัน ออกซิเจนจากบรรยากาศไม่ให้ซึมผ่านลงไปดินได้ ทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลของออกซิเจน ผ่านน้ำนิ่งนั้นจะช้ากว่าในอากาศมากกว่า 10,000 เท่า จากนั้นออกซิเจนที่ถูกกักเก็บไว้อยู่ตามช่องว่างดินที่ถูกน้ำท่วมขังจะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการ ใช้ออกซิเจน (aerobic microorganism หรือ aerobes) และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ได้ทั้งในสภาวะ ที่มีออกซิเจนและสภาวะที่ไร้ออกซิเจน (facultative microorganism หรือ facultative anaerobes)

นำมาใช้เพื่อการหายใจหมดไปอย่างรวดเร็วและยังคงมีกิจกรรมต่อไป (Ponnamperuma, 1972; ไพบูลย์, 2528 และทัศนีย์, 2543) โดยใช้สารประกอบต่างๆในดินซึ่งมีระดับออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุในดินรวมทั้งเศษพืชในดินเป็นตัวรับอิเล็กตรอนก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ (Ponnamperuma, 1976) สารประกอบที่มีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินได้แก่ ไนเตรท (NO_3^-), แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2), เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และกรดไพรูวิก (pyruvic acid) ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆตามลำดับทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยเคมีของพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชันและชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันขึ้นอยู่กับ ปัจจัย 5 ประการคือ (1) ธรรมชาติและปริมาณของอินทรีย์วัตถุหรือตัวให้อิเล็กตรอน (2) อุณหภูมิ (3) ความเป็นกรด-ด่าง (4) ปริมาณและตัวรับอิเล็กตรอน และ (5) ช่วงเวลาที่น้ำขัง

การเกิดสภาพที่ไม่มีออกซิเจน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน วิศิษฐ์ และคณะ (2524) ได้รวบรวมถึงผลของการขังน้ำที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินนา และได้รายงานไว้ว่า เมื่อดินนา ถูกน้ำขัง ก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่เหลือติดค้างในดินจะถูกจุลินทรีย์พวก Aerobes เอาไปใช้หายใจ จนหมดอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจุลินทรีย์พวก Obligate aerobes จะหยุดกิจกรรม (Activity) และชะงักการเติบโต หรือตายไป ในระยะนี้จุลินทรีย์พวก (Facultative Anaerobes) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียจะเจริญเติบโตและมีกิจกรรมมากขึ้น ขณะที่ยังมีก๊าซออกซิเจนอยู่ในดิน จุลินทรีย์พวกนี้จะดำเนินการหายใจแบบใช้ออกซิเจน โดยใช้โมเลกุลออกซิเจนอิสระเป็นตัวรับอิเล็กตรอนกับไฮโดรเจน แต่เมื่อดินขาดก๊าซออกซิเจน จุลินทรีย์พวกนี้จะดำเนินการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือใช้สารประกอบออกไซด์ ชนิดที่มีออกซิเดชันสเตต (Oxidation State) สูงๆ เช่น ไนเตรท (NO_3^-) แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ในขณะเดียวกันสารประกอบเหล่านี้จะถูกรีดิวซ์ และอยู่ในรูปรีดิวซ์ (Reduced Form) คือ มีออกซิเดชันสเตตต่ำลงในการหายใจจุลินทรีย์พวกนี้ใช้อินทรีย์วัตถุในดินเป็น วัชสเตต คือ เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและไฮโดรเจน เมื่อสารประกอบที่มีออกซิเดชันสูง เช่น NO_3^- และ MnO_2 หมดไป ดินนา ก็จะเหลือแต่สารประกอบที่ถูกรีดิวซ์แล้วตกค้างอยู่ในดิน กับสารประกอบที่ถูกรีดิวซ์ได้ชนิดที่มีออกซิเดชันสเตตต่ำๆ เท่านั้น การเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์พวก Facultative Anaerobes ก็จะหยุดชะงักได้

ตอนนี้จุลินทรีย์พวก Obligate Anaerobes หรือ True Anaerobic Bacteria จะมีกิจกรรมมากขึ้น จุลินทรีย์พวกนี้ใช้สารประกอบอินทรีย์ที่ตกค้างจากกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้

ออกซิเจนของ facultative Anaerobes เป็นข้อได้เปรียบ และสามารถใช้ออกซิไดส์ชนิดที่มีออกซิเดชันสเตรทต่างๆ เช่น Fe^{3+} , SO_4^{2-} , CO_2 เป็นตัวรับอิเล็กตรอนสำหรับการหายใจของตนเอง กิจกรรมของจุลินทรีย์พวกนี้จะหยุดชะงักเมื่อข้อได้เปรียบ และ/หรือ ตัวรับอิเล็กตรอนในดินลดลงมากหรือหมดไป

การประยุกต์การเปลี่ยนแปลงดินที่มีน้ำขังเพื่อใช้ในการบำบัด จากผลของการขังน้ำที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีของดินตามที่กล่าวข้างต้นแล้ว ทำให้คาดการณ์ว่าการนำเอาระบบของการขังน้ำและการระบายออกให้ดินแห้งให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจนและออกซิเดชันสลับกัน จะสามารถนำมาบำบัดน้ำเสียได้โดยลดปริมาณ BOD, COD และเป็นที่ดูดซับโลหะหนักต่างๆ จากน้ำเสีย โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับพืชบางชนิดเพื่อกำจัดสารอาหาร (Nutrient) ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็นต้น และสารโลหะหนักหรือสารอื่นๆ น้ำ โดยอาศัยหลักการดูดซึมอาหารและน้ำของพืช

5.2 การนำเอาพืชมาใช้ในการกำจัดสารพิษในน้ำ

การนำเอาพืชมากำจัดสารต่างๆ ในน้ำ เริ่มจากการนำเอาพืชน้ำโดยเฉพาะพวกพืชน้ำที่มีระบบท่อลำเลียง (Vascular Aquatic Plant) มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำในการกำจัดน้ำเสียโดย Suttipong (1980) ได้อ้างถึงการศึกษาของ National Space technology Laboratories of National Space Administration ในสหรัฐอเมริกาที่ได้นำผักตบชวามาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยนำผักตบชวามาสัมผัสต่อสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 1-2 พีพีเอ็ม ซึ่งบรรจุในบีกเกอร์นาน 24 ชั่วโมง พบว่ามันสามารถดูดซับโลหะหนักได้ แต่เนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้นจึงไม่สามารถตรวจสอบหรือพิสูจน์ได้ว่า มันจะสามารถปลูกในน้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่านี้ได้หรือไม่ ดังนั้น Suttipong (1980) จึงได้ทำการทดลอง ปลูกผักตบชวาในสารละลายของโครเมียม ทองแดง และนิเกิล ทั้งแบบสารละลายเดี่ยวและสารละลายผสม โดยใช้ระยะเวลาปลูก 3 สัปดาห์ พบว่าผักตบชวาสามารถเจริญได้ในสารละลายเดี่ยว ที่มีความเข้มข้นสูงสุดของโครเมียม ทองแดงและนิเกิล เท่ากับ 40.3 และ 3 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และยังพบว่าพืชมีขนาดใหญ่สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าพืชขนาดเล็กในช่วงเวลาเท่ากัน แต่พืชขนาดเล็กจะมีความสามารถในการดูดซึมมากกว่า และความสามารถในการดูดซึมของผักตบชวาจะลดลงตามระยะเวลา จากการผสมของสารละลายโลหะมากกว่าหนึ่งชนิดเข้าด้วยกัน จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด และความสามารถในการดูดซึมลดลง และจากการศึกษาของ Tridech และคณะ (1981) ช่วยสนับสนุน

แนวคิดในการนำเอาพืชน้ำ ระบบท่อลำเลียง มาลดปริมาณสารอินทรีย์ ในโตรเจน Traec ong. และ สารโลหะหนัก โดยศึกษาในพืชน้ำหลายชนิด เช่น ผักตบชวา แหน ผักเป็ดน้ำ สาหร่ายหางม้าและ พืชประเภทกก พบว่ามันสามารถกำจัด Trace org. และโลหะหนักได้ 80-90 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณสารอินทรีย์ในโตรเจนและของแข็งในน้ำได้อีกด้วย

นอกจากพืชน้ำดังกล่าวต้น อ้อไฟ (2513) กล่าวว่า ต้นธูปฤาษี (*Typha* spp.) เป็นพืช ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจโดยเป็นวัชพืชน้ำชนิดหนึ่งในไทย ที่สามารถกำจัดในโตรเจนและฟอสฟอรัส จาก น้ำเสียได้ถึง 2,600 และ 4,500 กิโลกรัม/เฮกเตอร์/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาซึ่งสามารถ กำจัดในโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ 2,200 และ 3,200 กิโลกรัม/เฮกเตอร์/ปี ตามลำดับ จะเห็นว่าต้น ธูปฤาษีมีประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า เหมาะที่จะนำมาใช้กำจัดมลพิษในน้ำ และยังกล่าวอีกว่า ต้น ธูปฤาษีสามารถนำไปใช้ผลิตแก๊สมีเทนและดูดซึมโลหะหนักได้อีกด้วย

Kaigate (1981) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ทองแดง นิเกิล และตะกั่วจาก Secondary Domestic Effluent ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ ต้นกก พบว่าต้นกก จะช่วยกำจัดโลหะหนักได้ถึง 80-90เปอร์เซ็นต์ จากความเข้มข้นของสารละลาย ที่เริ่มต้น ซึ่งมีค่า 5 มก./ล. แต่ที่ความเข้มข้น 20 มก./ล. จะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตหรือมีผลต่อต้าน กกอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับพืชนั้นจะทำหน้าที่ขนย้ายสารอินทรีย์ในโตรเจนและและฟอสฟอรัสที่ผ่าน การบำบัดการเป็นอนินทรีย์ในโตรเจนและฟอสฟอรัสแล้ว ตลอดจนโลหะหนักในน้ำเสียออกไป จากน้ำ โดยเข้าไปอยู่ในต้นพืช เมื่อตัดพืชเอาไปใช้ประโยชน์ก็เท่ากับภาระขนย้ายจากตะกอนไปทิ้ง หรือจัดการต่อไปของระบบบำบัดแบบอื่น ซึ่งจำเป็นต้องใช้ผู้ย่อยสลายที่ต้องการออกซิเจนเพื่อ การหายใจ แต่ พรพิมล (2542) เสนอว่าพืชที่นำมาปลูกในสภาพน้ำขังได้นานนั้นมีระบบรากพืชที่ ส่งเสริมในการบำบัดน้ำเสีย คือ ทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์บางชนิดที่อยู่ในดิน ซึ่งทำ หน้าที่ย่อยสลายสารต่างๆในดิน เพิ่มเติมจากการบำบัดน้ำเสียชุมชนในแนวคิ่งของดินน้ำขังสลับ แห้ง ซึ่งสามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้เมื่อแม้ไม่มีพืช และขอเสนอว่าการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชนั้น เป็นกลไกในแนวนอน กล่าวคือ รากพืชที่ทนน้ำท่วมได้จะต้องมีกลไกที่พา O_2 จากส่วนเหนือดิน ลงมาเลี้ยงรากได้ แล้วปลดปล่อย O_2 บางส่วนออกมาที่ผิวรากโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณรากฝอย ทำให้ผู้ย่อยสลายที่ต้องใช้ O_2 เพื่อการหายใจมาเกาะอยู่ที่รากดังกล่าวเพื่อใช้ O_2 ที่ถูกปลดปล่อย ออกมาในกระบวนการหายใจแล้วใช้สารอินทรีย์จากคาร์โบไฮเดรตน้ำเสียเป็นตัวทำให้อิเล็กตรอน

ได้พลังงานและปลดปล่อย CO₂ ออกมา และใช้สารอินทรีย์ประเภทโปรตีนเป็นองค์ประกอบของเซลล์เพื่อการแบ่งเซลล์และการเพิ่มประชากรอย่างรวดเร็วต่อไป

5.2.1 ข้อสังเกตในการเลือกใช้พันธุ์พืชปรับปรุงคุณภาพน้ำ

เนื่องจากพืชมีบทบาทในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้ ดังนั้นการเลือกพืชที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น (พัฒน์, 2536)

โดยสรุปคุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ ดังนี้

- ก. สามารถปรับตัวและเจริญได้ในท้องถิ่นนั้นๆ นอกจากนี้ยังต้องสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป
- ข. มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงและเจริญเติบโตดี
- ค. มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูงพืชน้ำจะมีคุณสมบัติในการนำออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านลงมาตามใบ ลำต้น และราก (ดังภาพ)

5.2.2 พืชที่ใช้ในการทดลอง

ก. หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (*Vetiveria sp.*) เป็นพืชในวงศ์หญ้า (Family Gramineae) กระจายพันธุ์อยู่ในทุกภูมิภาคของโลก สันนิษฐานว่าหญ้าแฝกมีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศอินเดีย และกระจายพันธุ์ไปสู่ภูมิภาคเอเชียใต้ เจริญได้ในทุกสภาพแวดล้อม ได้แก่ สภาพภูมิประเทศที่ราบ ใกล้เคียงระดับน้ำทะเลถึงพื้นที่บนภูเขาสูงจากระดับน้ำทะเล 2,600 เมตร ภูมิอากาศตั้งแต่ฝนตกชุกเกือบตลอดปี เช่น ในประเทศมาเลเซีย จนถึงเขตแห้งแล้งในประเทศอินเดีย เติบโตได้ในดินเกือบทุกประเภท ทั้งดินร่วน ดินทราย ดินตะกอนจนถึงดินดาน ระดับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตั้งแต่ดินเปรี้ยว (pH 4.5) ดินเค็ม (EC 20 มิลลิโมห์) ไปจนถึงดินด่าง (pH 10.5) และเจริญในสภาพอากาศหนาวเย็นต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิร้อนจัดที่ 45 องศาเซลเซียส (กรมพัฒนาที่ดิน, 2541)

ในประเทศไทย ได้มีการบันทึกการใช้หญ้าแฝกมาแต่โบราณ โดยเฉพาะประโยชน์ที่เกี่ยวกับการนำไปใช้ในพิธีกรรมต่างๆ และการนำรากไปใช้เป็นเครื่องหอม หญ้าแฝกแต่เดิมแล้วได้มีการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าที่ควร เพราะประโยชน์ด้านนี้เป็นไปอย่างช้าๆ (กลุ่มวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกในการจัดการดิน สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [ส.ว.จ.], 2546) สำหรับประเทศไทย คนไทยสมัยก่อนใช้หญ้าแฝกมุงหลังคา ทำยาไทย ปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากหญ้าแฝกมากขึ้นเช่น นำมาใช้ในงานศิลปหัตถกรรม ทำเครื่องจักรสาน วัสดุเพาะเห็ด และนำมาสกัดน้ำหอม วัตถุประสงค์หลักของการปลูกหญ้าแฝก คือ ใช้ในการอนุรักษ์ดินและน้ำ โดยเฉพาะในบริเวณที่ลาดชันตามแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว (เพชร, 2545)

จากการศึกษาหญ้าแฝกในสกุล *Vetiveria* ในระบบอนุกรมวิธาน พบว่าหญ้าแฝกมีอยู่ประมาณ 12 ชนิด โดยประเทศไทยพบหญ้าแฝกอยู่เพียง 2 ชนิดด้วยกันคือ หญ้าแฝกหอม (*vetiveria zizaniodes* Nash) และหญ้าแฝกตอน (*vetveria nemoralis* A Camus) ในธรรมชาติพบว่าหญ้าแฝกทั้งสองชนิดมีการกระจายทั่วไป และไม่พบการแพร่ระบาดเป็นวัชพืช ซึ่งต่างจากหญ้าคา (มนตรี และคณะ, 2549, ส.ว.จ., 2546)

หญ้าแฝกสามารถปลูกได้ในพื้นที่สูง ทั้งจากความสูงใกล้เคียงระดับน้ำทะเลจนถึงระดับประมาณ 800 เมตร (สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ [กปร.], 2549) เพชร (2545) รายงานว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในระดับความสูง 600-1,200 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ในประเทศไทยหญ้าแฝกก็ไม่พบในพื้นที่ที่ทำการเกษตรแต่จะพบในบริเวณพื้นที่ป่าธรรมชาติ โดยจะพบมากในพื้นที่กลางแจ้ง บริเวณใกล้แอ่งน้ำ หนองน้ำ และ แหล่งน้ำที่มีความชุ่มชื้นสูง รวมทั้งป่าเต็งรัง เช่น ที่ดินจังหวัดแม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ กำแพงเพชร นครสวรรค์ เลย ร้อยเอ็ดราชบุรี ประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี สงขลา เป็นต้น

1) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หญ้าแฝกมักเจริญอยู่ตามธรรมชาติ พบกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่เขตร้อน ในประเทศไทยสามารถพบหญ้าแฝกตั้งแต่บริเวณพื้นที่ลุ่มจนถึงที่ดอน โดยหญ้าแฝกสามารถขึ้นได้ดีในดินเกือบทุกชนิด (กปร., 2549) นอกจากนี้หญ้านี้ยังมีคุณสมบัติพิเศษคือ เป็นพืชทนแล้ง และเป็นพืชชอบน้ำ จึงสามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในสภาพที่แห้งแล้งจัดไปจนถึงบริเวณที่มีน้ำขัง เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยได้มีการทดลองปลูกหญ้าแฝกในดินชนิดต่างๆ เช่น ดินเค็ม ดินพรุ ดินทราย เพื่อทดสอบความทนต่อสภาพแวดล้อมของหญ้าแฝก (ตารางที่ 4) พบว่าหญ้าแฝกเป็นพืชที่ทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม และสามารถทนความเป็นพิษของโลหะหนักในดินได้

จากการศึกษาของ Dudai *et al.* (2006) ที่ได้ทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกในวัสดุปลูกชนิดต่างๆ เช่น ทราย ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว crushed limestone ดินร่วนปนทราย และ truff/peat mixture พบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในวัสดุทุกชนิด และการปลูกใน ดินเหนียวจะทำให้ความสูงและจำนวนหน่อมากกว่าการปลูกในวัสดุปลูกชนิดอื่นๆ และจากการศึกษาของสันติภาพ และคณะ (2542) พบว่าหญ้าแฝกสายพันธุ์ที่ทนต่อสภาพความเค็มได้สูงสุดคือ สายพันธุ์ประจวบฯ รองลงมาได้แก่สายพันธุ์ศรีลังกา และสายพันธุ์สงขลา 3 นอกจากนี้ยังได้มีการนำหญ้าแฝกไปทดลองปลูกในดินพรุ พบว่าหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้และมีการเจริญเติบโตได้ดีเมื่อใส่ปุ๋ยร่วมด้วย (ปัญญา และสมโสทธิ์, 2542)

ตารางที่ 4 ความสามารถของหญ้าแฝกที่ทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ

สภาพต่างๆ	ระดับที่แฝกเจริญได้	ระดับที่ถือว่าปนเปื้อนในดิน
pH ของดิน	3.3	-
อลูมิเนียม	68 (ที่ pH 3.8)	-
แมงกานีส (ppm)	578 (ที่ pH 9.5)	-
ปริมาณเกลือ (%)	3.3 (ที่ pH 9.5)	-
ความเค็ม (ds/m)	17.5	-
อาร์เซนิก (ppm)	100-250	50
แคดเมียม (ppm)	10-20	3
โครเมียม (ppm)	200-600	50
ทองแดง (ppm)	50-100	60
นิกเกิล (ppm)	50-100	60

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)



ภาพที่ 25 ลักษณะลำต้นของหญ้าแฝก

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)

2) ลำต้น

หญ้าแฝกเป็นหญ้าที่ขึ้นเป็นกอแน่น มีลักษณะเป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรง ขึ้นสูง มีความสูงประมาณ 100-150 เซนติเมตร กอแฝกมีขนาดค่อนข้างใหญ่ (วีระชัยและคณะ, 2536) โคนกอเบียดเสียดกันแน่น เป็นลักษณะเฉพาะที่ทำให้หญ้าแฝกแตกต่างจากหญ้าชนิดอื่นๆ อย่างชัดเจน ส่วนโคนของลำต้นมีลักษณะแบน ซึ่งเกิดจากการที่ส่วนของโคนใบที่เรียงทับซ้อนกัน ลำต้นแท้จะมีขนาดเล็กซ่อนอยู่ในกาบใบบริเวณโคนดิน การเจริญเติบโตและการแตกกอของหญ้าแฝก จะเป็นการแตกหน่อใหม่ทดแทนต้นเก่าเสมอ โดยจะแตกหน่อออกทางด้านข้างบริเวณรอบโคนดิน ทำให้กอมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ ส่วน ข้อ ปล้องนั้นจะเห็นไม่ชัดเจนเนื่องจากหญ้าแฝกมีลำต้นสั้น ดังภาพที่ 25

3) ใบ

ใบจะแตกออกจากโคนกอ มีลักษณะแคบยาว ขอบใบขนานปลายสอบแหลม แผ่นใบกร้านตาย โดยเฉพาะใบแก่ ขอบใบและเส้นกลางใบมีหนามละเอียด (spinulose) หนามบนใบที่ส่วนโคนและกลางใบจะมีน้อย แต่จะมีมากบริเวณปลายใบ กระจุกหรือเยื่อเกี่ยวพันที่โคนใบ (ligule) ลดรูปมีลักษณะเป็นเพียงขอบโค้งของขนสั้นละเอียด บางครั้งสังเกตได้ไม่ชัดเจน (กปร., 2549) เมื่อตัดแผ่นใบตามขวางและศึกษาคูภายใต้อกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของเนื้อเยื่อในใบเป็นลักษณะเฉพาะ ด้านหลังใบจะพบส่วนของท่อมน้ำและอาหาร (vascular bundle) เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบอยู่ใต้ผิวใบ (epidermis) ท่อมน้ำและอาหารนี้จะถูกห่อหุ้มด้วยกลุ่มเซลล์ผนังบาง (parenchyma sheath) ที่มีสารประกอบสีเขียว (chlorenchyma) และชนิดไม่มีสี (parenchyma) เซลล์เหล่านี้จะทำหน้าที่เก็บสะสมอาหารและเป็นแหล่งเก็บพลังงานที่พืชได้จากการสังเคราะห์แสง ตอนบนของท่อมน้ำและอาหารจะมีเซลล์ที่ผนังหนาตามมุม (sclerenchyma) เรียงตัวอยู่เป็นกลุ่ม ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง ส่วนด้านท้องใบ ผิวจะปกคลุมด้วยเซลล์ผนังบางชั้นเดียว ใต้ผิวใบลงไปจะประกอบด้วยเซลล์ผนังบางจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มในลักษณะสะพานเชื่อมระหว่างท่อมน้ำกับท่อลำเลียงกับผิวใบ บริเวณตอนกลางของแผ่นใบจะมีช่องว่างขนาดใหญ่ (intercellular space) ปรากฏชัดเจนอยู่ทั่วไป ทำหน้าที่เก็บออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง และการหายใจ บนด้านหลังใบจะมีเซลล์ปากใบ (guard cell) มากกว่าด้านท้องใบ ส่วนตรงกลางของท้องใบจะมีกลุ่มเซลล์ผนังบางขนาดใหญ่ เรียงตัวอยู่ที่บริเวณรอยพับของใบ (bulliform cells) มีหน้าที่ควบคุมการห่อตัวและการพับตัวของใบ

4) ราก

เป็นส่วนสำคัญและเป็นลักษณะพิเศษเฉพาะของหญ้าแฝกที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เป็นหลัก โดยปกติแล้วหญ้าส่วนใหญ่จะมีรากที่เป็นระบบรากฝอย (fibrous root) แตกจากส่วนลำต้นใต้ดิน แต่ระบบรากของหญ้าแฝกจะแตกต่างกันจากรากหญ้าส่วนใหญ่ คือ มีระบบรากที่เป็นรากฝอยจำนวนมาก ลักษณะสานกันแน่น เจริญหยั่งลึกลงดินในแนวดิ่ง และไม่แผ่ขนาน (มนตรี และคณะ, 2549) ดังภาพที่ 26 หญ้าแฝกมีอายุประมาณ 18 เดือน จะมีระบบรากเจริญเติบโตเต็มที่โดยรากแกนที่ส่วนโคนกอจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ผิวด้านนอกจะแข็งตัวมีลักษณะอวบคล้ายขม เมื่อรากแก่มากก็จะตายไปและถูกแทนที่ด้วยเซลล์ผิวที่อยู่ในชั้นถัดไป จากการศึกษาส่วนรากภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จะเห็นลักษณะการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ รากด้านนอกประกอบด้วยเซลล์ผิว (outer epidermis) ได้ชั้นผิวเป็นเซลล์ที่มีผนังหนาตามสะสมตามมุม (sclerenchyme) เรียงตัวอยู่เป็นหลายชั้น เซลล์ชั้นถัดไปประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ผนังบางที่เชื่อมต่อกันหลวมๆ เป็นสายคล้ายสะพาน ทำหน้าที่กักเก็บน้ำเมื่อมีความชื้นสูงและเก็บอากาศขึ้นเมื่อมีความแห้งแล้ง นอกจากนี้เนื้อเยื่อด้านในส่วนแกนกลางจะประกอบด้วยเซลล์ที่เรียงตัวอัดกันแน่น โดยเซลล์ชั้นนอกสุดจะมีผนังหนา (endodermis) ซึ่งรองรับด้วยเซลล์ที่มีผนังบางเรียงตัวอยู่ชั้นเดียว (pericycle) ถัดไปจะเป็นเซลล์ผนังหนา (sclerenchyma) ที่เรียงตัวกันหลายชั้น ซึ่งจะแทรกตัวอัดแน่นทำหน้าที่ช่วยในการลำเลียงน้ำของรากไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืช



ภาพที่ 26 ลักษณะรากของหญ้าแฝก

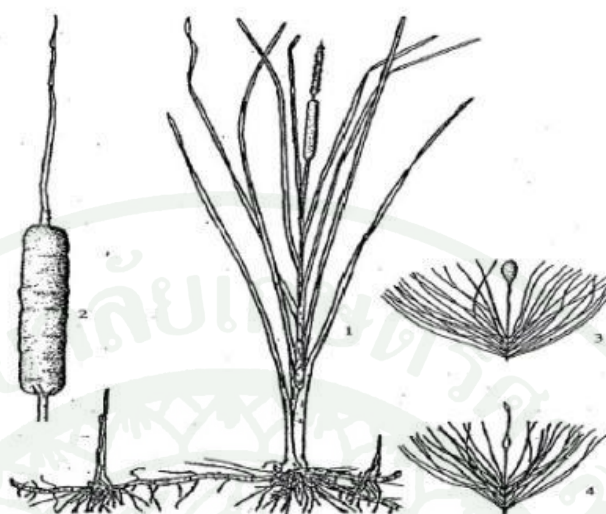
ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2547)

5) เมล็ดและต้นกล้า

เมล็ดมีสีน้ำตาลอ่อน เป็นรูปกระสวย ผิวเรียบ หัวท้ายมน มีความกว้าง 1-1.5 มิลลิเมตร มีเนื้อในลักษณะคล้ายแป้งเหนียว เมล็ดสูญเสียความงอได้ง่ายและมีความสามารถในการงอก (vitality) อยู่ในช่วงระยะเวลาจำกัดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ บางสายพันธุ์โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศจะไม่มีเมล็ด จึงทำให้หญ้าแฝกไม่สามารถจะแพร่กระจายเป็นวัชพืชร้ายแรงได้ (กปร., 2549)

ข. รูปถ่าย

รูปถ่ายเป็นพืชที่มีความสูง 1.50 เมตร ถึง 3.0 เมตร ใบเรียวยาวและยาว ส่วนโคนต้นจมน้ำขอบขึ้นในที่ชื้นแฉะและขยายพันธุ์ได้โดยใช้ส่วนของลำต้นใต้ดินและเมล็ดแพร่กระจายทั่วไปในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์และตามหมู่เกาะต่างๆ รูปถ่ายจัดเป็นวัชพืชชายตลิ่ง วัชพืชพวกนี้มีการเจริญเติบโตอยู่ตามชายน้ำและๆ มีน้ำขังเล็กน้อย ลักษณะโดยทั่วไปนั้นจะมีรากหรือทั้งรากและลำต้นอยู่ใต้พื้นดิน บางส่วนของลำต้นใบและดอกขึ้นมาเจริญเหนือน้ำ รูปถ่ายเป็นพืชที่มีทั้งโทษและประโยชน์ เป็นโทษต่อแหล่งกักเก็บน้ำชลประทานเพราะเป็นวัชพืช ส่วนประโยชน์ เช่น ส่วนของกาบใบอ่อนใช้ทำกระดาส ใบใช้มุงหลังคากระท่อมหรือเครื่องสานอย่างหยาบ ดอกตัวเมียเมื่อแก่ใช้ทำดอกไม้แห้งประดับ หรือยัดไส้หมอนได้ ช่อดอกของรูปถ่ายมีลักษณะคล้ายรูป ส่วนบนเป็นดอกตัวผู้ยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่างเป็นดอกตัวเมีย มี 1 ตอน ยาว 7-28 เซนติเมตร แต่อาจจะมี 2 ตอนได้ เมื่อเจริญเต็มที่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-2.5 เซนติเมตร ช่อดอกของรูปถ่ายมีรูปร่างที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นไม้ประดับ ต้องมีวิธีการเก็บรักษาเนื่องจากดอกย่อยที่มีจำนวนมากหลุดร่วงได้ง่ายมาก



ภาพที่ 27 รูปถ่าย *Typha angustifolia* Linn 1. ลักษณะต้น 2.ช่อดอก 3.ดอกตัวเมียที่เป็นหมัน 4. ดอกตัวเมียปกติ

ที่มา: สุชาดา (2542)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานกระดาษ

เด่นพงษ์ และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการลดสีน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านลอยโดยกระบวนการดูดซับได้ทำการวิเคราะห์หาค่าไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ freundlich Langmuir และ Linear จากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาณน้ำ 500 มิลลิลิตร ใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของน้ำ ร้อยละ 38.57 สามารถดูดซับสีของน้ำได้ 0.02 กรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 120 นาที มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Linear และถ่านลอยใช้ปริมาณถ่านที่ 1 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของน้ำ ร้อยละ 46.34 สามารถดูดซับสีของน้ำได้ 0.07 กรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 60 นาที มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ Langmuir

มงคล และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาการลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอ็คติเวตเตดคาร์บอน ซึ่งทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่

สำคัญของสารดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับของสารดูดซับเพื่อเลือกชนิดของสารดูดซับที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า แอ็คติวเตดคาร์บอนจากไม้ยางมีความสามารถในการดูดซับสี COD และ TOC จากน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษได้ดีกว่าแอ็คติวเตดคาร์บอนจากกะลามะพร้าวและถ่านล้อย จึงเลือกใช้ แอ็คติวเตดคาร์บอนจากไม้ยาง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและความพรุนสูงกว่าสารดูดซับอีก 2 ชนิด ส่วนถ่านล้อยนั้นมีความสามารถดูดซับได้บางส่วนแต่ไม่สามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานได้จริง

ต่อพงศ์ (2544) ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแอ็คติวเตดคาร์บอน 3 ชนิด คือ ไม้ยางพารา, กะลามะพร้าวจากบริษัทคาร์โบกาญจน์จำกัด และถ่านล้อย (Fly Ash) จากปล่องโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า อ.แม่เมะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้ง โดยร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 สารดูดซับทำการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสแล้วเก็บในโถดูดความชื้น (Desiccator) ก่อนนำไปใช้ในการบำบัดสี TOC (Total Organic Carbon) และ COD (Chemical Oxygen Demand) จากโรงงานเยื่อและกระดาษภายหลังการบำบัดน้ำเสียขั้นตอนที่สองด้วยระบบตะกอนเร่ง พบว่าแอ็คติวเตดคาร์บอนจากไม้ยางพาราและกะลามะพร้าวมีการดูดซับที่ดีกว่าถ่านล้อยเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความพรุนสูง

นนทพงษ์ (2548) ศึกษาถึงการบำบัดสีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการโอโซนเนชันโดยใช้น้ำเสียก่อนและหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียชนิดระบบตะกอนเร่ง พบว่า ที่อุณหภูมิห้องน้ำเสียภายหลังการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีความเหมาะสมในการบำบัดโดยกระบวนการโอโซนเนชันที่สภาวะเหมาะสม คือ pH เท่ากับ 7.5 ± 0.5 อัตราการผลิตโอโซนเท่ากับ 9.0 กรัมต่อชั่วโมง และระยะเวลาการสัมผัสโอโซน 30.0 นาที สามารถลดปริมาณสีในหน่วย Pt - Co และหน่วย ADMI ได้เท่ากับ 91.54 และ 95.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และลดปริมาณ COD, BOD และ TOC ได้เท่ากับ 62.00, 27.26 และ 37.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สามารถสลายโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลิกได้แต่ยังคงมีโมเลกุลของสารประกอบ ฟีนอลลิกตกค้างอยู่ภายหลังจากกระบวนการโอโซนเนชัน นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพอีกด้วย โดยที่ระยะเวลาสัมผัสโอโซน 30.0 นาที อัตราส่วนระหว่าง BOD : COD มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 0.16 ถึง 0.31 และค่า KT (Rate of biochemical oxidation) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.21 ถึง 0.35 ตามวิธีการของ Thomas slope method

สุชาดาและคณะ (2537) ได้ศึกษาการทดลองคัดเลือกพันธุ์พืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญ้ากรองน้ำเสีย พบว่า พืชจำพวกกกกลม กกสามเหลี่ยม หัวกระดานและรูปดาบ มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้เป็นพืชทดลองเพราะมีการเจริญเติบโตดีมาก และยังพบว่า หญ้าแฝกพันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา หญ้าโคสโครอส หญ้าคาร์ลา และหญ้าสมูท มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย

อนุสรณ์ (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเชื้อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับผิวดิน โดยใช้ดินในการทดลอง 3 ชุด ได้แก่ ชุดดินสติก ชุดดินลพบุรี ชุดดินราชบุรี พบว่า ชุดดินสติกมีประสิทธิภาพในการดูดซับผิวสีจริงและซีโอดีในน้ำเสียสูงที่สุด ส่วนชุดดินลพบุรี มีประสิทธิภาพในการดูดซับผิวลิกนินในน้ำเสียได้สูงที่สุด และพบว่าชุดดินทั้ง 3 ชุด มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน สี และซีโอดีสูงที่สุดในวันแรกของการทดลอง

Boyd (1970) พบว่ารูปดาบเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการกำจัด และบำบัดน้ำเสียเพราะรากของรูปดาบมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสียได้ค่อนข้างสูง และสามารถดูดซับธาตุโลหะหนักได้ เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม นอกจากนี้รูปดาบยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตจี้รสาน มุงหลังคาบ้าน และกระดาษ เนื่องจากก้านรูปดาบมีเยื่อไฟเบอร์มาก ทำให้มีความเหนียว นอกจากนี้ รูปดาบมีน้ำหนักแห้งต่อไร่ประมาณ 1.7-2.4 ตันต่อไร่ สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนได้ และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ร้อยละ 2.33 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.51 และโปรแตสเซียม ร้อยละ 2.35 ซึ่งค่อนข้างสูง เมื่อนำมาทำปุ๋ยหมัก จะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูงด้วย นอกจากนี้รูปดาบยังสามารถนำไปทำเป็นสารกำจัดแมลงได้เมื่อนำมาจุดไฟให้เกิดควัน

Ghash et al. (1987) กล่าวว่า การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าเกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์และสี โดยทั่วไป วิธีการกำจัดสีและสารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์-เคมี แม้ว่าระบบบำบัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Carbonadsorption) จะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยวิธีเคมี (Chemical Coagulation) หรือไม่ก็ตามเป็นวิธีที่สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้ การรวมกระบวนการทางชีววิทยาและการดูดซับทางเคมี (Chemicaladsorption) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียโรงงานทอผ้าได้

Nabel *et al.* (1974) ได้ทดลองนำไอโซนมาบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง (Secondary Effluents) จากโรงงานเยื่อและกระดาษ 4 โรงงาน พบว่าสามารถกำจัดสีในน้ำเสียได้ และยังลดค่า COD, BOD และค่าความขุ่นได้

Makis *et al.* (2007) ได้ทดลองใช้หญ้าแฝกบำบัดสาร 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) โดยทดลองในระบบการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (hydroponic media) และ ได้ศึกษาผลของยูเรียที่มีต่อการดูดซับ TNT โดยใช้หญ้าแฝก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหญ้าแฝกสามารถดูดซับ TNT ได้ในปริมาณสูง (1,026 mg/g) จึงสรุปได้ว่า หญ้าแฝกสามารถดูดซับสาร TNT เข้าไปในส่วนของพืชและสามารถย่อยสลาย หรือเปลี่ยน รูปสาร TNT ให้ไปเป็นสารชนิดอื่นได้

MC Creary and Snoeying (1980) ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับซึ่งมีสารดูดซับ 2 ชนิดที่ มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน คือ กรดฮิวมิกและกรดซัลฟิวริก โดยใช้แอคติเวตเต็ดคาร์บอน รุ่น Filtrasorb 400 เป็นสารดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับของแอคติเวตเต็ดคาร์บอน จะขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของสารถูกดูดซับ โดยอัตราการดูดซับจะมีค่าลดลงเมื่อมวลโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลโมเลกุลมีขนาดใหญ่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านโพรงของแอคติเวตเต็ดคาร์บอนเข้าไปได้

Wanpen and Anussorn (2002) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยศึกษาการกำจัดสี และ COD โดยใช้โถทดสอบและดินที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ทับถมกันแล้วนำดินที่ได้จากการขุดลงไปที่มีความลึก 1 เมตร นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดรูเปิด 0.075 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยดินเหนียว 18 – 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก น้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบภายหลังการบำบัดขั้นที่สองด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานเยื่อและกระดาษ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ pH เท่ากับ 8 และใช้ดินเหนียว 90 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดสีเท่ากับ 46 เปอร์เซ็นต์และลด COD เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์

Wilde *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาทดลองใช้หญ้าแฝกฟื้นฟูดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ สังกะสี ทองแดง และ เหล็ก จากดินที่มีอายุการปนเปื้อนนานประมาณ 50 ปี ในบริเวณ Savannah River Site (SRS) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปนเปื้อนพบว่าหญ้าแฝกจะสะสมโลหะหนักที่บริเวณรากมากกว่าลำต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chea *et al.* (2004) ที่ปลูกหญ้าแฝกในดิน

ที่ปนเปื้อนตะกั่วในระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าตะกั่วจะสะสมอยู่ในหญ้าแฝกบริเวณรากมากที่สุด

Singh *et al.* (2008) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้หญ้าแฝกบำบัดสารฟีนอลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีกปนเปื้อนในแหล่งน้ำ โดยทำการทดลองปลูกหญ้าแฝกในสภาวะปลอดเชื้อ (aseptic condition) พบว่าภายในระยะเวลา 4 วัน หญ้าแฝกสามารถกำจัดสารฟีนอลความเข้มข้น 50 และ 100 mg/l ออกจากสารละลายได้หมด ส่วนสารฟีนอลความเข้มข้น 200 500 และ 1,000 mg/l สามารถกำจัดได้ 89.76 และ 70 % ตามลำดับ ดังนั้นหญ้าแฝกจึงเป็นพืชที่มีแนวโน้มที่จะใช้ในการบำบัดสารฟีนอล และสารมลพิษอินทรีย์อื่นๆ ที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion block) พร้อมหลอดย่อยสลาย (Digestion vessels)
- 1.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย DO-Meter, pH-Meter, Turbidity-Meter, Digital TDS-Meter และ Conductometer
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501
- 1.5 ตู้ดูดความชื้น (Desicater)
- 1.6 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.7 ชุดคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตรพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.8 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอนของ hatman
- 1.9 กระบะพลาสติกกรุสียุโรป ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร ในการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

2. สารเคมี

- 2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate; $K_2Cr_2O_7$) Grade AR
- 2.2 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate; (FAS); $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) Grade AR
- 2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) Grade AR
- 2.4 สารละลายอินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferroin) Grade AR
- 2.5 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuri sulfate; $HgSO_4$) Grade AR
- 2.6 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate; Ag_2SO_4) Grade AR

2.7 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate; $C_{12}H_8N_2H_2O$)

Grade AR

2.8 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปต้าไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) Grade AR

2.9 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] (FAS)

Grade AR

3. ถ้ำลอยลิ้น

เป็นถ้ำลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ที่ประกอบด้วยถ่านหินลิกไนต์ 70 เปอร์เซ็นต์ และชีวมวล 30 เปอร์เซ็นต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

4. วัสดุปลูก ดินนาผสมทราย อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 3:1, กรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด

5. พืชที่ปลูก ได้แก่ ต้นหญ้าแฝก และ ต้นรูปถ่าย

6. น้ำเสีย

เป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ ที่ผ่านบ่อปรับสภาพเริ่มต้น (Primary Clarifier) ของบริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

นำสารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) มาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั่งทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งอย่างละเอียด 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายแล้วตั่งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

1.2 กรดซัลฟิวริกเอเจนต์

ชั่งสารซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) 10.11 กรัม จากนั้นเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H_2SO_4) 1 ลิตร ทำการกวนช้าๆ จนผลึกของสารซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด

1.3 สารละลายเฟอโรอินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate; $C_{12}H_8N_2H_2O$) 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

ชั่งเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] (FAS) 39.2 กรัม เติมน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรตละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเปรียบเทียบกับมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้ง ที่นำมาใช้

2. การเตรียมตัวดูดซับ

นำถ้ำลอยลิกไนต์มา อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นทิ้งถ้ำลอยให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เพื่อไว้สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์

3.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 และ 20.0 มิลลิกรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตรแต่ละขวด แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ได้สารละลายมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ความเข้มข้น 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0 และ 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3.2 นำสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ จากข้อ 3.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐาน ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ (แกนนอน)

4. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดได้แก่ pH, สี, ความขุ่น, ความนำไฟฟ้า, BOD และ COD ตามวิธีที่กำหนดไว้ใน Standard Method for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 1995) โดยพารามิเตอร์ที่มุ่งเน้นสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ คือการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดี ซึ่งมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์สีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยทำการกรองน้ำเสียผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงไปเทียบหาความเข้มข้นของสีของน้ำจากกราฟมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ที่เตรียมไว้ในข้อที่ 3

4.2 การวิเคราะห์ซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยใช้วิธี Closed-Reflux โดยการเจือจางน้ำเสีย 30 เท่าด้วยน้ำกลั่น นำน้ำเสียที่ผ่านการเจือจางแล้ว 2.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร และเติมกรดซัลฟิวริกเอเจนต์ 3.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดย่อยสาร เขย่าและปิดฝาให้แน่น จากนั้นนำเข้าเครื่องย่อยสลาย 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเทใส่ขวดรูปชมพู่ และกลั่นด้วยน้ำกลั่น เติมสารเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 2-3 หยดไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตจนถึงจุดยุติจะเห็นสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง จากนั้นคำนวณหาค่า ซีไอดี

5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษและไอโซเทอร์มการดูดซับโดยการทดลองแบบแบตช์

5.1 ศึกษาปริมาณถ้ำลอยลิกันต์ที่เหมาะสม

ชั่งถ้ำลอยลิกันต์ปริมาณ 1 ถึง 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง เมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ตามวิธีการข้อ 4.1 และวิเคราะห์หาปริมาณ ซีไอดี ตามวิธีการข้อ 4.2 และคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีไอดี

5.2 ศึกษาระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสม

เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ถ้ำลอยลิกันต์บำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ โดยใช้ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตรต่อปริมาณถ้ำลอยลิกันต์ที่ศึกษาในข้อ 5.1 ระยะเวลาสัมผัสหรือบำบัดที่ทำการศึกษามีทั้งเป็นชั่วโมงและเป็นวัน คือ 1-8 ชั่วโมง และ 1-5 วัน ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 5.1

5.3 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนข้อ 5.1 แต่ใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้อ 5.2 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ เขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์ม และสมการการดูดซับของแลงเมียร์ และ ฟรุนดลิช

5.4 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักเกลือลิกไนต์ต่อดิน

เพื่อหาอัตราส่วนเกลือลิกไนต์ผสมดินที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยใช้ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลือลิกไนต์ต่อดินเป็น 1:10 ถึง 1:120 ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อที่ 5.1

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง (continuous flow)

ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้น กรวด 9.6 เซนติเมตร ทราบหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2.8 เซนติเมตร และเกลือลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากการศึกษาข้อที่ 5.4 16.5 เซนติเมตร จากล่างไปบน

6.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบไหลผ่านต่อเนื่อง

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 1,200 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีจนประสิทธิภาพลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่

6.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบแข่งขันน้ำเสีย

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร (เป็นระยะเวลาที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2) นำน้ำที่เก็บได้มาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี ทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง หรือคงที่

6.3 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.1 และ 6.2 แต่เปลี่ยนชั้นบนสุดจากการใช้เกลือลิกไนต์ผสมดินเป็นการใช้ดินอย่างเดียวในการทดลองเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมการทดลอง

7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ด้วยระบบบำบัดแบบธรรมชาติ (natural treatment)

ทำการทดลองโดยใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51x51x51 เซนติเมตร บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ททรายหยาบ 3 เซนติเมตร ททรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 5.4 30 เซนติเมตร ร่วมกันกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือ ต้นรูปถ่ายและต้นหญ้าแฝก ต้องทำการอนุบาลพืชจนเจริญเติบโตแข็งแรง และมีรากยึดเกาะกับดินจำนวนมาก

7.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบแข่งขันน้ำเสีย

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 200 ลิตร ทำการแช่น้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลาที่ศึกษาได้จากข้อ 5.2 เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากกระบะ เพื่อนำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี ทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่งหรือคงที่

7.2 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อที่ 7.1 แต่เปลี่ยนวัสดุปลูกจากการผสมดินกับถ้ำลอยลิกไนต์เป็นดินอย่างเดียวแทนในการทดลองเพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลองของการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

ผลและการวิจารณ์

การบำบัดน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ด้วยการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ ร่วมกับการบำบัดแบบธรรมชาติ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ เพื่อศึกษา ปริมาณของตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ และระยะเวลาบำบัด และไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้ไปใช้ในการทดลองการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีแบบการไหลต่อเนื่อง โดยใช้คอลัมน์และจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติในกระเบปพลาสติกต่อไปโดยได้ผลการทดลองดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

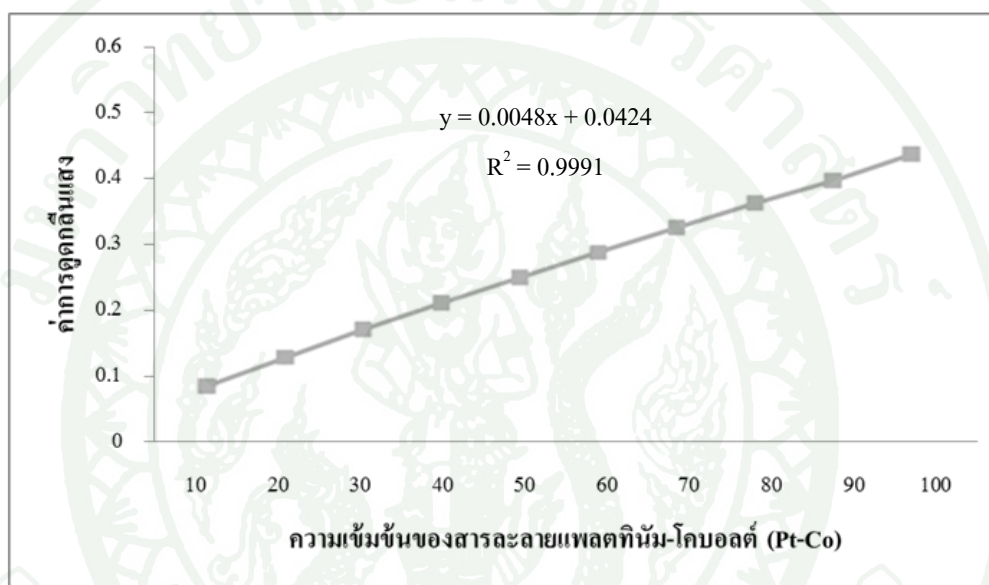
ถ้ำลอยลิกไนต์ เป็นถ้ำลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ 70 เปอร์เซ็นต์ และชีวมวล 30 เปอร์เซ็นต์ ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ บริษัทสยามคราฟท์ อุตสาหกรรม จำกัด ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ลักษณะถ้ำลอยที่ได้เป็นผงสีเทาดำ ดังแสดงในภาพที่ 28 ทั้งถ้ำลอยให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป



ภาพที่ 28 ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ผ่านการอบ

2. กราฟมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์

กราฟมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์ที่เตรียมได้จากการทดลองข้อที่ 3 ได้ผล ดังภาพที่ 29 มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีสมการถดถอยเชิงเส้นคือ $y = 0.0048x + 0.0424$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9991



ภาพที่ 29 กราฟมาตรฐานแพลตทินัม – โคบอลต์

3. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากบ่อบำบัดปรับสภาพเริ่มต้น พบว่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่มีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมดังตารางที่ 5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าซีไอดีมีค่าอยู่ที่ประมาณ 2,800 – 3,120 mg/L ซึ่งเกินมาตรฐานอย่างมาก และค่าสีของน้ำเท่ากับ 112 Pt-Co Unit ซึ่งเกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคที่กำหนดให้ไม่เกินค่า 5 – 15 Pt-Co Unit (การประปาส่วนภูมิภาค, 2553) และมองด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นสีน้ำตาล และมีลักษณะขุ่น

ตารางที่ 5 คุณภาพน้ำเสียจากบ่อบำบัดสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม
พีเอช	7.3±0.05	5.5-9.0
EC (μS/cm.)	2,050±4.00	-
TDS (mg/L)	1,309±8.02	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม(mg/L)	0.9±0.20	-
ความขุ่น(NTU)	8.9±0.40	-
ซีโอดี (mg/L)	3,120±10.69	ไม่เกิน 120
บีโอดี (mg/L)	1,188±4.16	ไม่เกิน 20
สี Pt-Co Unit	112±1.00	ไม่เกิน 5 – 15

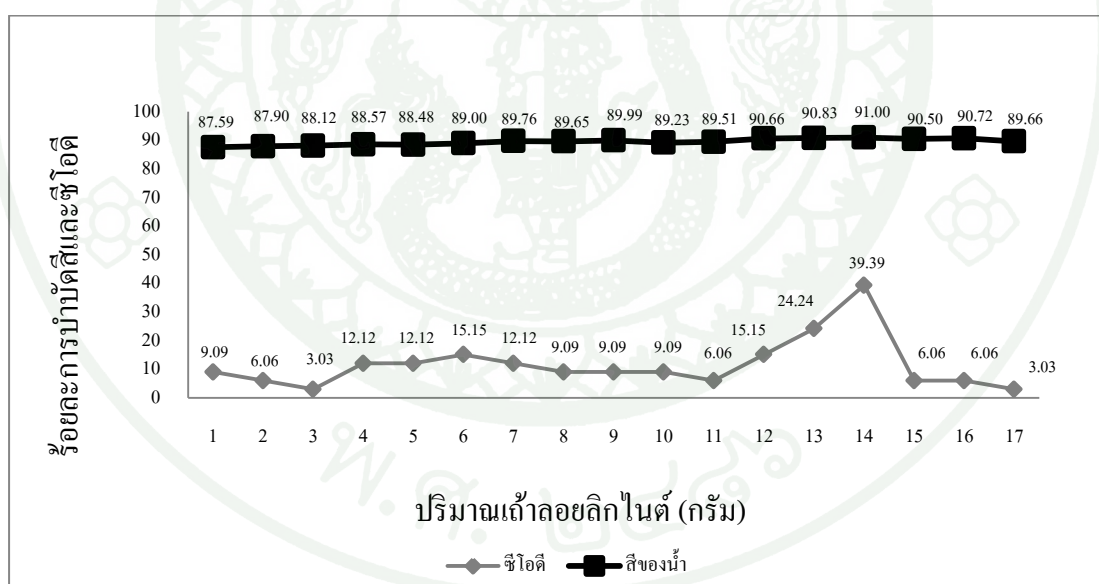
4. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษและไอโซเทอร์มการดูดซับโดยการทดลองแบบแบตช์

4.1 ศึกษาปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำที่เหมาะสม

จากการทดลองข้อที่ 5.1 ศึกษาโดยแปรผันปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำตั้งแต่ 1 ถึง 20 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ซึ่งปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำที่เหมาะสมที่สุดคือ 14 กรัม สามารถบำบัดค่าสีของน้ำและซีโอดีได้สูงที่สุดคือร้อยละ 91.00 และ 39.39 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีเพิ่มขึ้น และเริ่มมีแนวโน้มลดต่ำลง อธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารต่างๆ แต่มลสารที่แถาลอยลิกลงในน้ำสามารถดูดซับได้ในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น และอาจเกิดการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

จากการศึกษาปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำที่เหมาะสม จะเห็นว่าปริมาณแถาลอยลิกลงในน้ำที่เหมาะสมคือ 14 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ซึ่งถ้านำไปประยุกต์กับการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

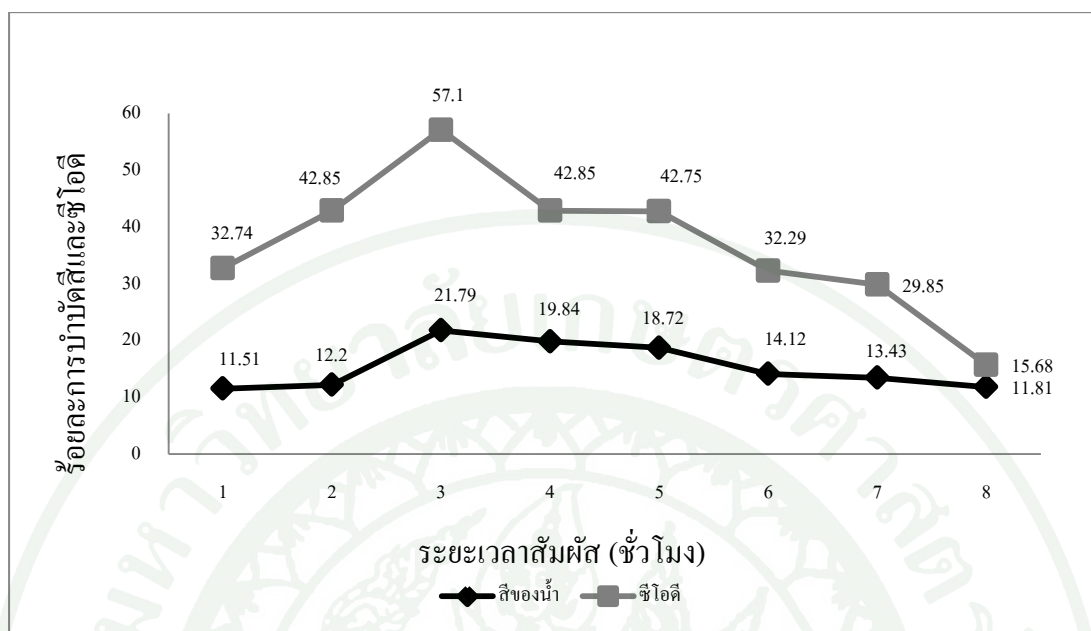
อุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่มีปริมาณน้ำเสีย ซึ่งอัตราการผลิตน้ำเสียต่อวันเท่ากับ 9,282.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และถ้ามีการนำเถ้าลอยลิกไนต์ที่ศึกษาได้ไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริงนั้น ต้องใช้เถ้าลอยลิกไนต์ทั้งสิ้น 2,598,960 กรัมต่อวัน หรือประมาณ 2.60 ตันต่อวัน และถ้าคิดปริมาณการใช้ในระยะเวลา 1 ปี จำเป็นจะต้องใช้เถ้าลอยลิกไนต์อยู่ที่ประมาณ 949 ตันต่อปี ซึ่งพบว่าเถ้าลอยลิกไนต์ที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้นั้นมีปริมาณมากถึง 49,000 ตันต่อปี จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่ทางบริษัทนั้นมีอยู่ เพียงพอต่อการนำมาใช้ในการดูดซับมลสารใน น้ำเสีย ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติได้ และมากพอสำหรับการทำ การบำบัดซ้ำอีกครั้ง เพื่อให้ น้ำเสียที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือนำไปใช้ประโยชน์นั้นมี ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อยู่ในเกณฑ์ตามค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม โดยไม่ต้องผ่านระบบบำบัดที่ต้องอาศัยต้นทุนและเทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งจะช่วยลด ภาระค่าใช้จ่ายให้กับภาคอุตสาหกรรม ในขณะเดียวกันยังสามารถเพิ่มรายได้ให้กับผู้ประกอบการ จากการนำเถ้าลอยลิกไนต์ไปขายเพื่อเป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ หรือการนำไปเพื่อฝังกลบที่ดิน



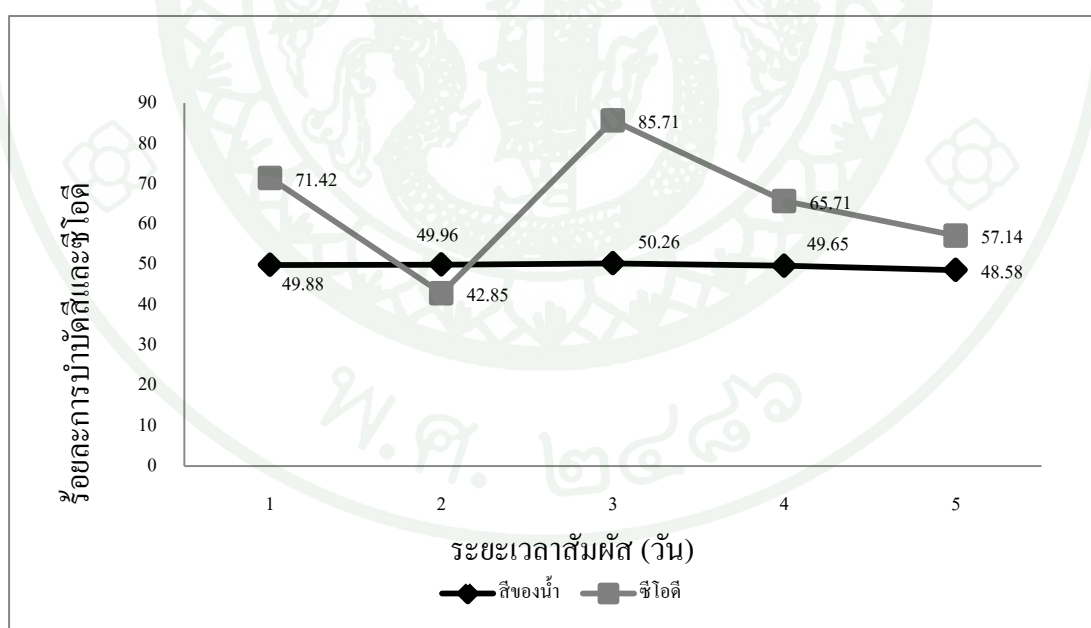
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีกับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์

4.2 ศึกษาระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสม

จากการทดลองข้อที่ 5.2 ใช้เถาลอยลิกไนต์ 14 กรัมต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตรและทำการแปรผันระยะเวลาเป็นชั่วโมงและเป็นวัน พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงที่ 3 ชั่วโมง ให้ร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ดีที่สุด คือ ร้อยละ 21.79 และ 57.10 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาสัมผัส 3 วัน ให้ร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ดีที่สุด คือ ร้อยละ 50.26 และ 85.71 ตามลำดับ ดังภาพที่ 31 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสีของน้ำ และซีโอไซด์สูงกว่าผลการทดลองในข้อ 4.1 มากแสดงว่าระยะเวลาบำบัดมีผลต่อการบำบัดมาก อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาทำให้มีผลสารมีโอกาสสัมผัส หรือถูกดูดซับด้วยเถาลอยลิกไนต์มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับของเถาลอยลิกไนต์ก็มีปริมาณที่จำกัดเช่นกัน เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นที่ผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่ และอาจจะมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากเกิดการคายซับ (desorption) (นิพนธ์ และ กนิดา, 2550)



(ก.)

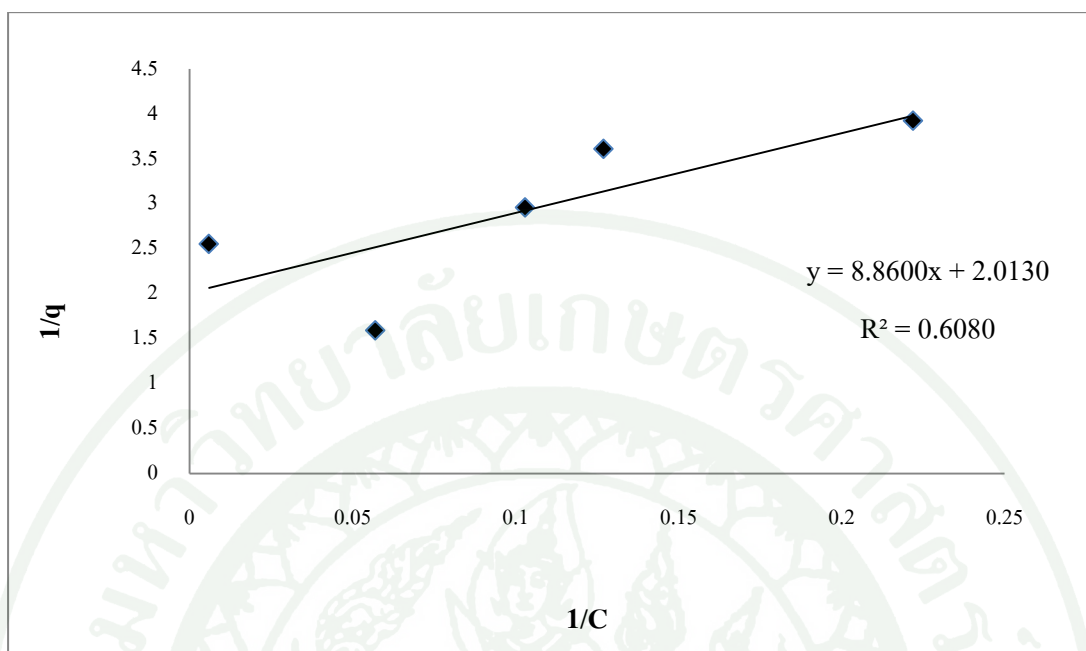


(ข.)

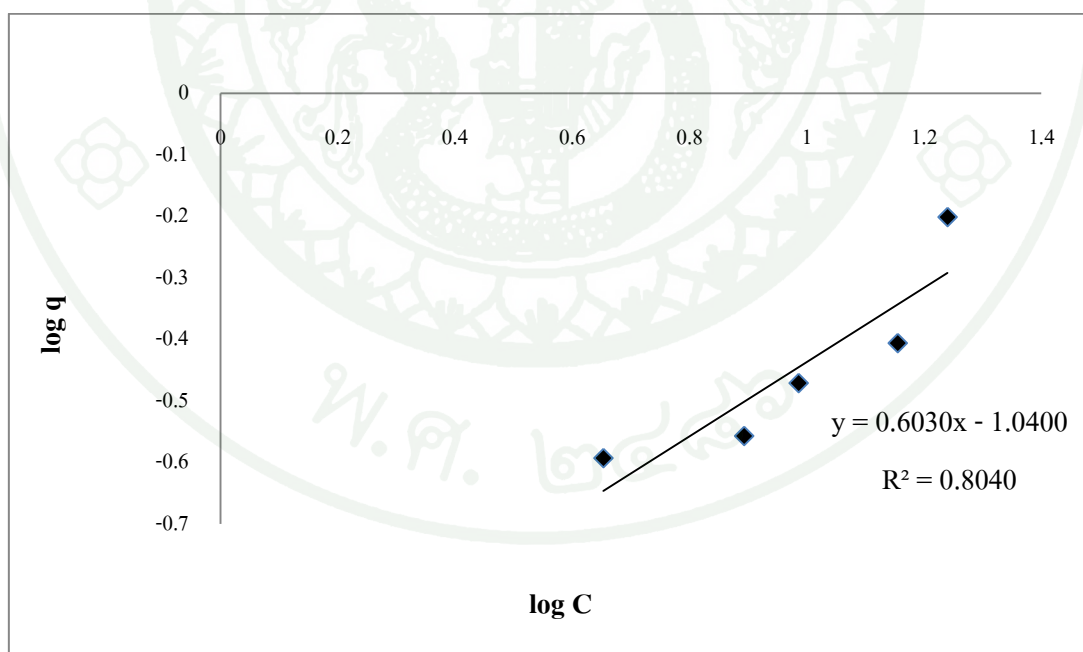
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส เป็น ชั่วโมง (ก.) และวัน (ข.)

4.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับตามวิธีการทดลองดังข้อ 5.3 โดยแปรผันปริมาณแก๊สออกซิเจนไนโตรเจนที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง ต่อสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์ 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าความเข้มข้นสีของน้ำเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 30 Pt-Co Unit แล้วนำค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นของน้ำเสียไปคำนวณหาค่า C (ความเข้มข้นของสีที่ผ่านการดูดซับแล้วจากตัวดูดซับ), q (ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ), $1/q$, $1/C$, $\log q$ และ $\log C$ เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) แสดงดังในภาพที่ 32 ดังนี้



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 32 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ก.) และฟรุนดิช (ข.) ของการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกันต์

จากการทดลองที่ 5.3 นำผลการทดลองจากการศึกษาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดยแปรผันปริมาณถ่านกัมมันต์ ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง มาเขียนกราฟไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และ ฟรุนดลิช ได้ดังภาพที่ 32 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.6080 และ 0.8040 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน แสดงว่ากลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช ส่วนภาพที่ 32 (ข.) กลไกการดูดซับของฟรุนดลิช คือ การดูดซับภายใต้สมมุติฐานที่ว่า พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นที่ผิวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) แต่จากสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช เส้นกราฟตัดแกน y ที่จุด $\log q$ มีค่าติดลบ (-) ทำให้เส้นกราฟตัดแกน x ที่จุด $\log C$ มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นหมายถึง C ซึ่งเป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าน้อยนั่นเอง ประกอบกับ ณ จุดนี้ $\log q$ มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง q ซึ่งคือปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า C ที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นได้มาก ประกอบกับการทดลองมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่ จึงส่งผลให้ C มีค่าน้อย และ q มีค่ามากขึ้นเอง

เมื่อพิจารณาไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการดูดซับของแลงเมียร์ จากทฤษฎีสมการในรูปทั่วไปคือ $q = q_m KC / 1 + KC$ เมื่อจัดรูปสมการให้อยู่รูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C}$$

จากในภาพที่ 33 (ก.) เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$ แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟ จะได้

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

$$\frac{1}{q} = 8.8600 \left(\frac{1}{C} \right) + 2.0130$$

เขียนกราฟระหว่าง $1/q$ และ $1/C$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ 8.8600 และ จุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ 2.0130

$$\frac{1}{K q_m} = 8.8600$$

$$\frac{1}{q_m} = 2.0130$$

$$\text{จึงได้ } K = 0.2272$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ในสารละลายมาตรฐาน พบว่า ค่า K ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 1 แต่ความสามารถในการดูดซับของถ่านลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง ซึ่งขัดแย้งกับค่า K ที่ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากตัวถูกดูดซับหรือมลสารในน้ำเสียมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านลอยลิกไนต์ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงไม่เพิ่มขึ้นตาม ทำให้ค่า K ที่ได้จึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี

สำหรับสมการไอโซเทอร์มการดูดซับในสารละลายมาตรฐานของฟรุนดลิช มีรูปแบบของสมการคือ $q = KC^{1/n}$ เมื่อนำสมการมาจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\log q = \log K + (1/n) \log C$$

$$\log q = -1.0400 + 0.6030 \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.6030 และมีจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ -1.0400 นั่นคือ

$$\log K = -1.0400$$

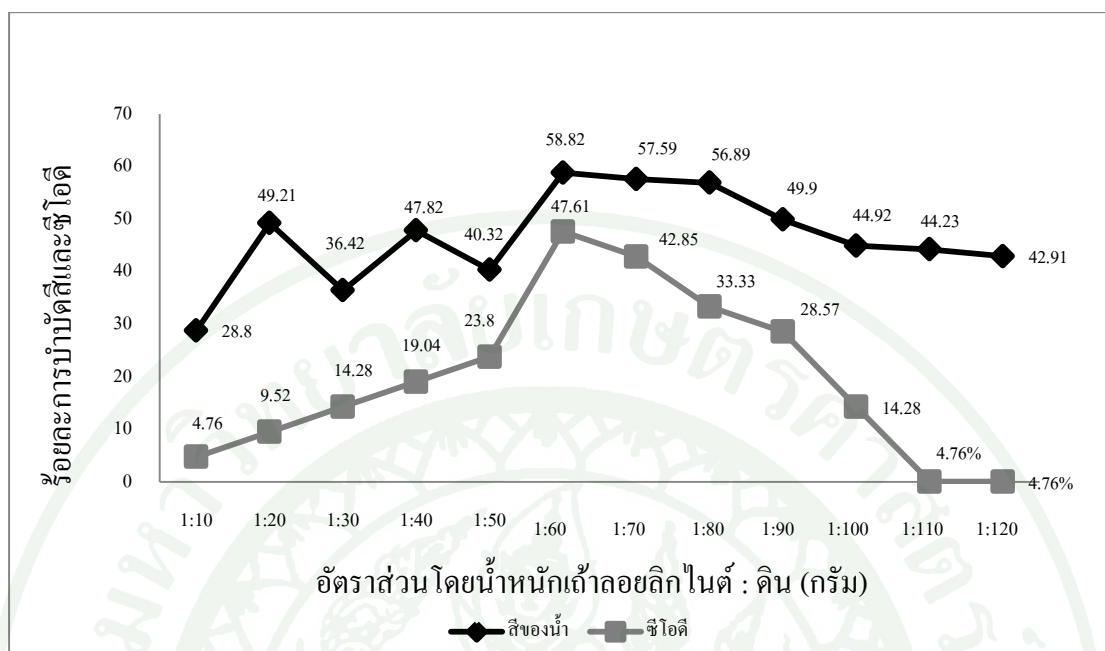
$$1/n = 0.6030$$

$$n = 1.658$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษา หรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ ดังนั้นไอโซเทอร์มการดูดซับพบว่า ค่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ได้ต่ำ ในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวได้ว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวของถ้ำลอยลิกไนต์ในปริมาณจำกัด ในการดูดซับแบบวิวิธพันธ์ และประกอบกับถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุน การดูดซับจึงเกิดในรูพรุนได้ด้วย (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.4. การศึกษาอัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดิน

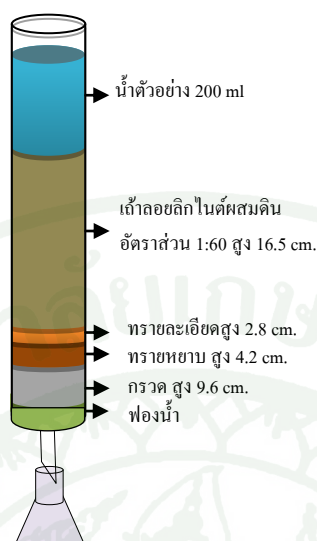
จากการทดลองข้อที่ 5.4 ใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินเป็น 1:10 ถึง 1:120 เขย่าและตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลา 3 ชั่วโมงผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีของดินที่อัตราส่วนต่างๆกันพบว่า ที่อัตราส่วน 1:60 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี สูงสุดคือร้อยละ 58.82 และ 47.61 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เพียงอย่างเดียว ดังผลการทดลองที่ 4.1 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกที่อัตราส่วน 1:60 ดังภาพที่ 33 ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้ถ้ำลอยลิกไนต์มาผสมกับดิน เนื่องจากดินและถ้ำลอยลิกไนต์ มีคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่เหมือนกันคือ มีรูพรุน ซึ่งสามารถดูดซับสารอินทรีย์ต่างๆได้เป็นอย่างดี ตามกระบวนการดูดซับ คือความสามารถของสารในการดึงดูดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับติดผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง ที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำและซีโอดี ของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

5. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

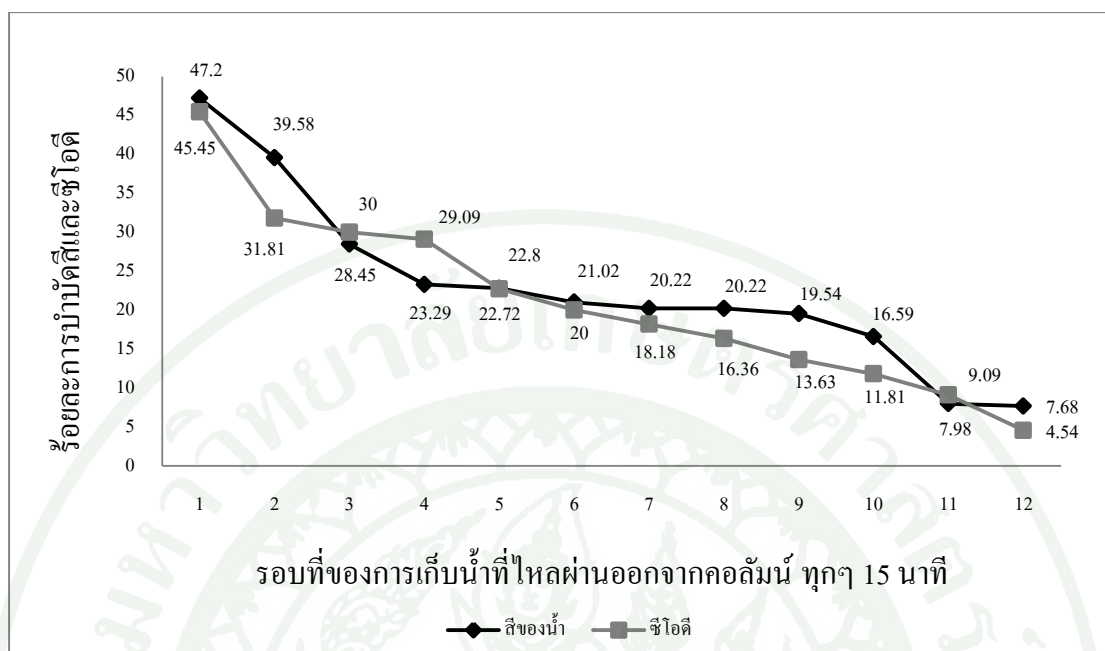
เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของชั้นวัสดุปลูกที่มีหน้าที่เหมือนชั้นกรองและชั้นดูดซับ ลักษณะคอดม่นที่ได้จากการบรรจุชั้นวัสดุปลูกดังภาพที่ 34 โดยใช้คอดม่นแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราหละเอียด 2.8 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินที่อัตราส่วน 1:60 ความสูง 16.5 เซนติเมตร



ภาพที่ 34 คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ

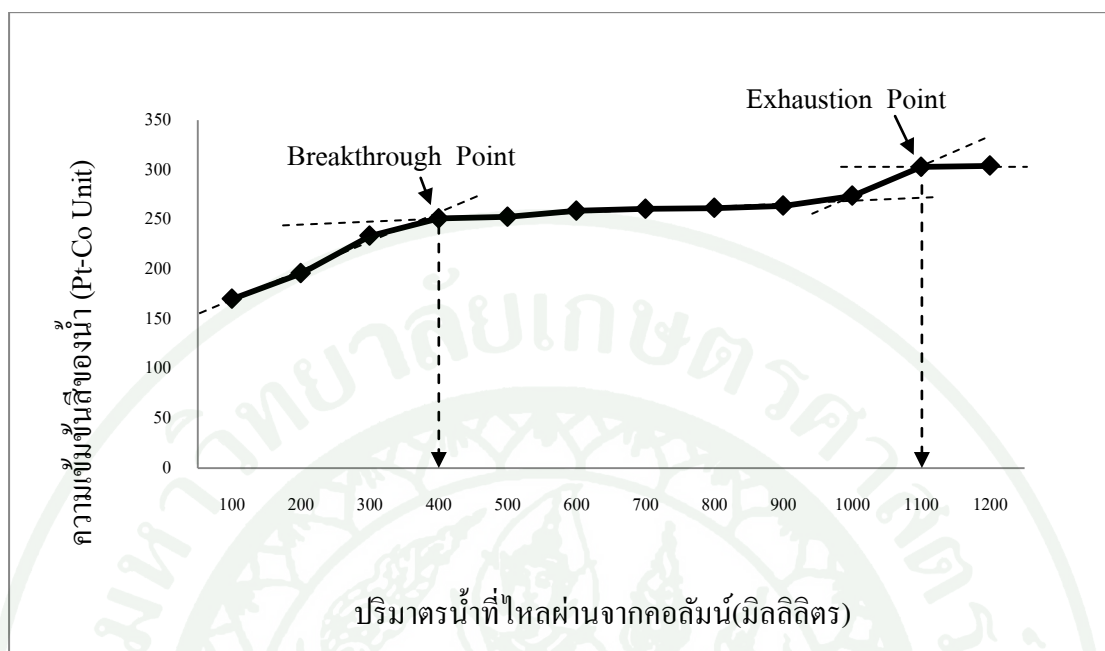
5.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบไหลต่อเนื่อง

จากการทดลองที่ 6.1 ผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยจำลองการบำบัดน้ำเสียคือ ปล่อยน้ำเสีย 1,200 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ใน 15 นาทีแรก สามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ได้ดีที่สุดคือ ร้อยละ 47.20 และ 45.45 ตามลำดับ และประสิทธิภาพนั้นเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล (Esposito *et al.*, 1991) เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในดินในช่วง 15 นาทีแรก ยังมีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ได้ดี เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆ ยังมีพื้นที่มาก และเมื่อระยะเวลาหนึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์เริ่มลดลงเรื่อยๆ ดังภาพที่ 35 เนื่องจากตัวดูดซับหรือถ่านกัมมันต์ในดินจะถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ จนเกือบหมด (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)



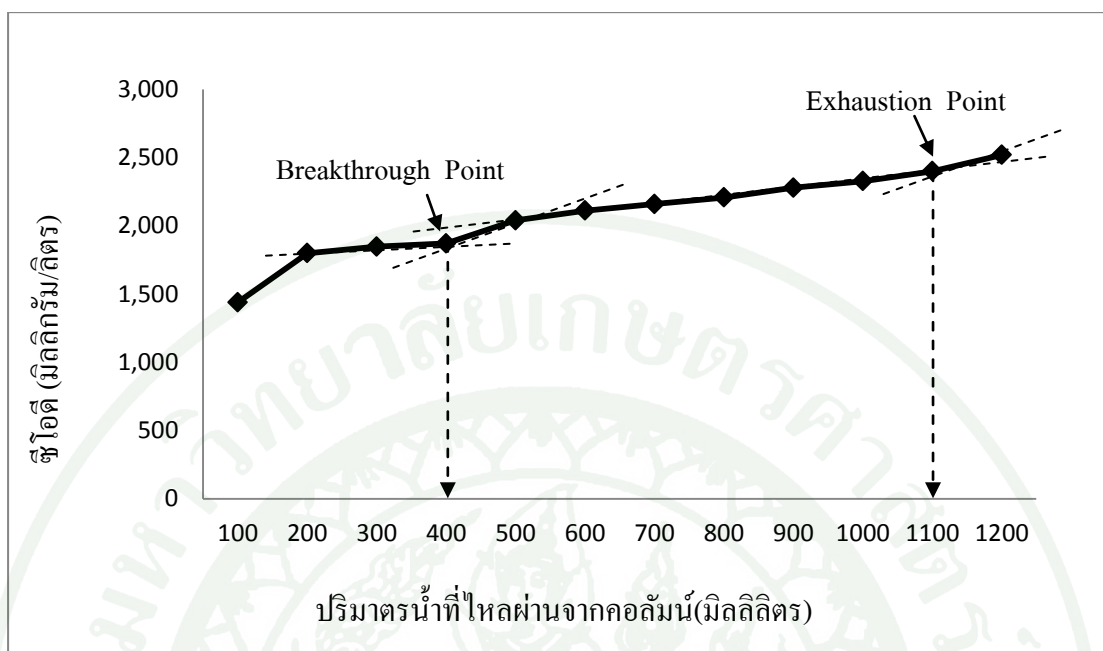
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำดื่ม และน้ำดิบ กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที

เมื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากการปล่อยผ่านน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่อง โดยปล่อยน้ำเสียปริมาตร 1,200 มิลลิลิตรอย่างต่อเนื่อง และสร้างกราฟเบรคทรูจพบว่าจุดเบรคทรูจอยู่ที่ปริมาตรน้ำเสีย 400 มิลลิลิตร มีปริมาณน้ำดื่มที่เหลืออยู่ 251.17 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 1,100 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำดื่มที่เหลืออยู่เท่ากับ 303.04 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง

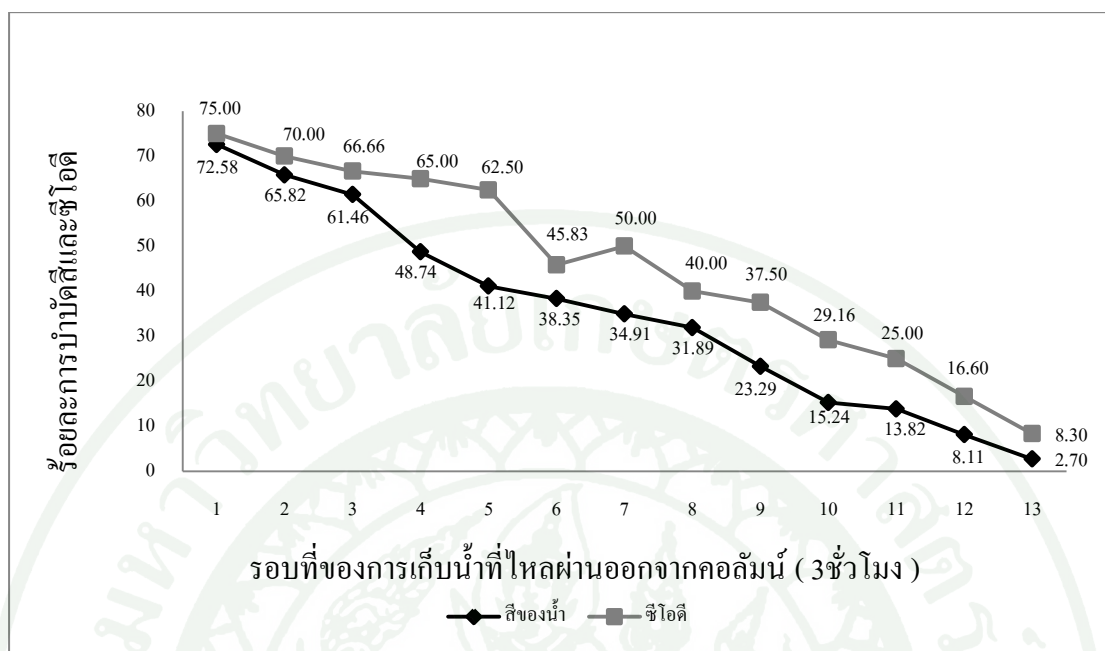
และเมื่อคำนวณปริมาณซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากการปล่อยผ่านน้ำเสียแบบไหลต่อเนื่อง โดยปล่อยน้ำเสียปริมาณ 1,200 มิลลิลิตรอย่างต่อเนื่อง และสร้างกราฟเบรคทรูจพบว่าจุดเบรคทรูจอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 400 มิลลิลิตร มีปริมาณ ซีโอดีของน้ำเสียเหลืออยู่ 1,872 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 1,100 มิลลิลิตร ปริมาณซีโอดีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอดีของน้ำที่ไหล กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง

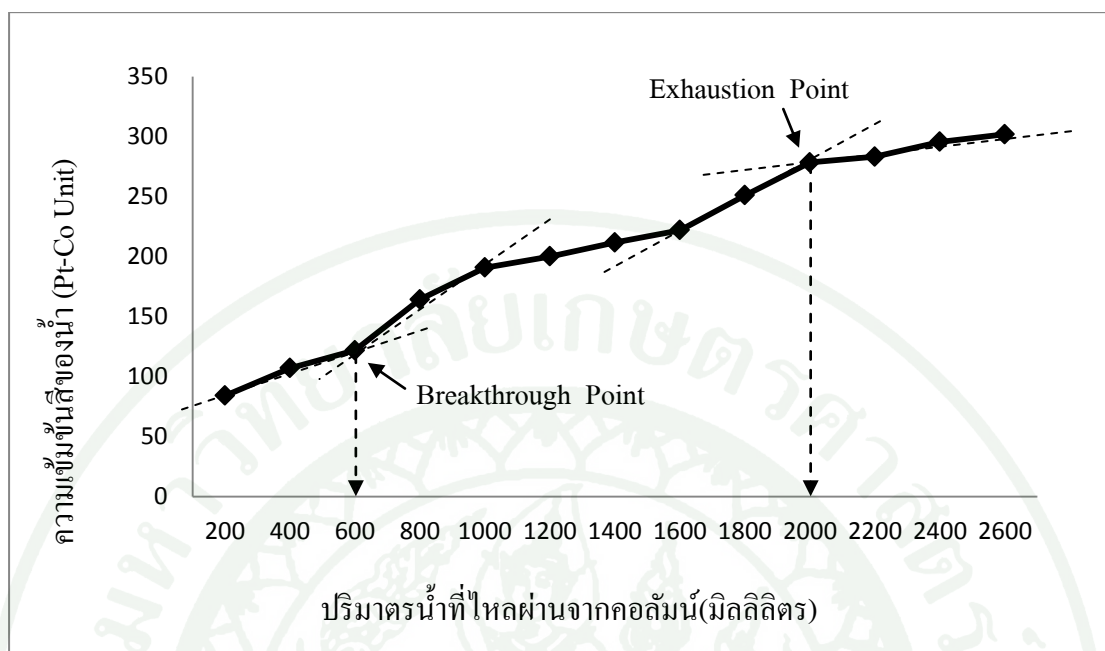
5.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบแข่งขันน้ำเสีย

จากการทดลองที่ 6.2 ผลการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบแข่งขันน้ำเสีย คือ ปล่อยน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ปล่อยทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในชั่วโมงที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีในครั้งแรกๆ นั้น สามารถบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 72.58 และ 75.00 ตามลำดับและประสิทธิภาพเริ่มลดลงเรื่อยๆ ดังภาพที่ 38 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 5.1



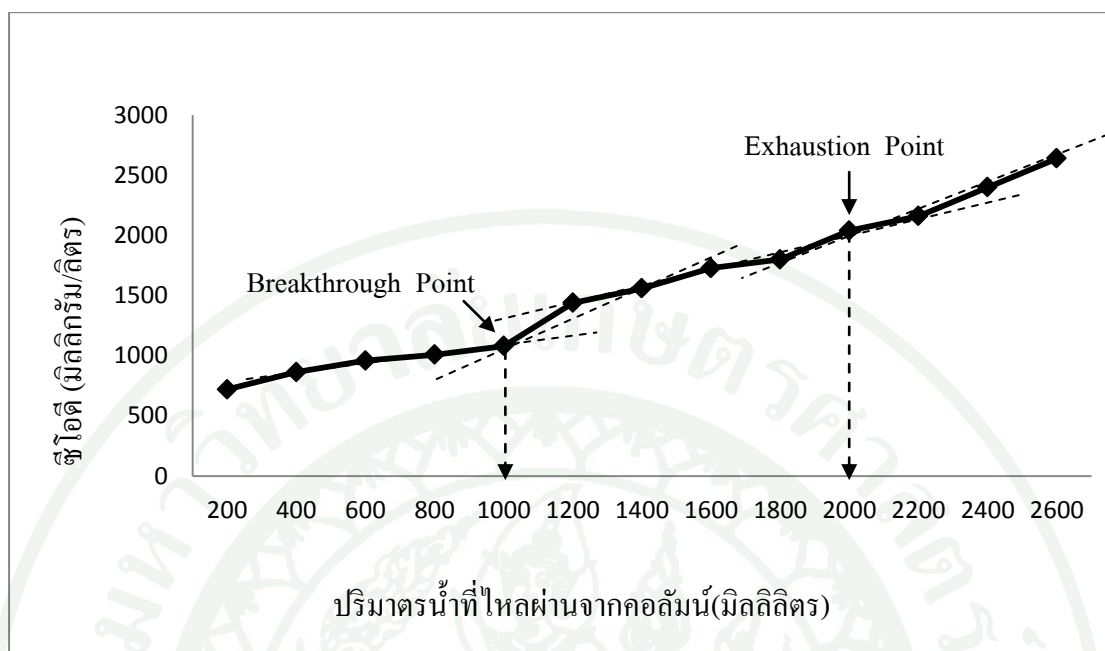
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดน้ำดื่มและซีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง

เมื่อคำนวณหาปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากการแช่งน้ำเสียแบบ 3 ชั่วโมง โดยปล่อยน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อครั้ง และสร้างกราฟเบรคทรูจพบว่าจุดเบรคทรูจอยู่ที่ปริมาตรน้ำเสีย 600 มิลลิลิตรมีปริมาณน้ำเสียเหลืออยู่ 121.79 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 2,000 มิลลิลิตรปริมาณน้ำเสียที่เหลืออยู่เท่ากับ 278.46 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 39



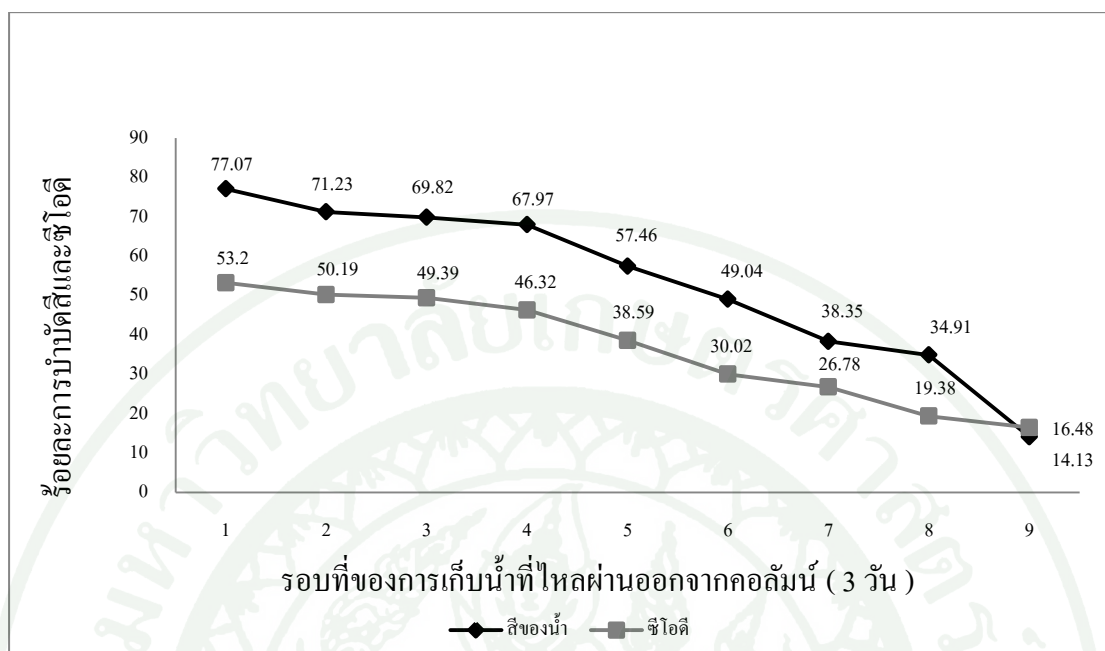
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบ
แข่งน้ำเสีย 3 ชั่วโมง

และเมื่อคำนวณปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์
หลังจากการแข่งน้ำเสีย 3 ชั่วโมง โดยปล่อยน้ำเสียปริมาณ 200 มิลลิลิตรต่อครั้ง และสร้าง
กราฟเบรคทรูจพบว่าจุดเบรคทรูจอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร มีปริมาณซีไอดีของน้ำเสีย
เหลืออยู่ 1,080 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 2,000 มิลลิลิตร
ปริมาณซีไอดีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 2,040 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 40



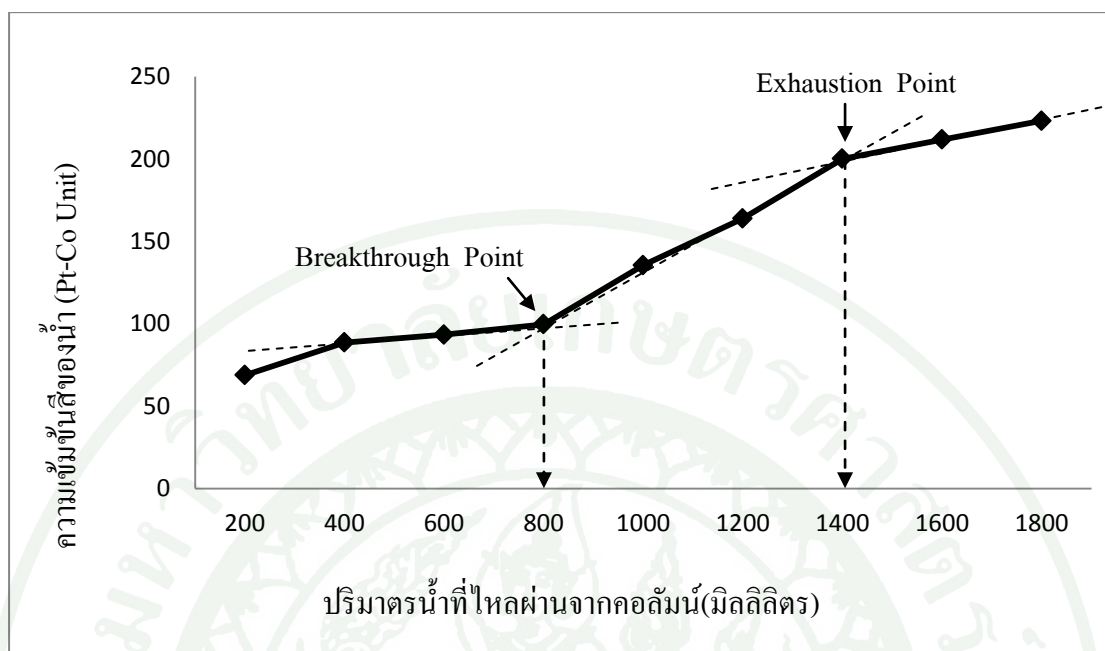
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอของน้ำที่ไหล กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 ชั่วโมง

การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบแข่งขันน้ำเสีย คือ ปล่อยน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ปล่อยทิ้งไว้ 3 วันและปล่อยแห้ง 2 วัน เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ในวันที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดของน้ำ และซีไอในรอบแรกๆนั้น สามารถบำบัดของน้ำ และซีไอได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 77.07 และ 53.20 ตามลำดับและประสิทธิภาพเริ่มลดลงเรื่อยๆ จนเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังภาพที่ 41 ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับข้อ 5.1



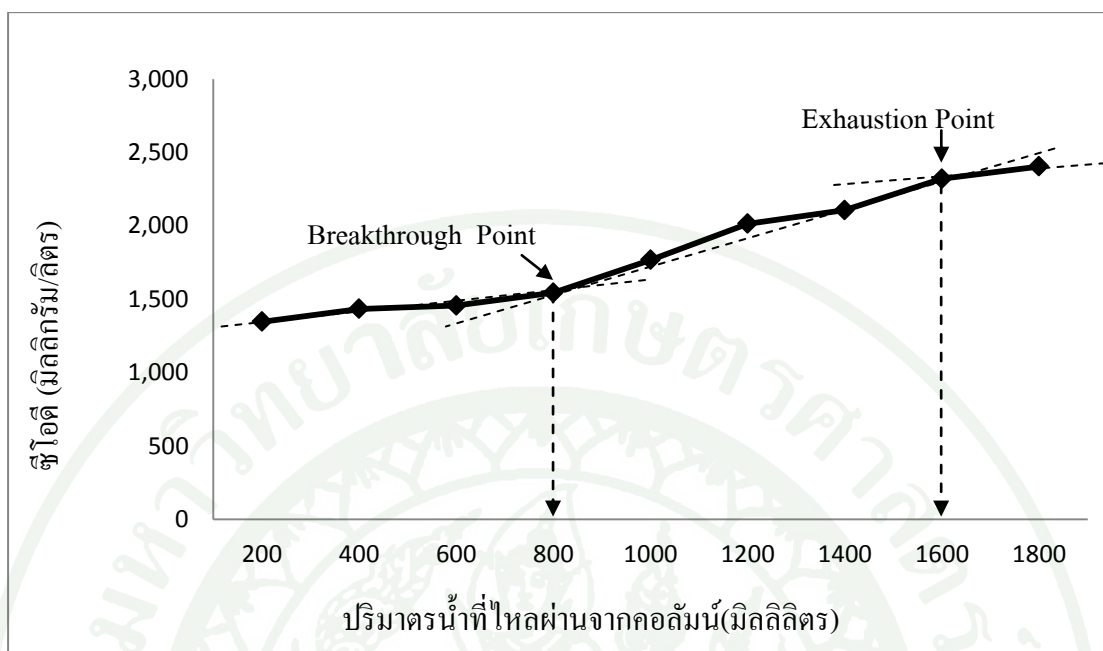
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี และซีไอดี รอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน

เมื่อคำนวณหาปริมาณสีของน้ำที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากการแช่งน้ำเสียแบบ 3 วัน และปล่อยแห้ง 2 วัน โดยปล่อยน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อครั้ง และสร้างกราฟเบรคทูล์พบว่าจุดเบรคทูล์อยู่ที่ปริมาตรน้ำเสีย 800 มิลลิลิตรมีปริมาณสีของน้ำเสียเหลืออยู่ 99.71 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 1,400 มิลลิลิตรปริมาณสีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 200.13 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีของน้ำที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบ
แข่งน้ำเสีย 3 วัน

และเมื่อคำนวณปริมาณซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปล่อยผ่านออกจากคอลัมน์
หลังจากการแข่งน้ำเสีย 3 วัน และปล่อยแห้ง 2 วัน โดยปล่อยน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตรต่อครั้ง
และสร้างกราฟเบรคทวร์จพบว่าจุดเบรคทวร์จอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 800 มิลลิลิตร มีปริมาณซีไอดีของ
น้ำเสียเหลืออยู่ 1,545 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพการบำบัดอยู่ที่ปริมาณน้ำเสีย 1,600
มิลลิลิตรปริมาณ ซีไอดีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 2,321 มิลลิกรัม/ลิตร ดังภาพที่ 43



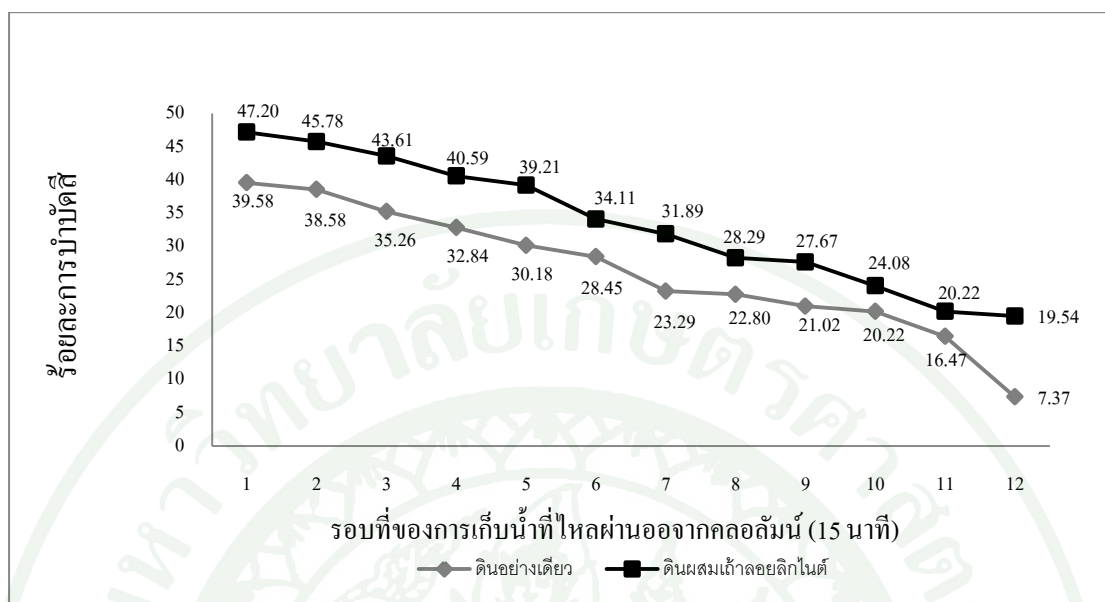
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณซีไอดีของน้ำที่หล่อ กับปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านคอลัมน์แบบแข่งขันน้ำเสีย 3 วัน

5.3 ชุดควบคุม

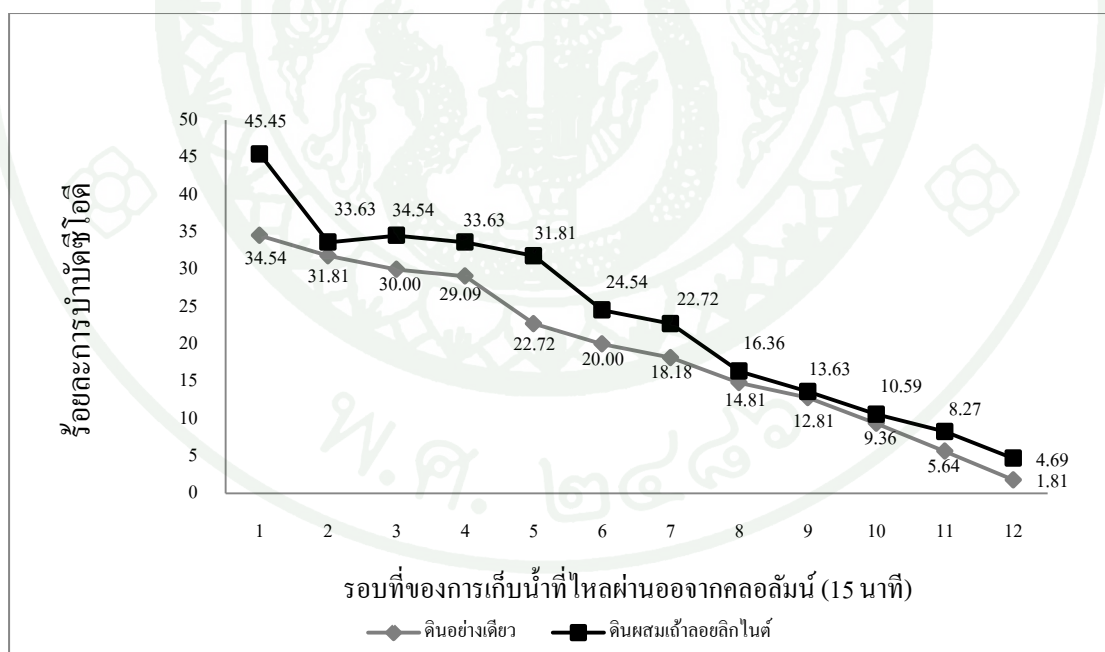
จากการทดลองที่ 6.3 การทดลองชุดควบคุมโดยใช้น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษผ่านคอลัมน์ที่ไม่มีการผสมแก๊สออกซิเจน พบว่าร้อยละการบำบัด และซีไอดีของน้ำเสียนั้นมีค่าน้อยกว่า ร้อยละการบำบัด และซีไอดีที่ทำการทดลองโดยมีการผสมแก๊สออกซิเจนลงไปในอัตราส่วน 1:60 เข้าไปในชั้นกรองด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมแก๊สออกซิเจนนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับซีไอดีได้ดีกว่าดินอย่างเดียว ดังตารางที่ 6 และดังภาพที่ 44, 45 และ 46

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีของชั้นวัสดุปลูกด้วย
ระยะเวลาบำบัดต่างกัน โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์

วิธีการบำบัด	ร้อยละการบำบัดของ		ร้อยละการบำบัด	
	เถาลอยลิกไนต์ + ดิน		ของชุดควบคุม	
	สีของน้ำ	ซีโอดี	สีของน้ำ	ซีโอดี
1. ปล่อยผ่าน	47.20	45.45	39.58	34.54
2. แช่ขัง 3 ชั่วโมง	72.58	75.00	45.11	43.33
3. แช่ขัง 3 วันปล่อยแห้ง 2 วัน	77.07	53.20	51.93	46.57

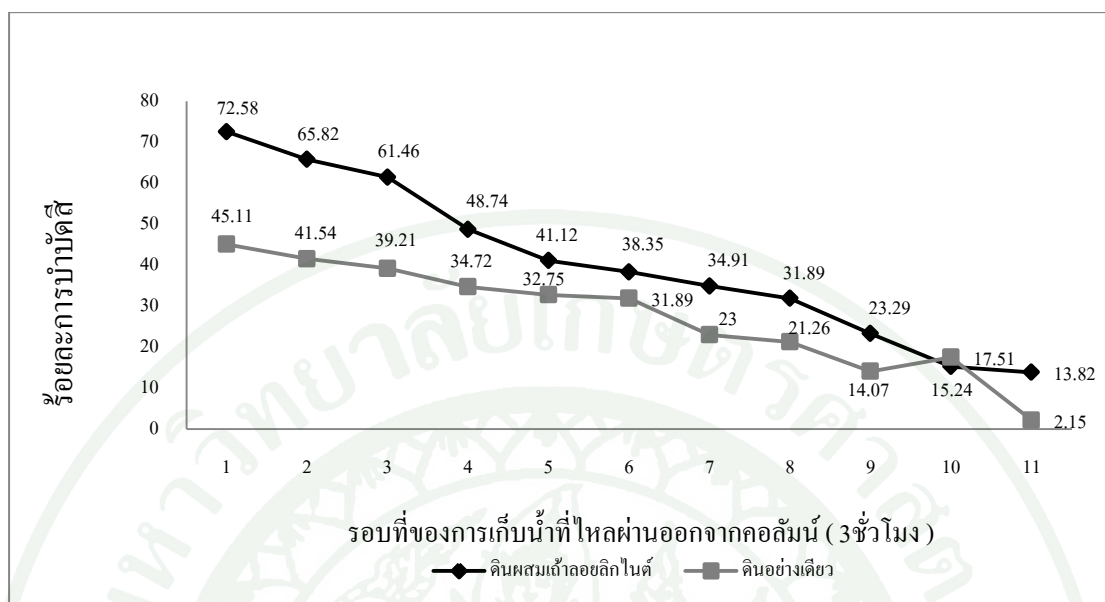


(ก.)

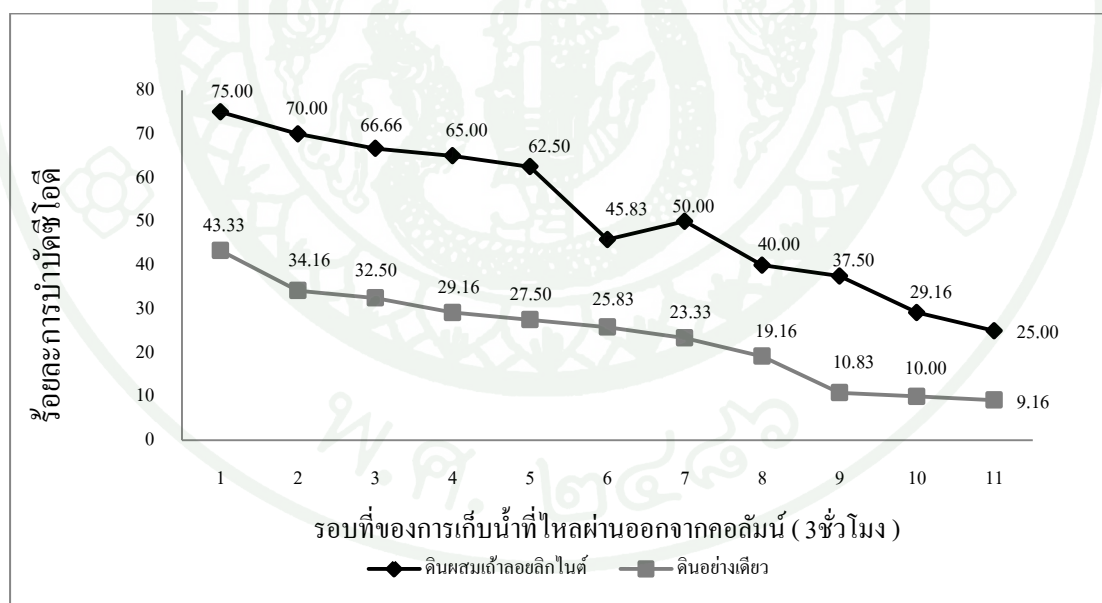


(ข.)

ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดน้ำไอดี (ข.) ของระบบบำบัดแบบไหลต่อเนื่องของการทดลองชุดควบคุมดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์

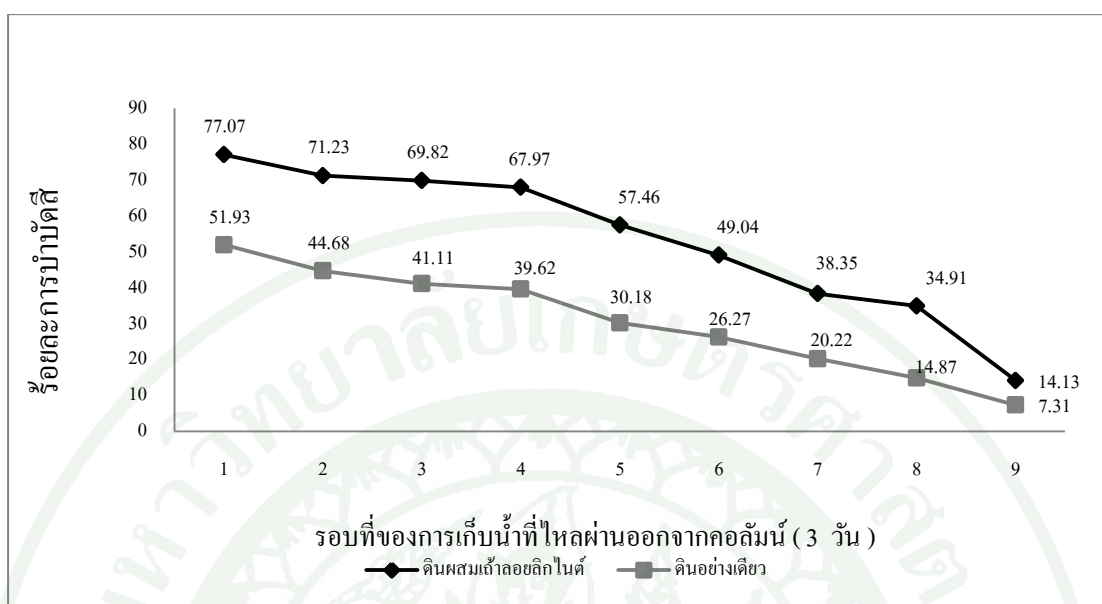


(ก.)

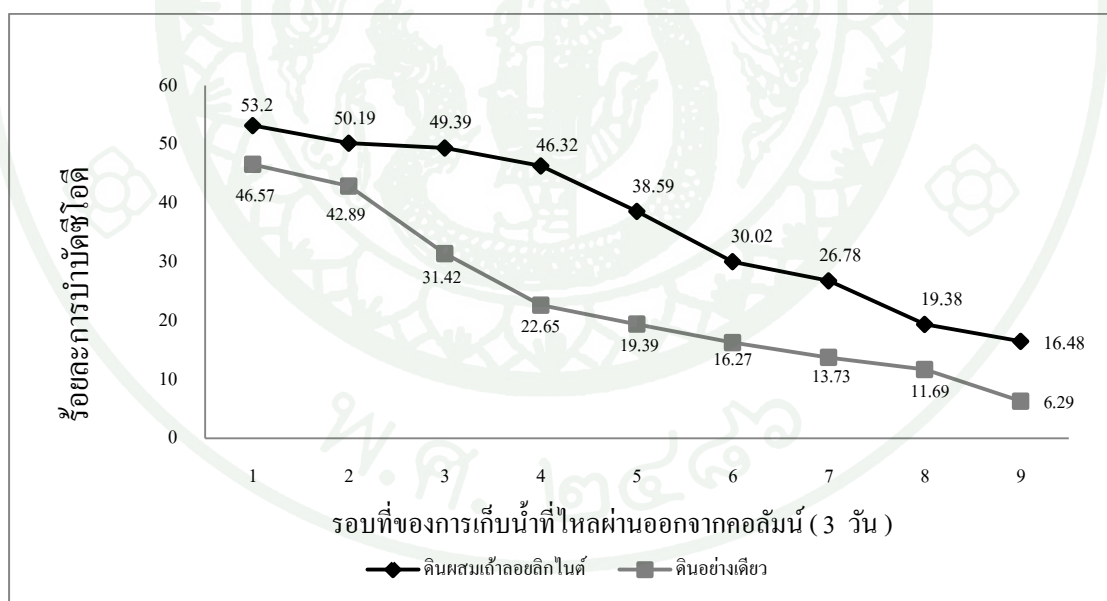


(ข.)

ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดน้ำของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดน้ำซีโอดี (ข.) ของระบบบำบัดแบบแซ่งน้ำเสีย แบบ 3 ชั่วโมงของการทดลองชุดควบคุม ดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์



(ก.)

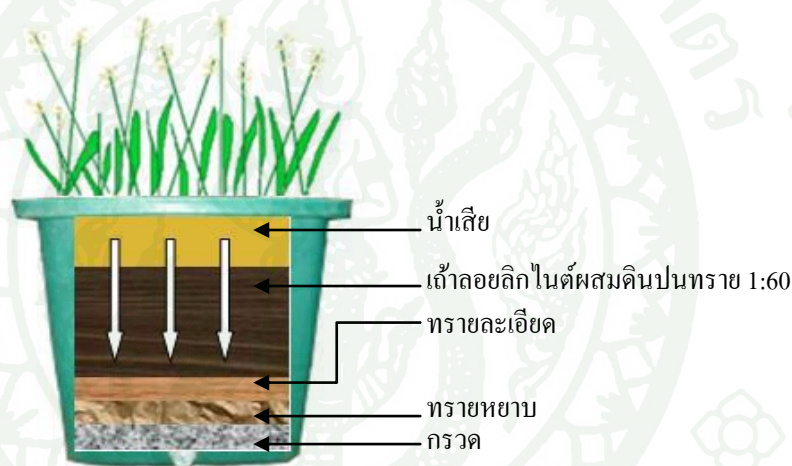


(ข.)

ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบร้อยละการบำบัดน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดชีโอดี (ข.) ของระบบบำบัดแบบแซ้งน้ำเสีย แบบ 3 วัน และปล่อยแห้ง 2 วันของการทดลอง ชุดควบคุมดินอย่างเดียวกับดินที่มีการผสมเถ้าลอยลิกไนต์

6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยวิธีการบำบัดแบบธรรมชาติใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน

จากการทดลองข้อที่ 7.1 เป็นการจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติ ในกระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51x51x54 เซนติเมตร ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก โดย บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 3 เซนติเมตร ทราวยละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินที่อัตราส่วน 1:60 ความสูง 30 เซนติเมตร ร่วมกับการปลูกพืช คือ หญ้าแฝก และ กล้วยน้ำว้า ดังภาพ 47 โดยทำการบำบัดแบบแช่ขัง 3 ชั่วโมง ได้ผล ดังนี้



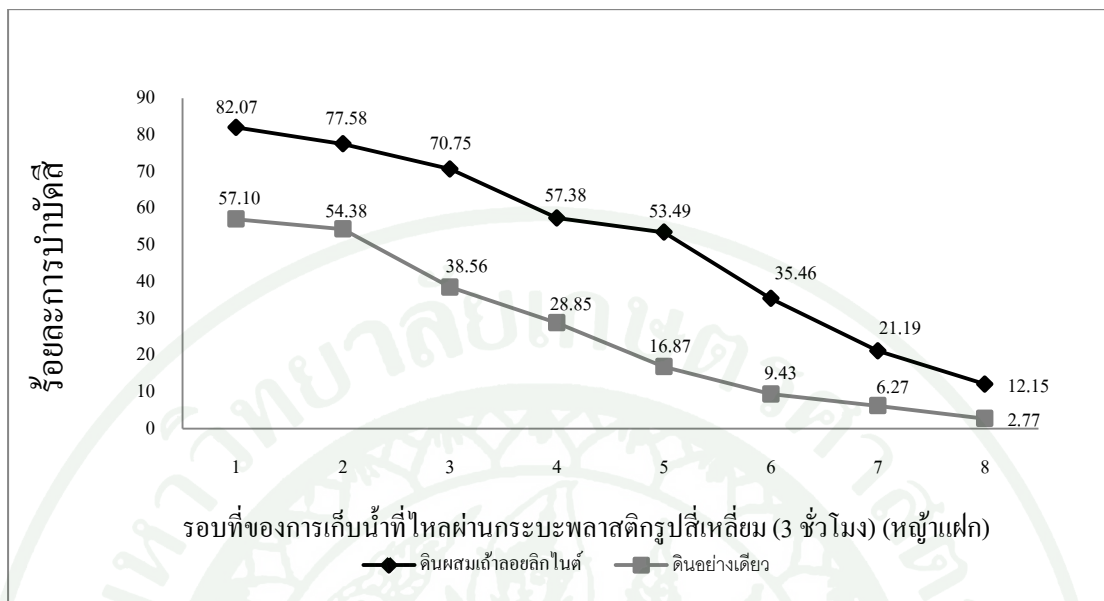
ภาพที่ 47 กระบะเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ การบรรจุชั้นวัสดุปลูก

จากการทดลองข้อที่ 7.1 จำลองการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยปลูกต้นหญ้าแฝกและกล้วยน้ำว้าดังภาพที่ 47 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบะที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการปลูกพืช กับกระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว พบว่า กระบะผสมถ้ำลอยลิกไนต์ที่มีการปลูกหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีได้ร้อยละ 82.07 และ 84.61 ตามลำดับ ดังภาพที่ 48 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีได้มากกว่ากระบะที่ใช้ดินปลูกอย่างเดียวประมาณ 25% และ 37% ตามลำดับ และกระบะผสมถ้ำลอยลิกไนต์ที่มีการปลูกกล้วยน้ำว้ามีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีได้ร้อยละ 64.53 และ 53.84 ตามลำดับ ดังภาพที่ 49 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีได้มากกว่ากระบะที่ใช้

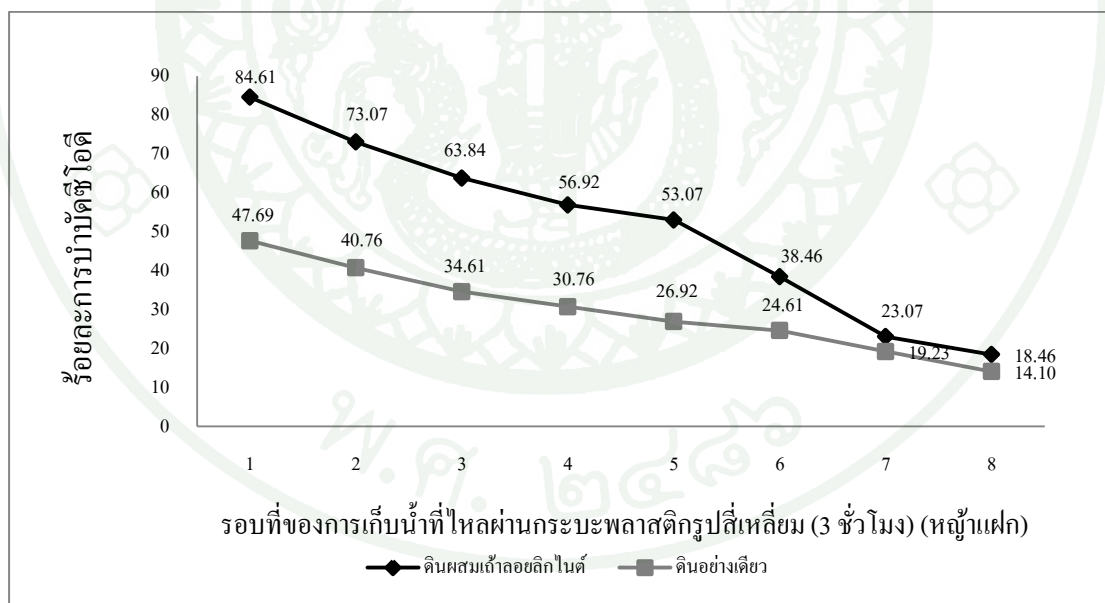
ดินปลูกอย่างเดียวกว่าประมาณ 8% และ 7% ตามลำดับ เนื่องจากถ้ำลอยลึกในดินมีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆที่มาจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษได้ดี เมื่อนำมาผสมดินปลูกร่วมกับพีช ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอไซด์ของระบบแข่งขันน้ำเสีย ซึ่งหญ้าแฝกให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีกว่ารูปถาญี และเมื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเสียเบื้องต้นก่อนการบำบัดกับน้ำเสียหลังการบำบัดแล้ว พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพน้ำที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะสีของน้ำที่ลดลงได้มาก ค่าสีของน้ำหลังการบำบัดเท่ากับ 20-27 Pt-Co Unit และซีโอไซด์ที่ลดลงจนมีค่าอยู่ประมาณ 480 – 1,440 mg/L ซึ่งถึงแม้ว่าสีของน้ำและซีโอไซด์หลังการบำบัดนั้นจะยังมีเกณฑ์ที่ยังไม่ผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้นก่อนการบำบัดแล้ว ถือได้ว่าระบบบำบัดแบบธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีพอสมควร ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษนั้นจะมีค่าความสกปรกสูง ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงควรมีหลายขั้นตอน กว่าจะได้ น้ำที่มีค่าความสกปรกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่หน่วยงานราชการกำหนด ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 คุณภาพน้ำเสียจากบ่อปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ หลังการบำบัดแบบธรรมชาติ

พารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรมและ นิคมอุตสาหกรรม	ค่าวิเคราะห์ น้ำเสียเริ่มต้น	ค่าวิเคราะห์น้ำเสียหลังผ่าน การบำบัดแบบธรรมชาติ	
			หญ้าแฝก	รูปถาญี
พีเอช	5.5-9.0	7.3	7.5	7.5
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	-	2,050	6,400	7,800
TDS (mg/L)	ไม่เกิน 3,000	1,309	6,100	6,700
ความเค็ม (ppt.)	-	0.9	2.90	3.70
ความขุ่น (NTU)	-	8.9	3.4	4.1
ซีโอไซด์ (mg/L)	ไม่เกิน 120	3,120	480	1,440
บีโอไซด์ (mg/L)	ไม่เกิน 20	1,188	140	160
สี (PtCo Unit)	ไม่เกิน 5-15	112	20	27

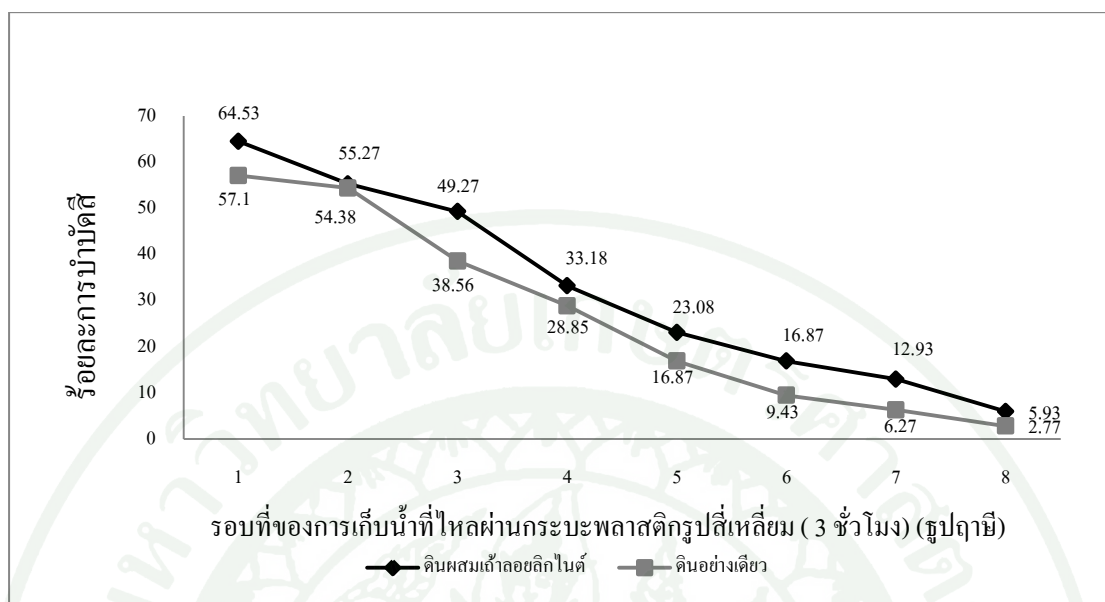


(ก.)

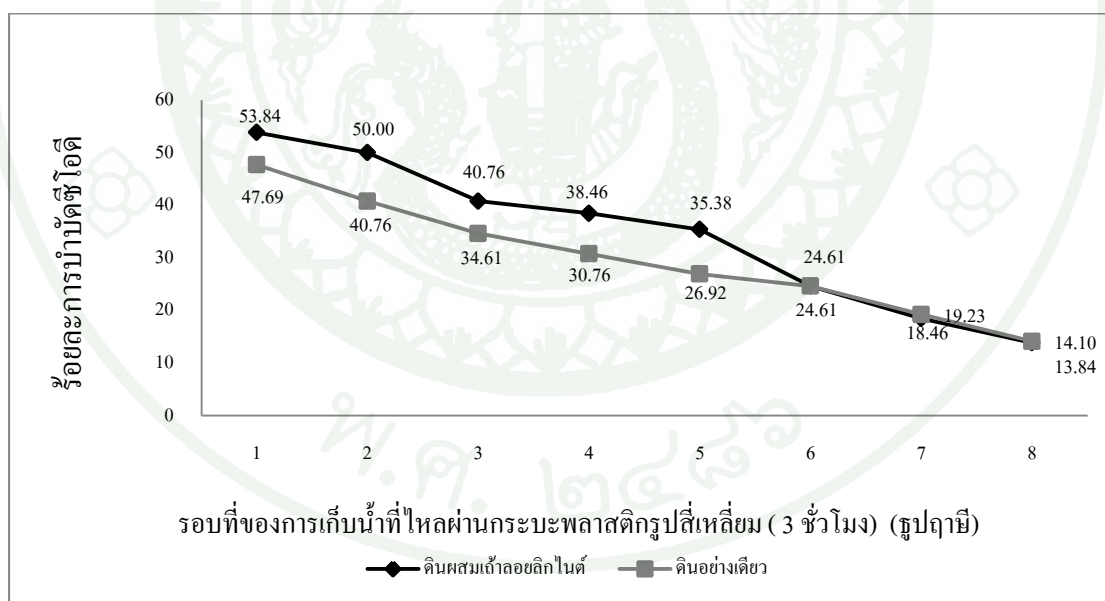


(ข.)

ภาพที่ 48 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดน้ำของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดน้ำ (ข.) ของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ระหว่างกระเบที่ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช(หญ้าแฝก)กับกระเบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 49 เปรียบเทียบร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และร้อยละการบำบัดสีโอดี (ข.) ของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ระหว่างกระเบที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินปลูกพืช (รูปถ่าย) กับกระเบที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียว

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากบ่อบำบัดปรับสภาพเริ่มต้นของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ ด้วยการดูดซับของถ่านลอยลิกไนต์ ร่วมกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดลองแบบเบตซ์ ส่วนที่ 2 การทดลองแบบไหลต่อเนื่องและส่วนที่ 3 การทดลองจำลองระบบบำบัดแบบอาศัยธรรมชาติ ได้ผลดังนี้

จากการทดลองแบบเบตซ์พบว่า ถ่านลอยลิกไนต์ 14 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร สามารถบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี ได้ร้อยละ 91.00 และ 39.39 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 ชั่วโมง สามารถบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี ได้ร้อยละ 21.79 และร้อยละ 57.10 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 3 วัน สามารถบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี ได้ร้อยละ 50.26 และ 85.71 ตามลำดับ กลไกการดูดซับของถ่านลอยลิกไนต์ สอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดลิช และอัตราส่วนของถ่านลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม คือ 1:60 สามารถบำบัดค่าสีของน้ำและซีโอดีได้ ร้อยละ 58.82 และ 47.61 ตามลำดับ ผลการทดลองแบบไหลต่อเนื่องทั้งสองระบบประสิทธิภาพใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 72.58 และ 75.00 ตามลำดับ และการทดลองการบำบัดแบบประยุกต์ สำหรับใช้งานจริงโดยใช้การจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืชสองชนิด คือ กล้วย และ หนุ่ยแฝก พบว่าในส่วนของกล้วย ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี ประมาณร้อยละ 64.53 และ 53.84 ตามลำดับ และหนุ่ยแฝกให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีประมาณร้อยละ 82.07 และ 84.61 ตามลำดับ สำหรับกระบะที่มีการใช้ดินเพียงอย่างเดียว สามารถบำบัดค่าสีของน้ำและ ซีโอดีได้ร้อยละ 57.10 และ 47.69 ตามลำดับ ซึ่งกระบะที่ผสมถ่านลอยลิกไนต์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีมากกว่า กระบะที่ใช้ดินปลูกเพียงอย่างเดียวประมาณร้อยละ 8-25 และ 7-35 ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของกระบะที่ปลูกหนุ่ยแฝกและกล้วย พบว่า หนุ่ยแฝกสามารถบำบัดค่าสีของน้ำ และซีโอดีได้มากกว่า กล้วย

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าถ่านลอยลิกไนต์มีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษ

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการนำไปปรับใช้กับน้ำเสียประเภทอื่นที่มีความแตกต่างกัน
2. ศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนเพื่อลดต้นทุนและภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการระบบบำบัดน้ำเสียในภาคอุตสาหกรรม
3. ศึกษาผลกระทบจากเฝ้าลดยลิกไนต์ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีผลต่อระบบนิเวศน์
4. ศึกษาหลักการและวิธีการกำจัดมลสารออกจากชั้นวัสดุปลูกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2547. รายงานสรุปผลการดำเนินงานการปลูกหญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำฟื้นฟูทรัพยากรดินและสภาพแวดล้อม. ม.ป.ท.

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

การประปาส่วนภูมิภาค. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค. แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/document/spec.html>, 9 พฤษภาคม 2557.

กลุ่มงานบริการส่งออก 4 สำนักบริการส่งออก. 2545. ภาวะอุตสาหกรรมกระดาษ. แหล่งที่มา: <http://www.depthai.go.th>, สำนักบริการส่งออก, 10 กันยายน 2557.

กลุ่มวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกในการจัดการดิน สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2546. คู่มือเจ้าหน้าที่รัฐ เรื่อง การใช้หญ้าแฝกเพื่อการพัฒนาที่ดิน. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

เด่นพงษ์ โพธิ์สวัสดิ์ และ กฤติยา เลิศโกยะสมบัติ. 2551. การศึกษาการลดสีน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยเถ้าหนักและเถ้าลอยโดยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ต่อพงษ์ กริชาชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคติเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนีย์ อัดตานันท์. 2543. ดินที่ใช้ปลูกข้าว. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ. 2554. ผลกระทบความละเอียดถี่ถ้วนหินต่อปฏิกิริยาปอโซลานในเพลสต์.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 9(1): 40-48.

นนทพงษ์ ภาณุคุณกิตติ. 2548. การลดสีน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการ

ไอโซเนนชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และคณิดา ตังคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี.

พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 2556.

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด. 2556. ข้อมูลน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย. แหล่งที่มา:

<http://www.siamkraft.com/>, 6 พฤษภาคม 2557.

บริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน). 2555. ข้อมูลปริมาณการใช้ถ่านล้อยลิกไนต์. แหล่งที่มา:

http://www.scg.co.th/pdf/th/05sustainability_development/energy-and-climate-change.pdf, 6 พฤษภาคม 2557.

ปัญญา เอี่ยมอ่อน และ สมโสทธิ์ ดำเนินงาน. 2542. การทดสอบสายพันธุ์และการจัดการดินเพื่อ

ปลูกหญ้าแฝกในพื้นที่ดินพรุ, น. 59-60. ใน รายงานการสัมมนา เรื่อง การพัฒนาและ

รณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษ
เพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. ถ่านล้อยในงานคอนกรีต. สมาคมคอนกรีตไทย, กรุงเทพฯ.

ปิยะนันท์ สุวรรณเมณะ. 2539. ถูทางและโอกาสการส่งออกและผลกระทบจากการมีเขตการค้า

อาเซียน (สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ). สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย,
กรุงเทพฯ.

พรพิมล ห่อสุวรรณชัย. 2542. การบำบัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียชุมชนโดยวิธีหญ้ากรอง.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัฒน์ จันทร์โรทัย. 2536. ข้อพิจารณาในการใช้พืชปรับปรุงคุณภาพน้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์ ม.ก. 11 (3): 154-157.

เพชร พลอยเจริญ. 2545. การเจริญเติบโตของหญ้าแฝกที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลต่างๆ บริเวณลุ่มน้ำวัง อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย. วารสารวิชาการป่าไม้. 1(4): 12-20

ไพบุลย์ ประพุดิธรรม. 2528. เหมืองดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มงคล ดำรงศรี และ ต่อพงศ์ กริธาชาติ. 2544. การลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษโดยกระบวนการดูดซับด้วยแอกติเวตเต็ดคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนตรี เดชาสกุลสม, ปัญญา ชูพานิช, อรรถสิทธิ์ สวัสดิ์พานิช และ พลเทพ เลิศรวนิช. 2549. การศึกษาการทดลองประสิทธิภาพในการป้องกันการชะล้างและการพังทลายของหญ้าแฝกจากโมเดลจำลอง, น. 13-19. ใน รายงานฉบับที่ วพ. 226 สำนักวิจัยและพัฒนางานทางกรรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

วรวิทย์ มัชฌันต์, โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์ และ โจเซฟ เคนารี. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพบล็อคดีนดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. แหล่งที่มา: http://rid.ku.ac.th/kasetresearch54/groupEconomic/43-Worawut_mat/template.html, 20 พฤษภาคม 2557.

วิจิตอจันรา สรรพกิจจานง. 2536. รายงานศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรรมทางหลวงฉบับที่ วพ. 131 เฝ้าลออยในงานทาง. 33 หน้า.

วิศิษฐ์ โชติกุล. นิลประไพ จันทนภาพ และ ประพิศ แสงทอง. 2524. ผลของการขังน้ำที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน. วารสารดินและปุ๋ย. 3 (2): 22-32.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2542. พรรณไม้ในในประเทศไทย. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

สุชาดา ศรีเพ็ญ และคณะ. 2537. การคัดเลือกพืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธี **grass filtration**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สันติภาพ ปัญจพรรค, วินิจ พัวพันธ์ และ กัลยา คำรงสัจศิริ. 2542. การใช้แฟกเพื่อการปรับปรุงดินเค็มและดินทรายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, น 55-56. ใน รายงานผลการสัมมนา เรื่อง การพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ครั้งที่ 3. สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ, กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ [กปร.]. 2549. **สารบัญญักรื่องหญ้าแฝก โครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ**. พิมพ์ครั้งที่ 5. ห้างหุ้นส่วนจำกัด อรุณการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. **คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานเลขาธิการโครงการฉลากเขียว สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2555. **ข้อกำหนดฉลากเขียวผลิตภัณฑ์วัสดุตกแต่งผนังภายใน**. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5. 2546. **ระบบนิเวศเกษตรเขตภาคกลางและภาคตะวันตก**. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

อรทัย เชื้อวงษ์. 2550. การศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรีด้วย **พืชรักษา 3 พันธุ์ในระบบดินน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อนุสรณ์ บุญปก. 2546. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยกระบวนการดูดติดผิวด้วยดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อำไพ ขงบุญเกิด. 2513. บัว. อนุสรณ์นางปทุม เดชะกัมพูช. อักษรเจริญทัศน์ ม กรุงเทพฯ.

อำไพวรรณ พุกประเสริฐ. 2550. การบำบัดและใช้ประโยชน์น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษโดยดินที่มีการปลูกพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

APHA, AWWA and WEF. 1995. **Standard Method for the Examination of Water and Wastewater**. 19th ed. American Public Health Association, Washington D.C.

Boyd, C.E. 1970. Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Waters. **Econ. Bot.** 2444: 94-103

Buckley, C.A. 1992. Membrane technology for the treatment of Dyehouse effluent. **Wat Sci. Tech.** 25 (9): 203-209.

Dudai, N., E. Putievsky, D. Chaimovitch and M. Ben-Hur. 2006. Growth management of vetiver (*Vetiveria zizanioides*) under Mediterranean condition. **Environmental Management** 81: 63-71.

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

Faust, S. D. and O. M. Aly 1987. **Adsorption Process for Water Treatment**. Butterworths, Boston. MA.

Ghash, M. M., F.E. Woodard, O.J. Sproul, P.B. Knowlton and F.D. Gverton. 1987. Treatability studies and design considerations for textile wastewater. **Water and Waste Eng.** 1 (4): 35-41.

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

- Kaigate B. 1981. **Heavy Metal Removal from Secondary Domestic Effluent by Vascular Aquatic**. M.P.H. Thesis, Tu lane University.
- Nabel, C., R.D. Gottchling and H.J. O Neil. 1974. **Ozone Decolorization of Pulp and Paper Secondary Effluents**. Welsbach Ozone Syst., Philadelphia.
- Nelson, L.N. and A. Dasgupta. 1991. **Industrial and Hazadous Waste Treatment of Ground and Surface Water**. Marcel Dekker, New York.
- Makris, K.C., M.S. Kabindra, D. Datta, D. Sarkar and D. Pachanoor. 2007. Chemically catalyzed uptake of 2,4,6-trinitrotoluene by *Vetiveria zizanioides*. **Environmental Pollution**. 148: 101-106.
- McCreary, J.J. and V.L.Snoeyink. 1980. Charaterization and Activated Cabon Adsorption of Several Humic Substances. **Wat. Res.** 14 (2): 157-160.
- Ponnamperuma, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. **Adv. In Agron.** 24: 29-96.
- Ponnamperuma, F.N. 1976. **Physicochemical properties of submerge soils in relation to fertility**, pp. 1-27. In The Fertility of paddy Soils in Fertilizer Application for Rice. Food and Fertilizer Technology.
- Simon, J. and J. Bruce. 2003 **Membranes for industrial wastewater recovery and re-use**. Elsevier Science Inc, USA.
- Singh, S., J.S. Melo, S. Eapen and S.F. D'Soiza. 2008. Potential of vetiver (*vetiveria zizanioides* L. Nash) for phytoremediation of phenol. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 71: 671-676.

Suttipong V. 1980. **Removal of Heavy metal by water hyacinth**. M.S. Thesis, Asian institute of technology (AIT).

Thompson, G. and C. Forster. 2003. Bulking in active sludge plants treating paper mill Wastewater. **Water Research**. 37: 2636-2644.

Tridech S., A.J. Englands., Jr., M.J. Hebert., R.F. Wilkinson. 1981. **Tertiary wastewater treatment by the application of vascular aquatic Chemistry in water reuse**. Ann Arbor Science Publisher Inc, USA.

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

Wilde, E.w., R.L. Brigmon, D.L. Dunn, M.A. Heitkamp and D.C. Dagnan. 2005. Phytoremediation of Lead from firing range soil by Vetiver grass. **Chemosphere** 61: 1451-1457.



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับปริมาณแกลลอลิกไนต์ที่เหมาะสม

ปริมาณแกลลอลิกไนต์ (กรัม)	ร้อยละของการบำบัด
1	87.59
2	87.90
3	88.12
4	88.57
5	88.48
6	89.00
7	89.76
8	89.65
9	89.99
10	89.23
11	89.51
12	90.66
13	90.83
14	91.00
15	90.50
16	90.72
17	89.66

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

ปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ (กรัม)	ร้อยละของการบำบัด
1	9.09
2	6.06
3	3.03
4	12.12
5	12.12
6	15.15
7	12.12
8	9.09
9	9.09
10	9.09
11	6.06
12	15.15
13	24.24
14	39.39
15	6.06
16	6.06
17	3.03

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
1	11.51
2	12.20
3	21.79
4	19.84
5	18.72
6	14.12
7	13.43
8	11.81

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัด
1	32.74
2	42.85
3	57.10
4	42.85
5	42.75
6	32.29
7	29.85
8	15.68

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	49.88
2	49.96
3	50.26
4	49.65
5	48.58

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	71.42
2	42.85
3	85.71
4	65.71
5	57.14

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆกัน

อัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ : ดิน	ร้อยละการบำบัด
1:10	28.80
1:20	49.21
1:30	36.42
1:40	47.82
1:50	40.32
1:60	58.82
1:70	57.59
1:80	56.89
1:90	49.90
1:100	44.92
1:110	44.23
1:120	42.91

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของถ้ำลอยลิกไนต์ในอัตราส่วน
ต่างๆ กัน

อัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ : ดิน	ร้อยละการบำบัด
1:10	4.76
1:20	9.52
1:30	14.28
1:40	19.04
1:50	23.80
1:60	47.61
1:70	42.85
1:80	33.33
1:90	28.57
1:100	14.28
1:110	4.76
1:120	4.76

ตารางผนวกที่ 9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับของถ้ำลอยลึกไนต์

ปริมาณถ้ำ									
ลอย(กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	Log q	Log C	Abs
1	30	17.41	0.05	0.629	1.589	0.057	-0.201	1.240	0.126
2	30	14.29	0.05	0.392	2.551	0.006	-0.406	1.155	0.111
3	30	9.70	0.05	0.338	2.958	0.103	-0.471	0.986	0.089
4	30	7.83	0.05	0.277	3.610	0.127	-0.557	0.893	0.080
5	30	4.50	0.05	0.255	3.921	0.222	-0.593	0.653	0.064

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 15 นาที

ระยะเวลาสัมผัส (15 นาที)	ร้อยละการบำบัด
1	47.20
2	45.78
3	43.61
4	40.59
5	39.21
6	34.11
7	31.89
8	28.29
9	27.67
10	24.08
11	20.22
12	19.54

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 15 นาที

ระยะเวลาสัมผัส (15 นาที)	ร้อยละการบำบัด
1	45.45
2	31.81
3	30.00
4	29.09
5	22.72
6	20.00
7	18.18
8	16.36
9	13.63
10	11.81
11	9.09
12	4.54

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (3 ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	72.58
2	65.82
3	61.46
4	48.74
5	41.12
6	38.35
7	34.91
8	31.89
9	23.29
10	15.24
11	13.82
12	8.11
13	2.70

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (3 ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	75.00
2	70.00
3	66.66
4	65.00
5	62.50
6	45.83
7	50.00
8	40.00
9	37.50
10	29.16
11	25.00
12	16.6
13	8.30

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน

ระยะเวลาสัมผัส (3 วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	77.07
2	71.23
3	69.82
4	67.97
5	57.46
6	49.04
7	38.35
8	34.91
9	14.13

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีซีไอดี กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ทุก 3 วัน

ระยะเวลาสัมผัส (3 วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	53.20
2	50.19
3	49.39
4	46.32
5	38.59
6	30.02
7	26.78
8	19.38
9	16.48

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว)
กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที

ระยะเวลาสัมผัส (15 นาที)	ร้อยละการบำบัด
1	39.58
2	38.58
3	35.26
4	32.84
5	30.18
6	28.45
7	23.29
8	22.80
9	21.02
10	20.22
11	16.47
12	7.37

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว)
กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 15 นาที

ระยะเวลาสัมผัส (15 นาที)	ร้อยละการบำบัด
1	34.54
2	31.81
3	30.00
4	29.09
5	22.72
6	20.00
7	18.18
8	14.81
9	12.81
10	9.36
11	5.64
12	1.81

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว)
กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (3 ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	45.11
2	41.54
3	39.21
4	34.72
5	32.75
6	31.8
7	23.00
8	21.26
9	14.07
10	17.51
11	2.15

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว)
กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัส (3 ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	43.33
2	34.16
3	32.50
4	29.16
5	27.5
6	25.83
7	23.33
8	19.16
9	10.83
10	10.00
11	9.16

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 วัน

ระยะเวลาสัมผัส (3 วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	51.93
2	44.68
3	41.11
4	39.62
5	30.18
6	26.27
7	20.22
8	14.87
9	7.31

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี ของชุดควบคุม (ดินอย่างเดียว) กับรอบที่ของการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 3 วัน

ระยะเวลาสัมผัส (3 วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	46.57
2	42.89
3	31.42
4	22.65
5	19.39
6	16.27
7	13.73
8	11.69
9	6.29

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์
ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ช.ม.)	ร้อยละการบำบัด
1	82.07
2	77.58
3	70.75
4	57.38
5	53.49
6	35.46
7	21.19
8	12.15

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	84.61
2	73.07
3	63.84
4	56.92
5	53.07
6	38.46
7	23.07
8	18.46

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์
ร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ช.ม.)	ร้อยละการบำบัด
1	64.53
2	55.27
3	49.27
4	33.18
5	23.08
6	16.87
7	12.93
8	5.93

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินผสมเถ้าลอยลิกไนต์ร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) กับรอบที่ของการเก็บน้ำระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ช.ม.)	ร้อยละการบำบัด
1	53.84
2	50.00
3	40.76
4	38.46
5	35.38
6	24.61
7	18.46
8	13.84

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับดินการใช้ดินอย่างเดียว
รวมกับการปลูกพืช (หญ้าแฝก)กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ชม.)	ร้อยละการบำบัด
1	57.10
2	54.38
3	38.56
4	28.85
5	16.87
6	9.43
7	6.27
8	2.77

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับดินการใช้ดินอย่างเดียวรวมกับ
การปลูกพืช (หญ้าแฝก)กับรอบที่ของการเก็บน้ำ ระยะเวลาทุก 3 ชั่วโมง

ระยะเวลาสัมผัสต่อรอบ (รอบละ 3 ชม.)	ร้อยละการบำบัด
1	47.69
2	40.76
3	34.61
4	30.76
5	26.92
6	24.61
7	19.23
8	14.10

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวเบญจพรรณ อินแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	30 มิถุนายน 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดสุโขทัย
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต(ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยนเรศวร
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-