



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้ประโยชน์เถ้าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดขั้นตติยมิกของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

The Utilization of Fly Ash and Constructed Wetland for Tertiary Treatment of Effluent Pulp and Paper Industrial Wastewater Treatment Plant

นามผู้วิจัย นางสาวมินา เฟื่องแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภรณ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณาภรณ์, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

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

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

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

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้ประโยชน์เถ้าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดขั้นตติยภูมิ
ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

The Utilization of Fly Ash and Constructed Wetland for Tertiary Treatment
of Effluent from Pulp and Paper Industrial Wastewater Treatment Plant

โดย

นางสาวมินา เฟื่องแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2558

มีนา เฟื่องแก้ว 2558: การใช้ประโยชน์เถ้าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดขั้นตติยภูมิของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ ปรินญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์, Ph.D. 97 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง ผลที่ได้นำไปพัฒนา ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมในขั้นตติยภูมิ โดยการใช้ เถ้าลอยเป็นตัวดูดซับ เถ้าลอยเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ 90% และ ชีวมวล 10% ในกระบวนการผลิตเชื้อและกระดาษ จากผลการทดลองแบบแบดซ์พบว่า เถ้าลอย 8 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และที่ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการ บำบัดสี (71.78%) และซีโอดี (67.20%) ได้มากที่สุด อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยกับดินที่ให้ ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ดีที่สุดคือ 1:40 นอกจากนี้รูปแบบการดูดซับของเถ้าลอยสอดคล้องกับ สมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ในคอลัมน์แก้วขนาด (เส้น ผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 30 ซม.) บรรจุชั้นกรวด 9.6 ซม. ทราฮายา 4.2 ซม. ทราฮะเลียด 2.8 ซม. และเถ้าลอยผสมดิน (1:40) 16.5 ซม. โดยเรียงลำดับชั้นจากล่างถึงชั้นบน พบว่าการแช่ขัง น้ำเสียที่ 3 ชั่วโมงให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี (90.74% และ 100.00%) ดีกว่าการขัง น้ำเสียไว้เป็นเวลา 4 วันปล่อยแห้ง 3 วัน (71.29% และ 75.00%) และแบบปล่อยไหลต่อเนื่อง (61.75% และ 64.28%) นอกจากนี้ทำการทดลองเลียนแบบระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ในถัง พลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51x51x54 ซม. ซึ่งบรรจุชั้นวัสดุปลูกเช่นเดียวกับการทดลองแบบ คอลัมน์ ปลูกหญ้าแฝกและรูปถาญี และขังน้ำเสียเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ากระบะที่ผสมเถ้าลอย กับดิน (1:40) ร่วมกับการปลูกรูปถาญีให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี (88.44% และ 100.00%) ได้ดีกว่ากระบะที่ปลูกหญ้าแฝก และกระบะควบคุม(ใช้ดินอย่างเดียว) การบำบัดนี้ สามารถลดซีโอดีได้เหลือ 0.00 มก/ล. และลดค่าสีของน้ำเหลือ 1.37 Pt-Co unit ดังนั้นสามารถนำ ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่พัฒนาโดยใช้เถ้าลอยเป็นการบำบัดขั้นตติยภูมิของน้ำทิ้งจาก อุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษได้

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Meena Fuangkaeow 2015: The Utilization of Fly Ash and Constructed Wetland for Tertiary Treatment of Effluent from Pulp and Paper Industrial Wastewater Treatment Plant. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 97 pages.

This research was to study the treatment efficiency of color and COD from activated sludge treated pulp and paper industrial wastewater. The results were used to develop the constructed wetland for using as tertiary treatment of industrial wastewater by fly ash as adsorbent. Fly ash is generated as a residue of lignite coal 90% and biomass 10% in combustion process for pulp and paper production. The batch experiments were carried out and found that fly ash 8 g. per 50 mL. of wastewater and 3 hr. of contact time that gave maximum treatment percentage of color (71.78%) and COD (67.20%) . The ratio by weight of fly ash to soil at 1:40 was the best efficiency Also, adsorption model of fly ash was conformed to Freundlich isotherm. The experiments were also carried out on a continuous basis in a glass column (5 cm. i.d. x 30 cm.L.) and packed with gravel 9.6 cm., coarse sand 4.2 cm., sand 2.8 cm. and mixed fly ash and soil (1:40) 16.5 cm. from the bottom to the top. The 3-hr. duration of wastewater in column gave a better results (90.74% and 100.00%) than the 4-days duration and 3-days releasing (75.00% and 71.29%) and the continuous flow (61.75% and 64.28%). Furthermore, the constructed wetland was simulated in square plastic tank with size 51x51x54 cm. which containing the growing material as the column experiment with growing *Vetiveria zizanioides* and *Typha angustifolia* L. and treated by 3-hr. duration. The results revealed that the treatment unit which using mixed fly ash and soil (1:40) and growing *Typha angustifolia* L. gave the higher treatment efficiency of color (88.44%) and COD (100.00%) than the treatment unit which growing *Vetiveria zizanioides* and control unit (using only soil). This treatment could be reduced the COD value to 0.00 mg/L and the color of water to 1.37 Pt-Co unit. Therefore, the developed constructed wetland with fly ash can be used as tertiary treatment of effluent from pulp and paper industrial.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณาภิรักษ์ ที่ให้
ความรู้ คำปรึกษา แนะนำและสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไป
ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณะอาจารย์คณะสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ
คำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ขอบพระคุณ
คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย
ครั้งนี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท คณะสิ่งแวดล้อม รุ่น 36 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้ง
กำลังกายและกำลังใจตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณ โชติวรรณ เสียงประเสริฐกิจ หัวหน้าแผนกสิ่งแวดล้อม และ
คุณผดิลกคุณันท์ นวลวัฒน์ วิศวกรสิ่งแวดล้อม รวมถึงเจ้าหน้าที่ของบริษัทสยามกราฟท์อุตสาหกรรม
จำกัด ที่มีความอนุเคราะห์และช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างน้ำและเถ้าลอย พร้อมทั้งให้ข้อมูลเพื่อใช้
ในงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวเพ็ญแก้ว ที่คอยเป็นกำลังใจ
ในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้อบรม สั่งสอนและคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษา
จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มีนา เพ็ญแก้ว
กุมภาพันธ์ 2558

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	46
อุปกรณ์	46
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	85
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ขั้นตอนการฟอกเยื่อและสารเคมีที่ใช้	6
2	คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ	57
3	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งและหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ ที่ใช้ถ้ำลอยผสมกับดินร่วมกับการปลูกหญ้าแฝกและรูปถ้ำ	78
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณถ้ำลอย	86
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับปริมาณถ้ำลอย	86
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	87
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	87
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับระยะเวลาสัมผัส (วัน)	87
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับระยะเวลาสัมผัส (วัน)	88
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับปริมาณดิน	88
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับปริมาณดิน	88
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยต่อดิน	89
10	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยต่อดิน	89
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ้ำลอย	90
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่าน กับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	91
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วันปล่อยแห้ง 3วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	91
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วันปล่อยแห้ง 3วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	92
16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมง กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	92
17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีกับของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมง กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	93
18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบ บึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกรูปฤาษี	93
19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัด แบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกรูปฤาษี	94
20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบ บึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกหัวาแฝก	94
21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบ บึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกหัวาแฝก	95
22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบ บึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปควบคุม	95
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบ บึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปควบคุม	96

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การแบ่งประเภทของถ้ำลอย	10
2 รูปร่าง และลักษณะผิวของถ้ำลอย	10
3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Free Water Subface Wetland (FWS)	16
4 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Vegetated Submerged Bed System (VSB)	17
5 ลักษณะรากของหญ้าแฝก	18
6 ลักษณะลำต้นรูปฤาษี	19
7 รูปฤาษี <i>Typha angustifolia</i> Linn.	20
8 ลักษณะทางกายภาพของต้นรูปฤาษีที่ไม่ปรับสภาพ	20
9 ลักษณะทางกายภาพของต้นรูปฤาษีที่ปรับสภาพ	21
10 Effluent Treatment Plant ของอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษโรงงานบ้านโป่ง	22
11 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัทสยามคาร์ปท์อุตสาหกรรม จำกัด	23
12 ระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษของโรงงานบ้านโป่ง	25
13 แร่งคิ่งคูระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	27
14 แร่งคิ่งคูระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	28
15 แร่งคิ่งคูระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	28
16 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	30
17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	32
18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	35
19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	36
20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log c$	37
21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช	38
22 แบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	39
23 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับจนอิ่มตัว	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
24	ไอโซเทอร์มการดูดซับเชิงเส้นของแลงเมียร์	40
25	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	41
26	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	42
27	ลักษณะของกราฟเบรคทูรจ์ (Breakthrough Curve)	43
28	คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามเลียนแบบระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์	51
29	กระบวนบรรจุวัสดุเพาะปลูก	53
30	กระบวนปลูกธูปฤาษีและหญ้าแฝก	54
31	ลักษณะของถ้ำลอยที่เตรียมเป็นตัวดูดซับ	55
32	กราฟมาตรฐานสารละลายสีแพลดทินัม-โคบอลต์	56
33	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับปริมาณถ้ำลอย	58
34	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง (ก.) และระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน (ข.)	59
35	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับด้วยถ้ำลอย	60
36	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับด้วยถ้ำลอย	61
37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับปริมาณดิน	62
38	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยต่อดิน	63
39	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	64
40	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินเปรียบเทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว	65
41	กราฟเบรคทูรจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ที่เหลือ ของการทดลองด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์	67

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
42	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	68
43	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการ แช่ขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอย ผสมดินเปรียบเทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว	69
44	กราฟเบรคทรูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และ ซีโอดี (ข.) ที่เหลือ ของการทดลองด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วันกับ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์	70
45	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมงกับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน	71
46	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการ แช่ขัง 3 ชั่วโมงกับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินเปรียบ เทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว	72
47	กราฟเบรคทรูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และ ซีโอดี (ข.) ที่เหลือ ของการทดลองด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมง กับปริมาณน้ำที่ไหล ผ่านจากคอลัมน์	73
48	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการจำลอง ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบ ปลูกทุปถาญี	75
49	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการจำลอง ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบ ปลูกหญ้าแฝก	76
50	เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข) กับครั้งที่ปล่อยผ่านจากกระเบปลูกทุปถาญี หญ้าแฝก และกระเบควบคุม	77

การใช้ประโยชน์เถ้าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ สำหรับการบำบัดขั้นตติยภูมิ
ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

The Utilization of Fly Ash and Constructed Wetland for Tertiary Treatment
of Effluent from Pulp and Paper Industrial Wastewater Treatment Plant

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มีกำลังการผลิตมาก
ในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำปริมาณมาก จึงก่อให้เกิดปริมาณน้ำเสียจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งถูก
จัดเป็นอันดับห้าของอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุของมลภาวะทางน้ำ เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต
หลายขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการแช่และล้างชิ้นไม้สับ, การต้มเยื่อ, การฟอกเยื่อ และการย้อมสี
เป็นต้น ลักษณะของน้ำเสียจะมีสีน้ำตาลเข้มที่เกิดจากสีของสารลิกนินในเปลือกไม้ มีค่าบีโอดี
ซีโอดี พีเอช และของแข็งแขวนลอยรวมที่มีปริมาณสูง โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ
จึงได้มีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) สามารถบำบัดความ
สกปรกของน้ำเสียได้ แต่ยังไม่สามารถบำบัดสีของน้ำจนไม่เป็นที่พึงรังเกียจและซีโอดีให้ผ่าน
เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมกำหนดไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร ใน
ขณะเดียวกันอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ มีการใช้ถ่านหิน เช่น ถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหิน
บิทูมินัส รวมไปถึงชีวมวล ต่างๆ เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งก่อให้เกิดเถ้าลอย
ที่เป็นกากของเสียปริมาณมากในแต่ละปี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง
ด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติ
ผสมผสานกับการปลูกพืช เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการดูแลระบบต่ำ และดูแลรักษาง่าย โดยจะ
เพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดนี้ด้วยเถ้าลอยซึ่งได้จากการใช้ถ่านหินลิกไนต์ 90% และชีวมวล
10% เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต ซึ่งเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากโครงสร้าง
ที่ประกอบไปด้วยรูพรุนจำนวนมาก จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ผสม
เถ้าลอยในชั้นวัสดุปลูกและผสมกับการปลูกพืช คือ ฐูปถามิ และหญ้าแฝก จะช่วยบำบัดน้ำเสียที่

ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งถือเป็นวิธีการบำบัดในขั้นที่ 3 หรือขั้นตติยภูมิ หลังจากการบำบัดขั้นต้นและการบำบัดขั้นที่สอง ทั้งนี้เพื่อเป็นการนำกากของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้มากที่สุด และยังเป็นแนวทางที่ช่วยพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมได้



วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์มาเป็นระบบบำบัดขั้นตติยภูมิของการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
2. เพื่อนำเถ้าลอยซึ่งเป็นกากของเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ผสมกับชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย



การตรวจเอกสาร

1. อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ จัดเป็นอันดับสามรองจากอุตสาหกรรมคอกแต่งสำเร็จ โลหะและอุตสาหกรรมเคมี ด้านปริมาณการใช้ไฟฟ้า แต่ปัจจุบันและแนวโน้มในอนาคต คาดว่า อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษจะเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด นอกจากนี้อุตสาหกรรมกระดาษยังเป็นอันดับห้าของอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุของมลภาวะทางน้ำ

1.1 กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

กรรมวิธีการผลิตกระดาษในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและกระบวนการผลิตกระดาษ

1.1.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ

เพื่อเตรียมวัตถุดิบให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อ หลักการคือ การแยก สิ่งเจือปนออกและแปรรูปให้มีขนาดพอเหมาะ มีขั้นตอนคือ

ก. การลอกเปลือกไม้ การที่ต้องลอกเปลือกไม้ก่อนเนื่องจากในส่วนเปลือก นั้นมีปริมาณไฟเบอร์อยู่น้อยและมีสารต่างๆปนอยู่มากอันจะทำให้สีของกระดาษสกปรกได้ทำให้ สิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ต้มเพื่อแปรสภาพเป็นเยื่อ

ข. การสับชิ้นไม้ หลังจากลอกเปลือกไม้แล้วตัดให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้ น้ำยาแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ทั่วถึงตลอดเวลาที่ต้มเยื่อ

ค. การคัดขนาด ชิ้นไม้สับที่ได้ขนาดจะถูกแยกออกด้วยเครื่องคัดขนาดและ เอาส่วนที่เป็นผงหรือมีขนาดเล็กกว่าและขนาดโตกว่ามาตรฐานออก สำหรับชิ้นไม้ที่ได้ขนาดจะถูก ส่งไปยังหม้อต้มเยื่อต่อไป

1.1.2 กระบวนการผลิตเยื่อ

คือกระบวนการแยกเส้นใยที่เกาะติดกันอยู่ในเนื้อไม้หรือพีชออกจากกัน วัตถุประสงค์ของการผลิตเยื่อคือ การแยกสารลิกนินออกเพื่อให้ง่ายต่อการแยกเส้นใยการผลิตเยื่อมีหลายวิธี จะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับว่าเยื่อที่ผลิตได้นั้นจะนำไปใช้ผลิตกระดาษชนิดใดเป็นสำคัญ กระบวนการผลิตเยื่อแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. การผลิตเยื่อเชิงกล เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้พลังงานกลทำให้เส้นใยในเนื้อไม้แยกออกจากกัน เยื่อไม้บดที่ได้จะมีสมบัติคล้ายไม้และไม่ค่อยคืนกเนื่องจากไม่ใช่เส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้สูงสุด 90-95 เปอร์เซ็นต์ เพราะไม่มีการละลายองค์ประกอบทางเคมีออกไป เยื่อเชิงกลมีเนื้อค่อนข้างหยาบกระด้าง เส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่ไม่สมบูรณ์ มีการขาดและตัดเป็นท่อนๆ เยื่อที่ได้จะมีความทึบแสงสูง จึงนิยมใช้ทำกระดาษหนังสือพิมพ์

ข. การผลิตเยื่อกึ่งเคมี เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้พลังงานกล สารเคมี และพลังงานความร้อนร่วมกัน โดยที่สารเคมีและความร้อนช่วยให้ลิกนินในเนื้อไม้อ่อนตัวลงละลายออกบางส่วน แล้วนำไปบดให้เส้นใยแยกออกจากกัน เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า Semi-Chemical Pulp ผลผลิตเยื่อที่ได้ประมาณ 65-90 เปอร์เซ็นต์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีลิกนินปนอยู่ไม่มากเท่ากับเยื่อที่ได้จากกระบวนการเชิงกล

ค. การผลิตเยื่อเคมี เป็นกระบวนการผลิตเยื่อที่ใช้พลังงานความร้อนและสารเคมีทำให้ลิกนินที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยละลายออกเยื่อที่ได้มีปริมาณลิกนินเจือปนอยู่น้อยมากจึงเหมาะสำหรับทำกระดาษคุณภาพดีและมีความเหนียว แต่ปริมาณเยื่อที่ได้มีปริมาณน้อยคือประมาณ 45-60 เปอร์เซ็นต์กระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้แยกตามชนิดของสารเคมีที่ใช้คือ

1) กระบวนการซัลไฟต์ กระบวนการนี้เหมาะสำหรับทำไม้เนื้อแข็ง และพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า สารเคมีที่ใช้เป็นน้ำยาต้มย่อยเยื่อ คือ สารละลายแคลเซียมไบซัลไฟต์ ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$) สารละลายแมกนีเซียมไบซัลไฟต์ ($\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$) สารละลายแอมโมเนียมซัลไฟต์ (NH_4HSO_3)

2) กระบวนการต่าง กระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้ยังแยกออกเป็น 2 แบบ คือ กระบวนการโซดา สารเคมีที่ใช้ในการต้มย่อยเยื่อ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้กับไม้เบญจพรรณชนิดต่างๆ และ กระบวนการซัลเฟต หรือกระบวนการคราฟท์ ใช้ได้กับพันธุ์ไม้ทุกชนิด สารเคมีที่ใช้ต้มย่อยเยื่อ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซัลเฟต (Na₂S) เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีความแข็งแรงสูงคุณภาพดีกว่ากระบวนการโซดา (Bryce, 1980)

1.1.3 กระบวนการฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อทำหลังจากกระบวนการผลิตเยื่อจุดประสงค์หลักของการฟอกเยื่อ คือ เพื่อเพิ่มความขาวของเยื่อที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตกระดาษพิมพ์และเขียน และในการทำให้ขาวขึ้นต้องไม่ทำลายความแข็งแรงของเยื่อแบ่งเป็น 2 วิธีคือ วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออก และวิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี การทำให้เยื่อมีความขาวสว่างขึ้นนั้นทำโดยการแยกลิกนินออกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนิน ขั้นตอนในการฟอกเยื่อมีหลายวิธีเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอกและขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตามอักษรที่ใช้เรียกดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการฟอกเยื่อและสารเคมีที่ใช้

สารเคมี	สัญลักษณ์	เรียกชื่อขั้นตอนการฟอก
Chlorine	C	คลอรีเนชัน (Chlorination stage)
Sodium Hydroxide	E	ขั้นเอ็กแทรกชัน (Extraction stage)
Calcium Hypochlorite	H	ขั้นไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite stage)
Chlorine Dioxide	D	ขั้นคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorinedioxide stage)
Hydrogen peroxide	P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage)
Oxygen	O	ขั้นออกซิเจน (Oxygen stage)
Ozone	Z	ขั้นโอโซน (Ozone stage)
Acid	A	ขั้นแอคซิด (Acid stage)

ที่มา: สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม (2546)

1.1.4 การเตรียมน้ำเยื่อ

มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาศักยภาพของเส้นใยโดยนำเยื่อไปบด และปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังนี้

ก. การกระจายเส้นใย กระจายเยื่อเพื่อให้เส้นใยแยกเป็นอิสระในน้ำโดยเครื่องมือที่เรียกว่า ไฮดรอปัลเปอร์

ข. การบดเยื่อ เพื่อให้เส้นใยแตกแขนงเป็นการเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใยให้สูงขึ้นเครื่องมือที่ใช้เรียกว่ารีไฟเนอร์

ค. การผสมน้ำเยื่อ เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมเยื่อที่ผ่านการบดแล้วโดยผสมในถังใบพัดกวนเยื่อถูกเก็บในถังที่เรียกว่า แมชชีนเซสต์

ง. การแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำเยื่อ คัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าเส้นใยออกแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องทำความสะอาดที่เรียกว่า เซนทริฟิวต์คลีนเนอร์

จ. การควบคุมความเข้มข้นของน้ำเยื่อ เพื่อควบคุมให้น้ำเยื่อข้นคงที่

1.1.5 กระบวนการผลิตกระดาษ

หลังการผสมน้ำเยื่อแล้วจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกันเรียกว่า เว็บบ์เปเปอร์ ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรผลิตกระดาษได้แก่

ก. ถังจ่ายเยื่อ ทำหน้าที่จ่ายน้ำเยื่อเข้าสู่ตะแกรงเหล็ก

ข. ตะแกรงลวดเดินแผ่น ทำหน้าที่สำคัญ 2 ประการคือการก่อตัวเป็นแผ่นกระดาษด้วยกระบวนการกรอง และแยกน้ำออก แผ่นเปียกที่ออกจากส่วนนี้มีน้ำอยู่ 80

เปอร์เซ็นต์ ส่วนกดกระดาษ ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียกทำให้เกิดการยึดแน่นภายในเนื้อกระดาษ กระดาษที่ออกจากส่วนนี้มีน้ำอยู่ประมาณ 55-60 เปอร์เซ็นต์

ค. ส่วนอบกระดาษ มีลูกอบให้ความร้อนกับกระดาษทำให้กระดาษแห้ง

ง. ส่วนรีดเรียบกระดาษ ทำหน้าที่ปรับแผ่นกระดาษให้เรียบและมีเนื้อแน่นขึ้น

จ. ส่วนพับกระดาษเข้าม้วน ทำหน้าที่นำกระดาษเข้าม้วน

1.2 มลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

1.2.1 น้ำเสีย

ก. น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ได้แก่ น้ำที่ใช้ในขั้นตอนต่างๆของกระบวนการผลิต น้ำส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1) น้ำที่ใช้ในขั้นตอนย่อยต่างๆ คือ แฉะเยื่อ ต้มเยื่อ ฟอกเยื่อและย้อมสีเยื่อ โดยเฉพาะน้ำฟอกเยื่อและย้อมสีเยื่อ จะมีปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นของสีสูง

2) น้ำที่ใช้ในการล้างเยื่อจะใช้น้ำในปริมาณมากโดยน้ำในส่วนนี้จะมีสิ่งสกปรกต่ำกว่าน้ำเสียประเภทแรก

ข. น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องและทำความสะอาดโรงงาน เป็นน้ำที่ใช้ทำความสะอาดโรงงาน ส่วนใหญ่จะมีการปนเปื้อนของสารทำความสะอาดและสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น น้ำมันจากเครื่องจักรในโรงงาน ดิน ทราช เป็นต้น (นนทพงษ์, 2548)

1.2.2 สีในน้ำเสีย

สีในน้ำเสียแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สีแท้หรือสีจริง หมายถึงสีที่เกิดจากสารต่างๆในน้ำและละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่

สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยาก อีกประเภท คือ สีปรากฏ หมายถึง สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา สำหรับสีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมกระดาษ ถือเป็นสีที่ปรากฏจากสารเคมีในกระบวนการผลิต รวมถึงลิกนิน และแทนนิน

1.2.3 เถ้าลอย

สำหรับอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษที่มีการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงาน ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะก่อให้เกิดเถ้าลอย เป็นผลพลอยได้ ถ่านหินที่บดละเอียดจะถูกเผาเพื่อเอาพลังงานความร้อน เถ้าถ่านหินที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่จะตกลงยังก้นเตา จึงเรียกกันว่า เถ้าก้นเตา ส่วนเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก 1 ไมครอน จนถึงประมาณ 200 ไมครอนจะลอยไปกับอากาศร้อนจึงเรียกว่า เถ้าลอย เถ้าลอยจะถูกดักจับโดยที่จับไฟฟ้าสถิตย์เพื่อไม่ให้ออกไปกับอากาศร้อน และเป็นมลภาวะต่อพื้นที่รอบ โรงงานอุตสาหกรรม

2. ชนิดและคุณสมบัติของเถ้าลอย

2.1 ชนิดของเถ้าลอย

มาตรฐาน ASTM C618 แบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.1.1 ชนิด F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และบิทูมินัสที่มีปริมาณผลรวมของซิลิกา (Silica, SiO_2) อลูมินา (Alumina, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide, Fe_2O_3) มากกว่าร้อยละ 70

2.1.2 ชนิด C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่าร้อยละ 50 ปริมาณ CaO สูงและมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า เถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ Al_2O_3 มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่มี Al_2O_3 ต่ำ ทำให้เถ้าลอยชนิด C นอกจากมี SiO_2 ต่ำแล้วยังมี Al_2O_3 ต่ำด้วย โดยลักษณะของเถ้าลอยชนิด F และชนิด C แสดงดังภาพที่

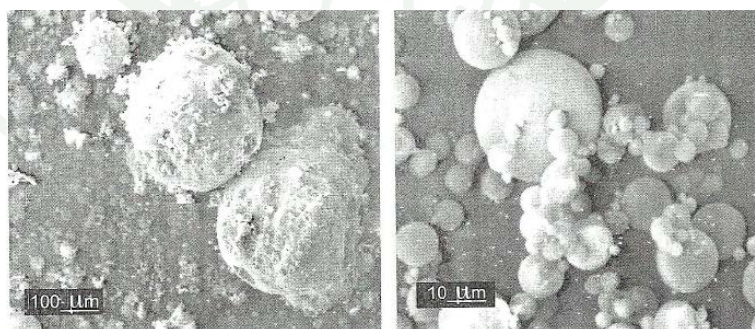


ภาพที่ 1 การแบ่งประเภทของเถ้าลอย

ที่มา: ชีรวัดน์ (2554)

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เมื่อเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ จะสันดาปและหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลงหลังจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายทำให้เถ้าลอยที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลมและอยู่ในสถานะแก้ว โดยสามารถลอยตามอากาศร้อนได้ มีผิวขรุขระและรูเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 รูปร่าง และลักษณะผิวของเถ้าลอย

ที่มา: ปริญญา (2547)

แก้วลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟีย ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ่านหินถูกกักไว้ภายในแก้วลอย และยังมีแก้วลอยกลวงที่มีอนุภาคแก้วถ่านหินเล็กๆ อยู่ภายในเรียกว่า ฟลิโรสเฟีย แก้วลอยกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงหลายร้อยไมครอน องค์ประกอบหลักของแก้วลอยกลวง คือ แก้วลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากแก้วลอยกลวงเป็นแก้วลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำแก้วลอยกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบา และคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง

2.3 คุณสมบัติทางเคมีของแก้วลอย

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของถ่านหิน แต่โดยทั่วไปจะคล้ายกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือ ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และ MgO , Na_2O , K_2O และ SO_3 เป็นองค์ประกอบรอง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา และจากงานวิจัยของ (วรวิติ และคณะ, 2553) ได้ส่งตัวอย่างของแก้วลอยลิกไนต์ไปตรวจสอบที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ พบว่าในแก้วลอยลิกไนต์ทั่วไปจะประกอบไปด้วย SiO_2 , CaO และ Al_2O_3 ร้อยละ 40.89, 14.54 และ 13.33 โดยน้ำหนักตามลำดับ ประกอบกับองค์ประกอบอื่นๆ เช่น SO_3 , K_2O , MgO , MnO และ Fe_2O_3 เป็นต้น

3. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียมีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการทางกายภาพ

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อใช้ในการแยกของแข็งไม่ละลายน้ำออก โดยมากเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การคัดด้วยตะแกรง การกวาด การกวน การทำให้ลอย การตกตะกอน การกรอง และการกำจัดตะกอนหนัก เป็นต้น (เกรียงศักดิ์, 2542)

3.1.1 การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นวิธีการแยกตะกอนแขวนลอยจากน้ำเสีย โดยอาศัยการตกลงตัวของตะกอนแขวนลอยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำ ในระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมักจะมีถังตกตะกอนอยู่ 2 ชนิด คือถังตกตะกอนที่ใช้แยกตะกอนต่างๆออกจากน้ำเสีย ก่อนที่จะไหลไปลงถังบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีชีวภาพ เรียกว่าถังตกตะกอนแรก (primary sedimentation tank) และถังตกตะกอนที่ใช้แยกตะกอนชีวภาพ หรือตะกอนเคมีออกจากน้ำเพื่อให้ได้น้ำใสสะอาด เรียกว่าถังตกตะกอนที่สอง (secondary sedimentation tank) สำหรับถังตกตะกอนสามารถแบ่งได้ ดังนี้คือ ถังสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถังสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถังทรงกลม โดยถังกลมเป็นถังที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะไม่มีตะกอนตกค้างอยู่บริเวณใดๆ รอบถัง

3.1.2 การทำให้ลอย (Flotation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทำให้ตะกอนต่างๆในน้ำเสียลอยขึ้นสู่ชั้นบนของผิวน้ำ เพื่อทำการกวาดตะกอนลอยทิ้งออกไป วิธีนี้นิยมใช้กับตะกอนประเภทที่ยากแก่การตกตะกอน เช่น พวกตะกอนเบาต่างๆ ระบบนี้จะใช้พื้นที่ในการแยกตะกอนน้อยกว่าวิธีตกตะกอน เพราะใช้เวลาในการแยกน้อยกว่า

3.2 กระบวนการทางเคมี

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอน การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน และการฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

3.3 กระบวนการทางชีวภาพ

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลชีพที่จะทำการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆไปเป็นก๊าซลอยขึ้นสู่อากาศจะได้จุลชีพเพิ่มจำนวนขึ้นได้แก่ ระบบโปรยกรอง (Trickling filters) ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating Biological Contactor : RBS) ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ระบบบ่อเติมอากาศแบบธรรมชาติ (Oxidation Ponds, Stabilization Ponds) แบ่งเป็น 3 แบบด้วยกันคือระบบบ่อแบบมีอากาศ (Aerobic ponds) บ่อกึ่งมีอากาศกึ่งไร้อากาศ (Facultative Ponds) บ่อไร้อากาศ (Anaerobic Ponds) เป็นต้น

3.3.1 ระบบโปรยกรอง หลักการระบบนี้ประกอบด้วยตัวกลางบรรจุอยู่ในถัง เพื่อให้จุลชีพเกาะอยู่ตามผิวตัวกลาง การเติมอากาศจะอาศัยออกซิเจนจากอากาศผสมกับน้ำเสียก่อนที่จะไหลผ่านผิวตัวกลางที่มีจุลชีพเกาะอยู่ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเมือกหนาพอเพียงที่จะให้ออกซิเจนแทรกเข้าไปได้ พบว่ายิ่งผิวขรุขระมากจะยิ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงขึ้น ดังนั้นการเลือกผิวตัวกลางเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมาก

3.3.2 ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ หลักการระบบนี้เหมือนกับระบบโปรยกรอง คือ จุลชีพจากน้ำเสียเริ่มขยายพันธุ์เกาะตามบริเวณผิวกลางของแผ่นกลมที่หมุนอยู่ จนทั่วทั้งแผ่นกลม โดยทั่วไปเมื่อกจุลชีพที่เกาะอยู่บนผิวตัวกลางค่อยๆ หลุดออกไปบ้างเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากการหมุน ซึ่งทำให้มีบางส่วนแขวนลอยอยู่ในน้ำเสียภายในถัง ดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์ (บีโอดี) ในน้ำเสียด้วยระบบนี้จึงน่าจะมีประสิทธิภาพดี และระบบนี้มีเครื่องจักรมากกว่าระบบโปรยกรอง จำเป็นต้องเอาใจใส่มากกว่า

3.3.3 ระบบตะกอนเร่ง เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่นิยมใช้กันมากอาศัยจุลชีพที่มีปริมาณมากพอสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลชีพเหล่านี้จะลอยอยู่ในน้ำตะกอนของถังเติมอากาศ ซึ่งจุลชีพจะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณในลักษณะของการเจริญเติบโตของสารแขวนลอย (suspended growth) โดยทั่วไปภายในถังเติมอากาศจะมีระบบกวน ซึ่งมักจะใช้เครื่องจักรกลทำหน้าที่ให้จุลชีพหรือน้ำสลัดจ์แขวนลอยอยู่ในถังเติมอากาศตลอดเวลา เพื่อที่สามารถควบคุมจำนวนจุลชีพภายในระบบได้ตามต้องการ จำเป็นจะต้องมีระบบแยกน้ำใสออกจากน้ำสลัดจ์นิยมใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำทิ้งออกจากสลัดจ์ เพื่อปล่อยน้ำทิ้งที่ใสไหลล้นออกจากถังตกตะกอน ส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะมีความเข้มข้นของสลัดจ์มาก ซึ่งมักจะนำกลับสู่ถังเติมอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมจำนวนจุลชีพในถังเติมอากาศได้ ถ้าพบว่าในระบบมีน้ำสลัดจ์มากเกินไปเกินความต้องการ ก็จะสูบจากก้นถังตกตะกอนหรือถังเติมอากาศโดยตรง และจะนำสลัดจ์ส่วนเกินนี้ไปบำบัดแล้วกำจัดทิ้งต่อไป

3.3.4 ระบบยูเอเอสบี เป็นระบบไร้อากาศที่มีทิศทางการไหลเข้าด้านล่างขึ้นด้านบน โดยไม่มีตัวกลาง แต่แบคทีเรียจะถูกเลี้ยงให้จับตัวกันเป็นเม็ดขนาดใหญ่ จนกระทั่งมีน้ำหนักรวม และสามารถตกตะกอนได้ดี ผลิตภัณฑ์ชีวภาพได้แก่ มีเทน(CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ระบบนี้สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้สูง เนื่องจากสามารถป้องกันแบคทีเรียมิให้แบคทีเรียไม่ให้หลุด

ออกไปกับน้ำทิ้งด้วย ข้อดีของระบบคือ มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ และมีความสามารถในการรับปีโอติของน้ำเสียได้สูงมาก

3.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและทางเคมีมารวมกัน เป็นวิธีที่อาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงสามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพดีจนถึงระดับเป็นน้ำดื่มได้ จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis: RO) การกรองแบบ ultrafiltration และการแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis)

3.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน ใช้หลักการดูดซับด้วยคาร์บอน เพื่อต้องการแยกสารที่ปนเปื้อนละลายอยู่ในน้ำทิ้ง ถ่านที่ใช้มี 2 ลักษณะคือ แบบคาร์บอนเม็ด (granular carbon) และแบบคาร์บอนเป็นผง (powder carbon) ในบางระบบอาจใช้คาร์บอนเป็นผงผสมกับน้ำเสียในถังเดิม อากาศของระบบตะกอนเร่ง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ประเภทที่ย่อยสลายยาก

3.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ ใช้หลักการแลกเปลี่ยนประจุของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยอาศัยสารที่เติมลงไปในถังแลกเปลี่ยนประจุ ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้ชนิดสารที่เติมลงไปอย่างเหมาะสม

3.4.3 ออสโมซิสผันกลับ สามารถแยกสารปนเปื้อนขนาดขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^5 มม. โดยทั่วไปนำไปใช้บำบัดน้ำทิ้งให้มีคุณภาพสูง หรือต้องการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่อีกสำหรับในกระบวนการผลิต

3.4.4 การกรองแบบ Ultrafiltration หลักการของระบบนี้คือใช้เยื่อกรองแบบ porousmembrane อดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันพอประมาณ โดยปกติต่ำกว่า 1,034 กิโลนิวตัน/ ตร.ม. ซึ่งจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและแบบตะกอนเล็กๆ ได้ โดยปกติเป็นสารปนเปื้อนที่มีขนาดน้ำหนักรวมเลกุลตั้งแต่ 500-500,000 ขนาดตั้งแต่ 2×10^{-7} ถึง 1×10^{-2} มม. ระบบนี้อาจใช้เป็นระบบกำจัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบออสโมซิสผันกลับ หรืออาจใช้ทดแทนระบบถังทำขึ้น

ถึงตกตะกอนและระบบรวมตะกอน พวกดินเหนียวและจุลชีพต่างๆก็สามารถถูกแยกออกจากน้ำได้ด้วยวิธีนี้ สำหรับอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองและสามสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้อีก

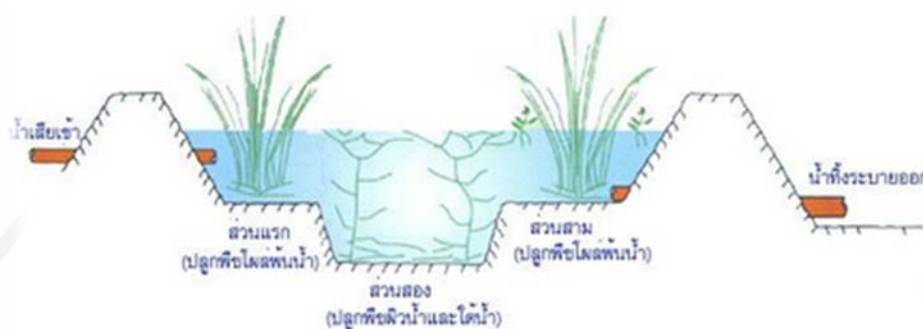
4. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

บึงหรือพื้นที่ชุ่มน้ำ หมายถึง พื้นที่ซึ่งมีน้ำท่วมถึงหรือชุ่มไปด้วยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินในระยะเวลาานพอที่จะทำให้พื้นที่นั้นคงสภาวะการอิ่มตัวด้วยน้ำไว้ได้ โดยในพื้นที่ชุ่มน้ำนี้ยังเป็นบริเวณที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนพลังงานและสารอาหารระหว่างดวงอาทิตย์กับสิ่งมีชีวิตที่อาศัยภายในบึง นอกจากนี้บึงยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์ต่างๆมากมาย ซึ่งเป็นสถานที่ที่มีความหลากหลายทางชีวภาพสามารถรักษาสมดุลให้กับสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วความลึกของน้ำในบึงจะมีระดับแตกต่างกันไปประมาณ 1 – 2 เมตร และน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในพืชที่ขึ้นกันอยู่หนาแน่นอย่างช้าๆ พืชส่วนใหญ่ที่พบในบึงต้องเป็นพืชที่ทนต่อสภาพน้ำท่วมและสภาพขาดออกซิเจนของดินได้ โดยทั่วไปแล้วการใช้บึงธรรมชาติในการบำบัดของเสียจะมีรูปแบบของการไหลในแนวนอน โดยบึงธรรมชาติจะสามารถบำบัดของเสียได้ด้วยกระบวนการกรอง, การตกตะกอน, การดูดซับสารอาหารของพืชและการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ โดยบึงประดิษฐ์มี 2 ประเภท ได้แก่

4.1 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Free Water Surface Wetland (FWS)

เป็นแบบที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งหลังจากผ่านการบำบัดจากบ่อปรับเสถียรแล้ว ลักษณะของระบบนี้จะเป็นบ่อดินที่มีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูพื้นด้วยแผ่น HDPE ให้ได้ระดับเพื่อให้ น้ำเสียไหลตามแนวนอนขนานกับพื้นดิน บ่อดินจะมีความลึกแตกต่างกันเพื่อให้เกิดกระบวนการบำบัดตามธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ โครงสร้างของระบบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก เป็นส่วนที่มีการปลูกพืชที่มีลักษณะสูง โผล่พ้นน้ำและรากเกาะดินปลูกไว้ เช่น กก แผลก ฐปลาชี่ เพื่อช่วยในการกรองและตกตะกอนของสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้ ทำให้กำจัดสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ได้บางส่วน เป็นการลดสารแขวนลอยและค่าบีโอดีได้ส่วนหนึ่ง ส่วนที่สองเป็นส่วนที่มีพืชชนิดลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน บัว รวมทั้งพืชขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ พื้นที่ส่วนที่สองนี้จะไม่มีมีการปลูกพืชที่มีลักษณะสูง โผล่พ้นน้ำเหมือนในส่วนแรก น้ำในส่วนนี้จึงมีการสัมผัสอากาศและแสงแดดทำให้มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายซึ่งเป็นการเพิ่มออกซิเจน

ละลายน้ำ (DO) ทำให้จุลินทรีย์ชนิดที่ใช้ออกซิเจนย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้เป็นการลดค่าบีโอดีในน้ำเสีย และส่วนที่สาม มีการปลูกพืชในลักษณะเดียวกับส่วนแรก เพื่อช่วยกรองสารแขวนลอยที่ยังเหลืออยู่ แสดงดังภาพที่ 3

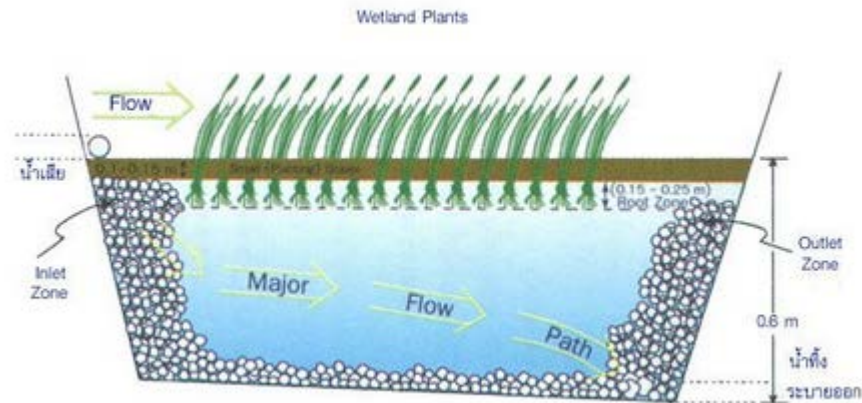


ภาพที่ 3 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Free Water Surface Wetland (FWS)

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2545)

4.2 ระบบบึงประดิษฐ์ Vegetated Submerged Bed System (VSB)

ระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้จะมีข้อดีกว่าแบบ Free Water Surface Wetland คือ เป็นระบบที่แยกน้ำเสียไม่ให้ถูกรบกวนจากแมลงหรือสัตว์ และป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ต่างๆ ที่ทำให้เกิดโรคมานเป็นอันกับคนได้ ในบางประเทศใช้ระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้ในการบำบัดน้ำเสียจากบ่อเกรอะ และปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบบ่อปรับเสถียร หรือใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากระบบ Activated Sludge และระบบ RBC หรือใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ระบายออกจากอาคารคักน้ำเสียเป็นต้น ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ระบบบึงประดิษฐ์แบบ Vegetated Submerged Bed System (VSB)

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2545)

โดยส่วนประกอบที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียของระบบบึงประดิษฐ์แบบนี้ คือ พืชที่ปลูกในระบบ จะมีหน้าที่สนับสนุนให้เกิดการถ่ายเทก๊าซออกซิเจนจากอากาศเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้แก่ น้ำเสีย และยังทำหน้าที่สนับสนุนให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้โดยการนำไปใช้ในการเจริญเติบโตของพืช

4.3 พืชที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

4.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหญ้าแฝก (*Vetiveriazizanioides*)

หญ้าแฝก เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้าชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง อ้อย ขึ้นเป็นกอ หน่อเบียดกันแน่น ใบของหญ้าแฝกมีลักษณะแคบยาวขอบขนานปลายสอบแหลม ด้านท้องใบจะมีสีจางกว่าด้านหลังใบ มีรากเป็นระบบรากฝอยที่สานกันแน่นยาวหยั่งลึก แผ่กระจายลงดินในแนวดิ่ง จึงช่วยอุ้มน้ำและยึดเหนี่ยวดินได้มั่นคง และเมื่อนำมาปลูกเป็นแถวชิดติดกันอย่างแน่นหนา จะช่วยดักตะกอนดิน รักษาหน้าดินได้ดี เพิ่มคุณภาพดิน โดยการฟื้นฟูโครงสร้างดินที่สูญเสียธาตุอาหารให้กลับคืนสู่ความสมบูรณ์ ซึ่งพบกระจายอยู่ทั่วไปหลายพื้นที่ตามธรรมชาติ โดยลักษณะรากของหญ้าแฝก แสดงดังภาพที่ 5 และจากการสำรวจพบว่ามีการกระจายอยู่ทั่วโลกประมาณ 12 ชนิด โดยสำรวจพบในประเทศไทย 2 ชนิด ได้แก่

ก. กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกกลุ่ม(*Vetiveria zizanioides*) พบในพื้นที่ลุ่ม กอเป็นพุ่มสีเขียวเข้ม เนื้อใบค่อนข้างเนียนรากลยาวได้ถึง 3 ม. ได้แก่ พันธุ์ศรีลังกา สงขลา 3 เป็นต้น

ข. กลุ่มพันธุ์หญ้าแฝกคอน(*Vetiveria nemoralis*) พบในพื้นที่แล้ง ปลายใบแผ่โค้ง ใบเขียวซีดหยาบ มีรากลยาวสุด 1 ม. ได้แก่ พันธุ์ราชบุรี ร้อยเอ็ด กำแพงเพชร 1 และเลย เป็นต้น



ภาพที่ 5 ลักษณะรากของหญ้าแฝก

ที่มา: สถาบันวิจัยและพัฒนาหญ้าแฝก (2554)

กรมพัฒนาที่ดิน (2541) กล่าวว่า ผลของอินทรีย์วัตถุที่เพิ่มขึ้นและกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์บริเวณรากหญ้าแฝก รวมทั้งการมีความชื้นที่ยาวนาน สภาพดินจึงมีการพัฒนาและอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชช่วยให้พืชดูดธาตุอาหารจากดินได้เพิ่มขึ้นและสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพที่มีโลหะหนัก ด้วยลักษณะดังกล่าวจึงมีการนำหญ้าแฝกมาปลูก เพื่อใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทและดูดซับโลหะหนักจากดิน

4.3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของรูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.)

รูปฤาษีเป็นพืชล้มลุกมีเหง้าแข็ง ใบเดี่ยวแตกสลับกันเป็นสองแถวด้านข้างรูป

แถบแบน กว้าง 1-2 ม. แผ่นใบนูน ดังภาพที่ 6 ดอกสีน้ำตาล แยกเพศกันเดี่ยวกันก้านช่อดอกเรียวยาว แข็ง ดอกเพศผู้เป็นกลุ่มหลวมๆ ที่ปลายช่อ ยาว 15 -30 ซม.ดอกย่อยมีเกสรเพศผู้ 2-3 อัน ดอกเพศเมียอยู่ด้านล่าง ดอกย่อยอัดแน่นเป็นรูปทรงกระบอกยาว 28 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. รังไข่มีก้านยาวและขนสีขาว ผลเมื่อแก่แตกตามยาวมีขนาดเล็กมาก มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาและยุโรป ปัจจุบันแพร่กระจายไปทั่วโลก พบตามที่ชื้นหรือแหล่งน้ำตื้น



ภาพที่ 6 ลักษณะลำต้นรูปถายี่

ที่มา: กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช (2554)

รูปถายี่มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Typha angustifolia* Linn. ชื่อเรียกสามัญคือ Narrow-leaved cattail, Lesser reedmace, Cattail, Elephant-Grass และ Indian Leedmace และชื่อท้องถิ่นคือรูปถายี่ (กรุงเทพฯ), กกช้าง (กลาง), หญ้าสลาบหลวง (เหนือ), หญ้าเฟือ, หญ้าปรือ และหญ้ากกช้าง (ดวงพร และรังสิต, 2544)

Kartesz (2002) กล่าวว่าได้มีการจัดอนุกรมวิธานของรูปถายี่ไว้ดังนี้

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Subclass Commelinidae

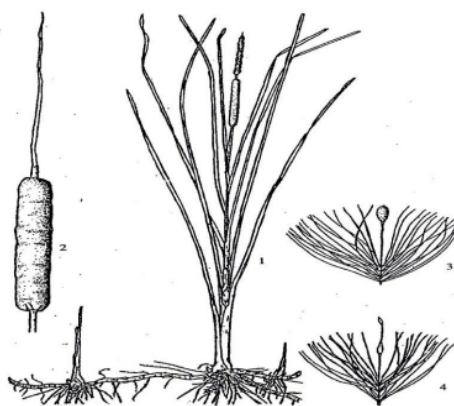
Order Typhales

Family Typhaceae

Genus *Typha*

Species *angustifolia*

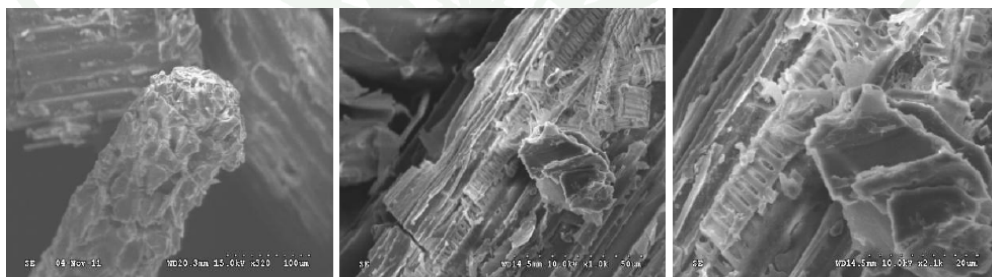
สุชาดา (2542) กล่าวว่าพืชในสกุล *Typha* มีอยู่ทั่วโลกประมาณ 15 ชนิด เช่น *Typha angustifolia*, *Typha angustata*, *Typha anstralis*, *Typha capensis*, *Typha crientalis*, *Typha davidians*, และ *Typha orientalis* เป็นต้น โดยลักษณะองค์ประกอบของรูปถ่ายแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 รูปถ่าย *Typha angustifolia* Linn.

ที่มา: สุชาดา (2542)

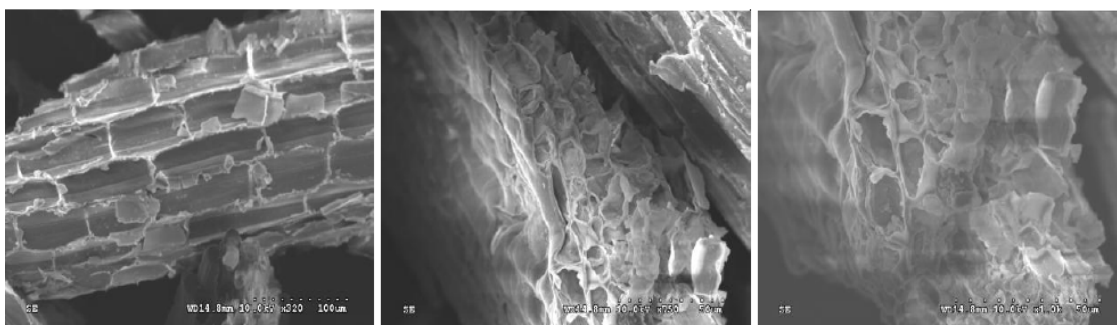
อารยา และวริดา (2554) ใช้รูปถ่ายเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก Ni^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ ด้วยเครื่องมือ Scanning Eletron Microscopy พบว่ารูพรุนของรูปถ่ายที่ไม่ปรับสภาพ ที่กำลังขยาย 320, 1,000 และ 2,100 เท่า มีลักษณะดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลักษณะทางกายภาพของต้นรูปถ่ายที่ไม่ปรับสภาพ

ที่มา: อารยา และวริดา (2554)

และเมื่อทดลองปรับสภาพของต้นรูปถายี่ที่กำลังขยาย 320,750 และ 1,000 เท่าตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการปรับสภาพตัวดูดซับจะทำให้มีรูพรุนที่ใหญ่และมีความสม่ำเสมอของรูพรุนมากขึ้น เป็นเหตุให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้นเช่นกันดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะทางกายภาพของต้นรูปถายี่ที่ปรับสภาพ

ที่มา: อารยา และวชิรา (2554)

Boyde (1970) ยังพบว่ารูปถายี่มีความสามารถในการเจริญเติบโตในน้ำที่มีความเป็นกรดเป็นด่างและความเค็มได้ และด้วยค่าต้นรูปถายี่ทำให้มีความสามารถในการดูดน้ำและธาตุอาหารอย่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัสค่อนข้างสูง

5. บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด เป็นหนึ่งในกลุ่มโรงงานกระดาษ SCG บ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งประกอบไปด้วย 3 กลุ่มโรงงาน ได้แก่ Thai Paper (TPC) ผลิตเยื่อกระดาษเป็นหลัก, Siam Kraft Industry (SKIC) ผลิตกระดาษลูกฟูกสำหรับทำกล่อง และ SCG Paper ผลิตกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งทั้งสามโรงงานมีอัตราการผลิตน้ำเสีย เท่ากับ 18,590.0, 9,282.0 และ 7,234.0 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ โดยน้ำเสียจะถูกรวบรวมมายังถังปรับเสถียร (Equalization Tank; EQ) เพื่อปรับความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย จากนั้นจะถูกสูบไปยังระบบบำบัดแบบ Activated Sludge (AS) แล้วจึงปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

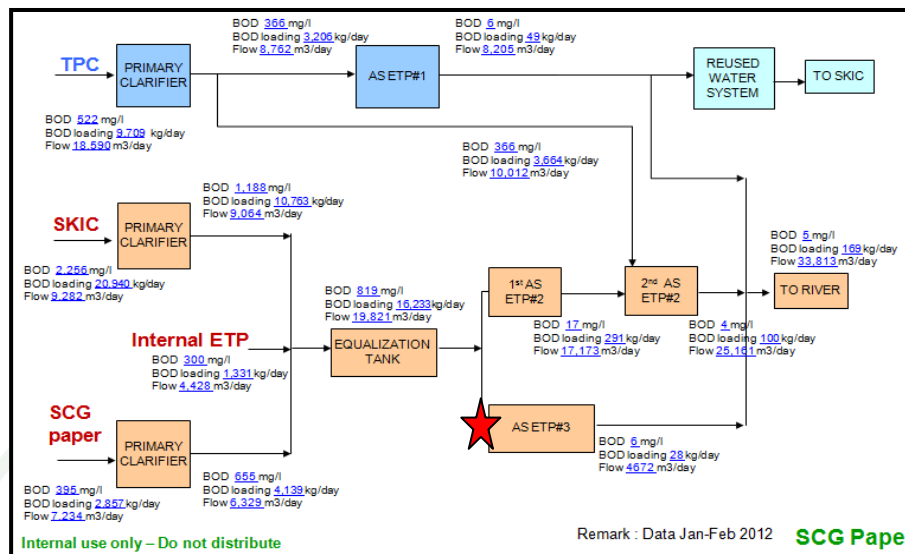
5.1 น้ำเสีย “บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด”

บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด ทำหน้าที่ผลิตกระดาษลูกฟูกสำหรับทำกล่อง ซึ่ง 80 เปอร์เซ็นต์ จะผลิตมาจากกระดาษกล่องหรือลัง ที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมารีไซเคิล และ 20 เปอร์เซ็นต์ ผลิตจากเยื่อกระดาษที่ส่งมาจาก SCG Paper โดยระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานบ้านโป่ง จะแบ่งออกเป็น 3 เฟส ดังภาพที่ 10 คือ ETP 1 รับน้ำเสียมาจาก Thai paper ,ETP 2 รับน้ำเสียมาจาก Thai paper , Siam Kraft Industry และ SCG Paper ส่วน ETP 3 เป็นบ่อบำบัดขนาดเล็ก ซึ่งใช้เป็นน้ำเสียสำหรับงานวิจัยนี้ โดยรับน้ำเสียมาจาก Siam Kraft Industry น้ำเสียจึงค่อนข้างมีสีน้ำตาล โดยจุดเก็บตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Effluent Treatment Plant ของอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ โรงงานบ้านโป่ง

ที่มา: บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด (2556)



ภาพที่ 11 จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียของ บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด

หมายเหตุ: ★ คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากระบบบำบัด

ที่มา: บริษัท สยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด (2556)

5.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของ บริษัทสยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด

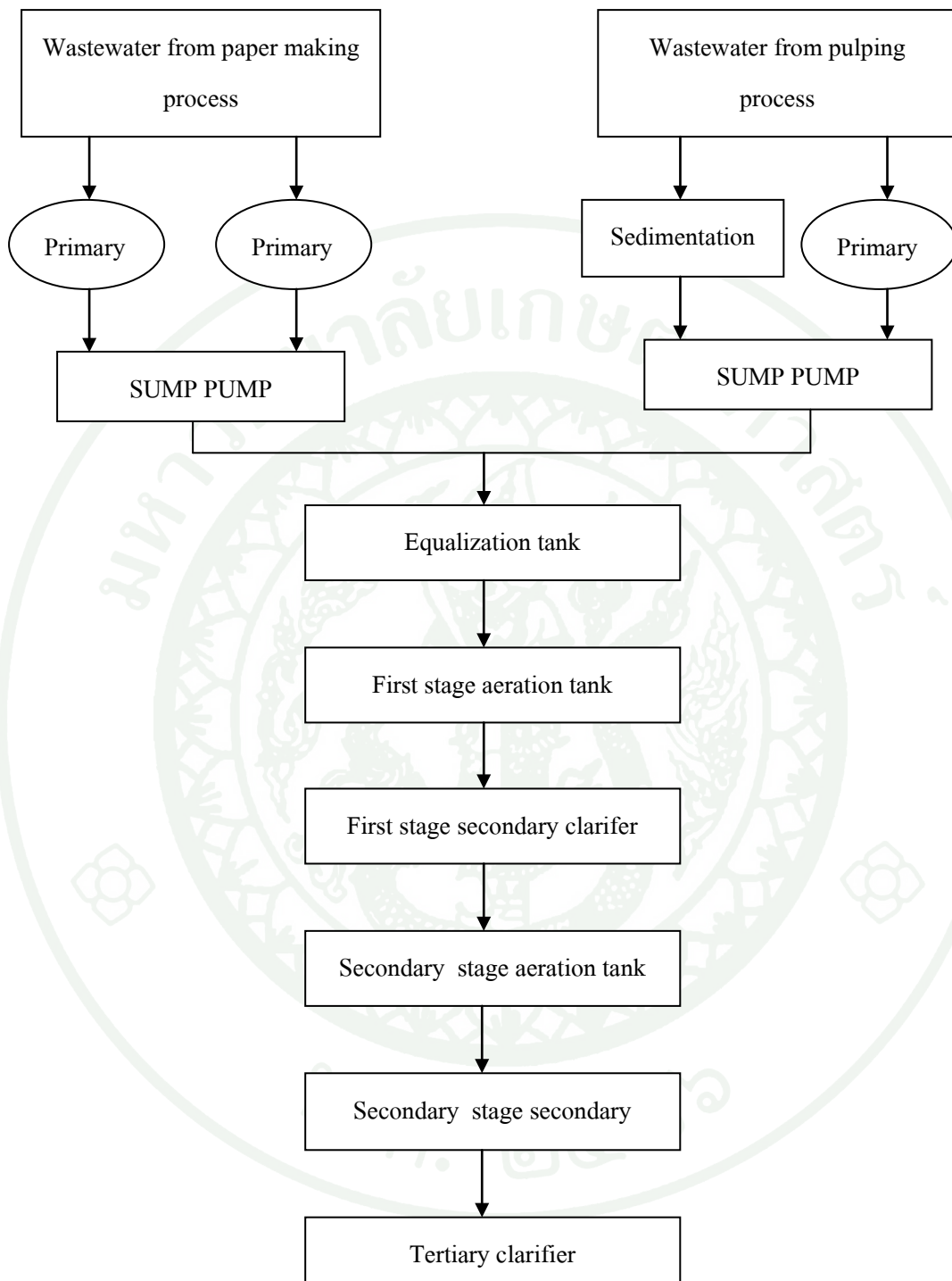
5.2.1 ระบบบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นตอนที่ต้องการแยกสารตะกอนแขวนลอยและกำจัดสารอินทรีย์บางส่วนออกจากน้ำทิ้ง ประกอบด้วย ตะแกรงกรอง บ่อดักตะกอนแบบบ่อกลม (Primary clarifier) บ่อดักตะกอนแบบบ่อเหลี่ยม (Sedimentation tank) และบ่อปรับเสถียร (Equalization tank) เพื่อให้น้ำผสมเป็นเนื้อเดียวกัน พร้อมปรับความเป็นกรดด่างให้เหมาะสมแก่การบำบัดทางชีวภาพ และมีปั้มน้ำที่ปรับอัตราการไหลน้ำเข้าระบบให้คงที่

5.2.2 ระบบบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) เป็นระบบที่กำจัดสารอินทรีย์และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำทิ้ง ใช้การบำบัดแบบชีวภาพด้วยระบบตะกอนเร่ง 2 ขั้นตอน เพื่อให้ค่าคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดได้ตามมาตรฐาน เนื่องจากค่าคุณภาพน้ำเสีย เข้าระบบมีค่าสูงที่ถังเติมอากาศ ใช้เครื่องเติมอากาศแบบสูบลมที่ผิวหน้า (Jet Aerator) ใช้ลมอัดอากาศผ่านท่อเข้ากันบ่อผ่านหัวสเปรย์ (nozzle) พร้อมกับน้ำในบ่อที่ถูกปั้มโดย recirculation Pump ทำให้กวนผสม

น้ำในบ่อได้ทั่วถึง และบ่อดกตะกอนเป็นบ่อกลม ลักษณะการทำงานคู่น้ำเข้าทางก้นบ่อและมีเครื่องกวาดตะกอนก้นบ่อทำให้แยกตะกอนออกได้ดี

5.2.3 ระบบบำบัดขั้นที่สาม เป็นระบบที่แยกกำจัดตะกอนแขวนลอยที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง ประกอบด้วยบ่อดกตะกอนขั้นที่สามเป็นบ่อกลม

5.2.4 ระบบบำบัดตะกอน เป็นระบบที่ทำให้กากตะกอนแห้ง ประกอบด้วย เครื่องบีบตะกอนแบบสายพานรีดน้ำ (belt press) และเครื่องบีบตะกอนแบบเหวี่ยง (Scew press) ตะกอนที่ได้นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงาน โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษโรงงานบ้านโป่ง แสดงโดยรวมดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษของโรงงานบ้านโป่ง

ที่มา: อัญชลี (2548)

6. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊ส หรือ ของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิว ของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับ คือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือ เปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก โดยการดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อย สลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบน ตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

6.1 กลไกการดูดซับ

6.1.1 การแพร่ภายนอก เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวน้ำของตัวดูดซับ

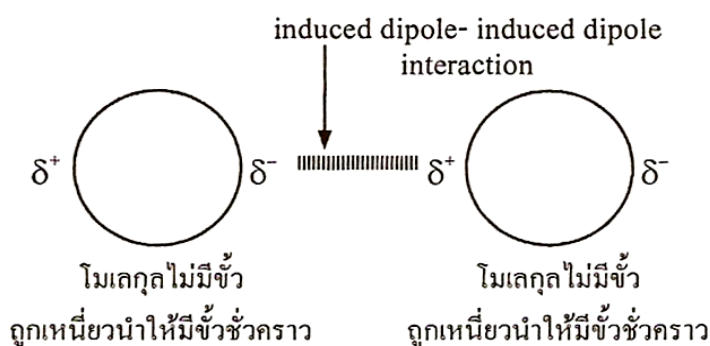
6.1.2 การแพร่ภายใน เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

6.1.3 ปฏิกริยาพื้นผิว เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ

6.2 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับการดูดซับแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น โดยแรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

6.2.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่า แรงลอนดอน หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ในขณะที่ขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราวขึ้น ดังภาพที่ 13

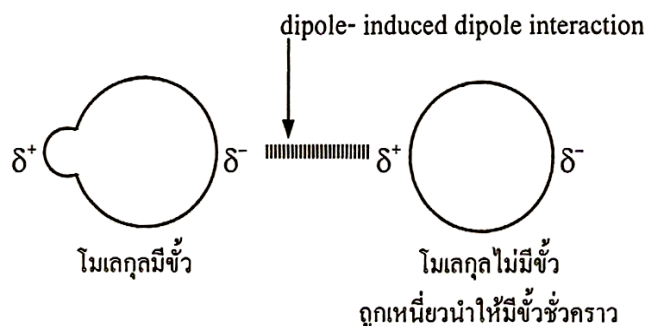


ภาพที่ 13 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.2.2 แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลมีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุล

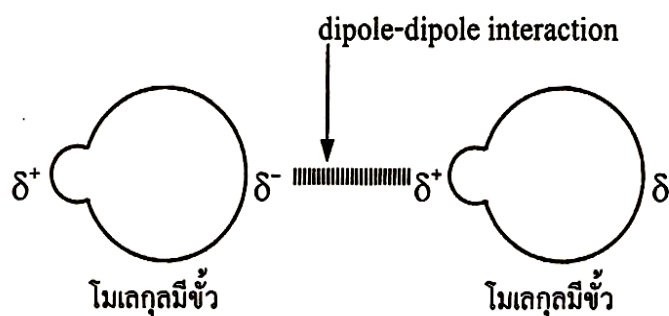
มีขั้วตามไปด้วยจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.2.3 แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก และอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.3 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี

แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กทรอนิกส์กับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กทรอนิกส์กับอิเล็กตรอน และ โปรตอนกับ โปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

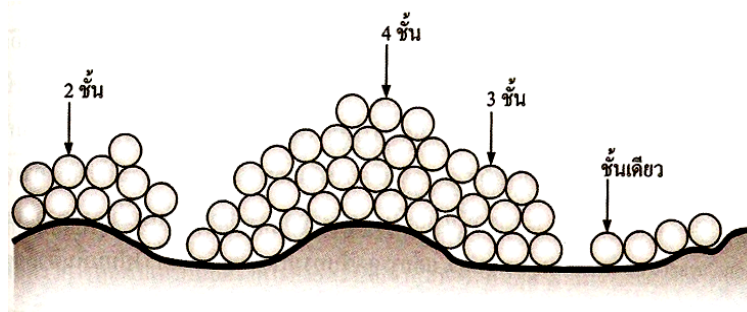
6.4 รูปแบบของการดูดซับ

6.4.1 การดูดซับแบบกายภาพ

การดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดรวมกัน จัดเป็นแรงดึงดูดค่อนข้างอ่อน และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 16 โดยแรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

- แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ
- แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ
- แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 16 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

6.4.2 การดูดซับแบบเคมี

การดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ช้าหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

6.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง(Powder Activated Carbon,PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon,GAC)

6.5.2 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือ โมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายใน ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูก

ดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

6.5.3 อัตราเร็วการปั่นกววน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้น การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกววนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

6.5.4 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็น ไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

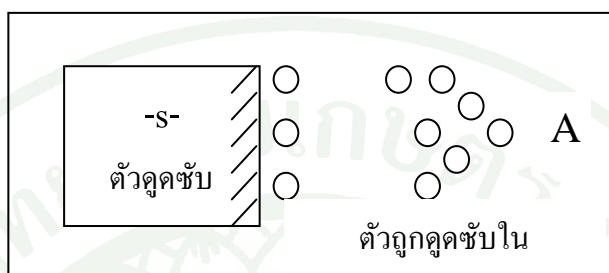
6.5.5 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

6.5.6 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วน ไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการ

ดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย
สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูก
ดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

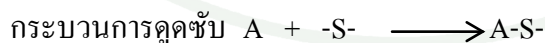
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรใน
สารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1 - q)$ เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือ
ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุล
ตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

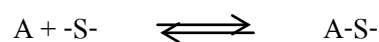
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกละลายที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกละลายต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม หรือ โมลต่อกรัม

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัม หรือ กิโลกรัม

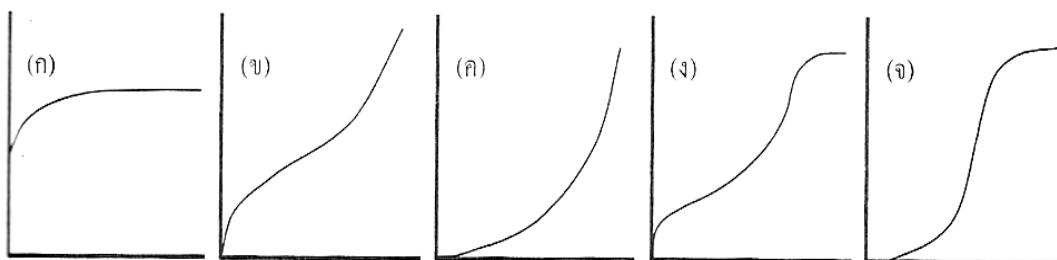
V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยความเข้มข้นเป็น โมลาร์

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยความเข้มข้นเป็น โมลาร์

6.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลายบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 18 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

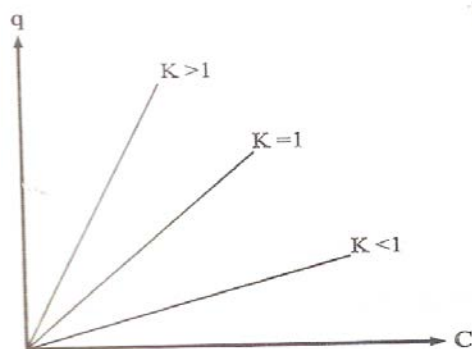
6.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C

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

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสถานะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ ดังภาพที่ 19

150



ภาพที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

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

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

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรุนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

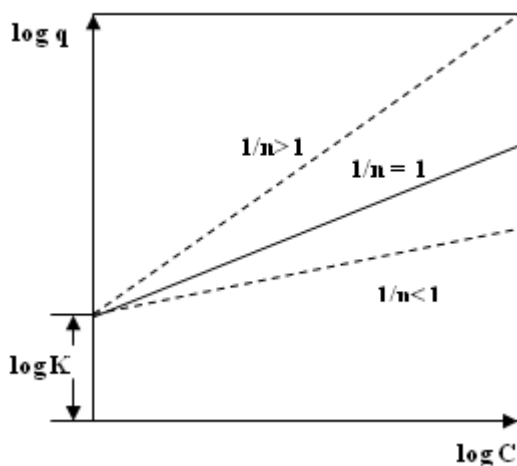
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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



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

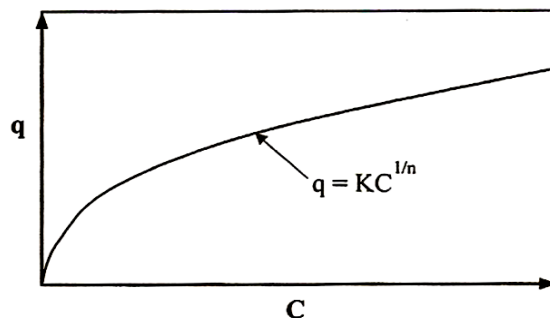
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

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

ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลถึงความสามารถของการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้ ดังภาพที่ 21

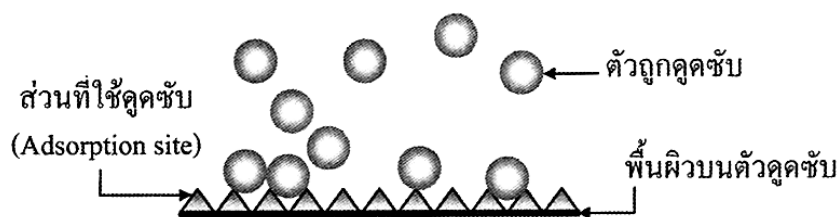


ภาพที่ 21 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

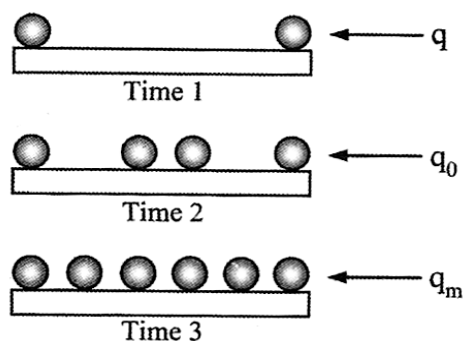
6.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี

เคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23



ภาพที่ 22 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 23 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

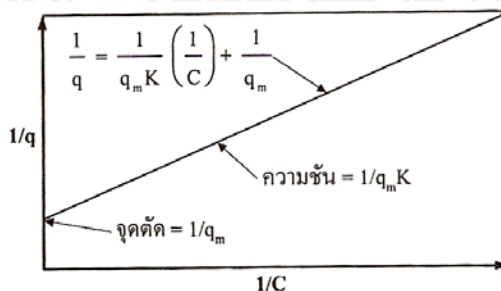
$$q = \frac{q_m KC}{1+KC} \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

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

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



ภาพที่ 24 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

ก. การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น

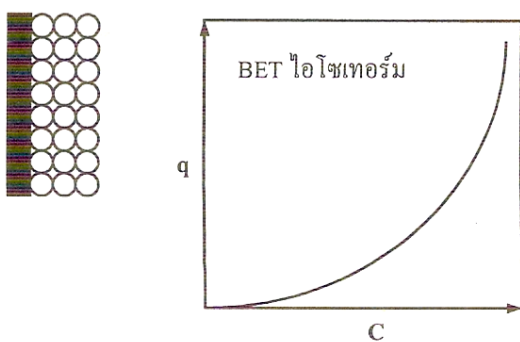
ข. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ค. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน

ง. แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป โดยสมการการดูดซับแบบเบตซ์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

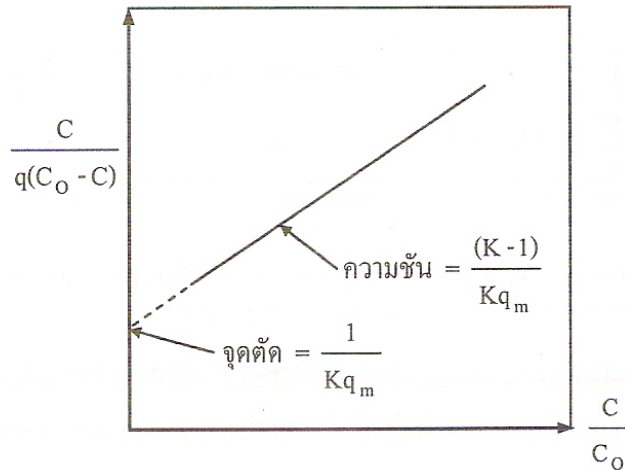
ที่มา: นิพนธ์ และกนิดา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q[C_0 - C]}$ กับ ค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ

$\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$ ดังภาพที่ 26

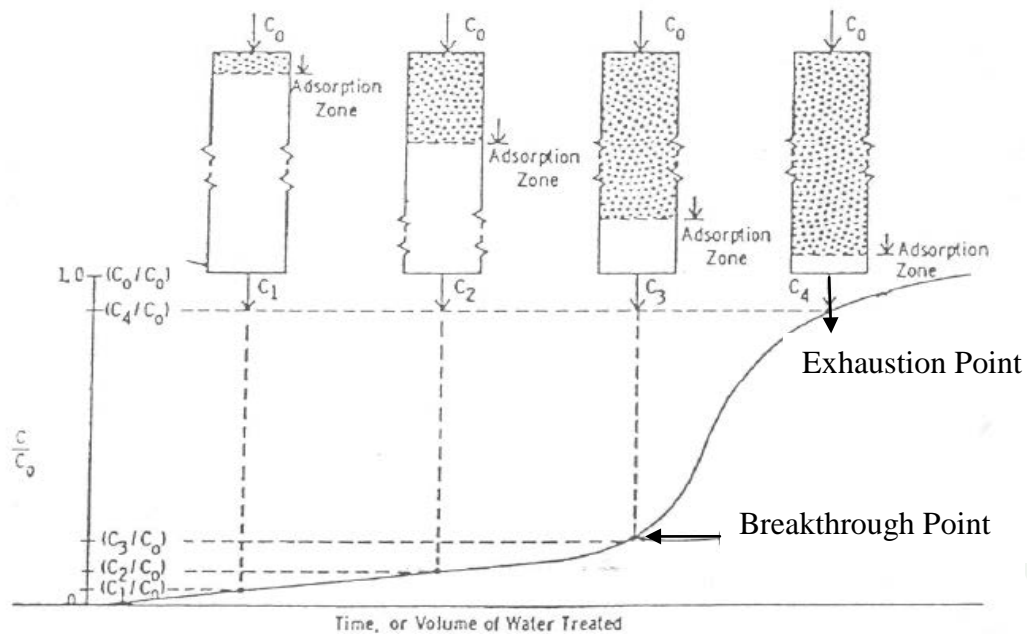


ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

7. การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ

การศึกษาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ สามารถทำได้โดยผ่านน้ำเสียอย่างต่อเนื่องเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับ เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่งจะมีสารปนเปื้อนเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับค่อยๆหมดประสิทธิภาพตามปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ เรียกจุดนี้ว่า จุดเบรคทูร์จ (Breakthrough Point) ดังภาพที่ 27 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นตัวดูดซับแล้ว ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาณที่ใช้เรียกว่า กราฟเบรคทูร์จ (Breakthrough Curve) โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับและเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถที่จะดูดซับได้อีก เรียกจุดนี้ว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaustion Point)



ภาพที่ 27 ลักษณะของกราฟเบรคทวร์จ (Breakthrough Curve)

ที่มา: Weber (1981)

8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

เด่นพงษ์ และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการลดสีน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยถ่านกัมมันต์และถ่านลอยโดยกระบวนการดูดซับได้ทำการวิเคราะห์หาค่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich) แลงเมียร์ (Langmuir) และ ดิเนียร์ (Linear) จากผลการทดลองพบว่า ที่ปริมาณน้ำ 500 มิลลิลิตร ใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 3 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี ร้อยละ 38.57 สามารถดูดซับสีได้ 0.02 กรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 120 นาที มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบดิเนียร์ และถ่านลอยใช้ปริมาณถ่านที่ 1 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี ร้อยละ 46.34 สามารถดูดซับสีได้ 0.07 กรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 60 นาที มีความสัมพันธ์กับสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir

มงคล และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาการลดสีจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วของโรงงานเยื่อและกระดาษ โดยกระบวนการดูดซับด้วยแอคทีเวตเตดคาร์บอน ซึ่งทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของสารดูดซับ ไอโซเทอร์มการดูดซับของสารดูดซับเพื่อเลือกชนิดของสารดูดซับที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า แอคทีเวตเตดคาร์บอนจากไม้ยางมีความสามารถในการดูดซับสี COD และ TOC จากน้ำทิ้งโรงงานเยื่อและกระดาษได้ดีกว่าแอคทีเวตเตดคาร์บอนจากกะลามะพร้าวและถ่านลอย จึงเลือกใช้ แอคทีเวตเตดคาร์บอนจากไม้ยาง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและความพรุนสูงกว่าสารดูดซับอีก 2 ชนิด ส่วนถ่านลอยนั้นมีความสามารถดูดซับได้บางส่วนแต่ไม่สามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานได้จริง

ศุภผล (2557) ได้ทำการวิจัยพบว่ารูปถ่ายช่วยลดค่าพีเอชจากโรงงานฟอกย้อมที่มีความเป็นด่างสูงประมาณ 10-11 ให้เหลือเพียง 7-8 ซึ่งเป็นสภาพที่มีค่าความเป็นกลางมาก นอกจากนี้ลักษณะสีที่ไม่พึงประสงค์ที่ปล่อยออกจากโรงงานหลังจากผ่านการบำบัด น้ำที่เคมีสีสีแดงหรือสีน้ำตาลแดงจะจางลง และยังลดความเป็นพิษในน้ำได้ จากการศึกษาโครงสร้างภายในของต้นรูปถ่าย ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดน้ำและธาตุอาหารเปรียบดั่งเซลล์ฟองน้ำ (Spongy cell) เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ SEM-EDX และ XRD พบว่าภายในมีองค์ประกอบของหมู่ซิลิกอน และหมู่แคลเซียมปะปนอยู่ ซึ่งอาจเป็นส่วนประกอบในการดูดซับสี จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของสีจากน้ำที่ผ่านการบำบัด สามารถอธิบายได้ว่า ต้นรูปถ่ายจะเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสีที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง และคาดว่าจุลินทรีย์ตามธรรมชาติภายในดินจะสามารถย่อยสลายโมเลกุลของสีให้หมดได้

Long Yan *et al.* (2012) ได้ทำการวิเคราะห์ ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำถ่านลอยมาเคลือบกับสาร Coagulant เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยวิเคราะห์ปริมาณการตกตะกอน และหาช่วงของ pH ที่เหมาะสม ซึ่งใช้เทคนิคในการวิเคราะห์ ได้แก่ scanning electron microscopy, energy dispersive spectrometry, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), particle-size analysis และ zetapotential pH and Conductivity measurements โดยวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย suspended solids (SS) และ ค่าปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมี chemical oxygen demand ,COD) จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด สูงถึง 99.61 % และ 96.48 % ตามลำดับ โดยมีช่วง pH 9 เป็นช่วงที่เหมาะสมของการตกตะกอน

Majlinda *et al.* (2011) ได้ทำการวิเคราะห์ถ่านหินที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับโลหะหนักในสารละลาย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ในหลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำถ่านลอยมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีการเผาไหม้ถ่านหินจำนวนมากขึ้น จึงได้มีการศึกษาผลกระทบเพื่อนำถ่านลอยอีกในต้นมาใช้ดูดซับกำจัดโลหะหนักในสารละลายมาตรฐาน น้ำเสียอุตสาหกรรม และแหล่งน้ำธรรมชาติ (จากแม่น้ำ Simica) ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อเวลา 10 นาที สารละลายมาตรฐาน และ น้ำจากแหล่งธรรมชาติ ถ่านลอยสามารถดูดซับโลหะได้สูงสุดประมาณ 99.89 % และที่ 60 นาที สามารถดูดซับโลหะจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมได้สูงสุดถึง 98.12 %

Wirojanagud *et al.* (2002) ได้ศึกษาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียโดยศึกษาการกำจัดสีและ COD โดยใช้โถทดสอบและดินที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ทับถมกันแล้วนำดินที่ได้จากการขุดลงไปที่มีความลึก 1 เมตร นำมาร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดรูเปิด 0.075 มิลลิเมตร) ประกอบด้วยดินเหนียว 18 – 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก น้ำเสียที่ใช้ในการทดสอบภายหลังการบำบัดขั้นที่สองด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานเยื่อและกระดาษ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ pH เท่ากับ 8 และใช้ดินเหนียว 90 กรัมต่อลิตร และมีประสิทธิภาพในการลดสีเท่ากับ 46 % และลด COD เท่ากับ 57 %

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion Block) พร้อมหลอดย่อยสาร (Digestion Vessels)
- 1.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย pH-Meter, Turbidity-Meter, Digital TDS-Meter and EC-Meter
- 1.4 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.00 กรัม
- 1.5 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 1.6 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.7 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman
- 1.8 กระจกปลอกพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร
- 1.9 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

2. สารเคมี

- 2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$) Grade AR
- 2.2 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate (FAS); $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) Grade AR
- 2.3 สารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) Grade AR
- 2.4 สารละลายอินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferroin) Grade AR
- 2.5 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate; $HgSO_4$) Grade AR
- 2.6 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate; Ag_2SO_4) Grade AR
- 2.7 1,10-ฟีแนนโทรีน โมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline monohydrate; $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) Grade

2.8 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเจปตาไฮเดรต (Iron (II) sulfate heptahydrate; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Grade AR

2.9 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate) Grade AR

3. เถ้าลอย

เป็นเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ประกอบด้วยลิกไนต์ 90% และชีวมวล 10% ของโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษ บริษัทสยามกราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด

4. วัสดุปลูก

ได้แก่ ดินนาผสมทราย, กรวด, ทรายหยาบ และทรายละเอียด

5. พีชที่ใช้ปลูก

ได้แก่ หญ้าแฝก และ ฐูปฤายี

6. น้ำเสีย

จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษที่ผ่านระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge, AS) บริษัทสยามกราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

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

1.2 กรดซัลฟิวริกเอเจนต์

ชั่งซิลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆ จนซิลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด

1.3 สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์

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

1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

ชั่งเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 39.20 กรัม เติมน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็น แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่าไปใช้

2. การเตรียมตัวดูดซับ

นำถ้ำลอยมาล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น ทิ้งถ้ำลอยให้เย็นในตู้ดูดความชื้น เพื่อไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

3. การเตรียมกราฟมาตรฐานดีแพคตินัม-โคบอลต์

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

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

4. ศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

4.1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียเบื้องต้นจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ (หมายเหตุ: จุดที่เก็บน้ำมาศึกษา คือ น้ำที่ผ่านระบบตะกอนเร่ง พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์คือ COD (Chemical oxygen demand) บีโอดี (Biochemical Oxygen demand) พีเอช (Potential of hydrogen ion) ค่าการนำไฟฟ้า(Electrical conductivity) อุณหภูมิ (Temperature) ความเค็ม (Salinity) ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total dissolve solid) และสีของน้ำเสียวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D1209 และ ISO 6271 ใช้หน่วยที่วัดค่าสีเป็น Pt-Co unit

4.2 การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ วัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงไปเทียบหาความเข้มข้นของสีจากกราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ ที่เตรียมไว้ในข้อที่ 3.2

4.3 การวิเคราะห์ซีโอดีใช้วิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux)

5. ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์ (Batch)

5.1 ศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสม

ชั่งเถ้าลอยปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 จนถึง 10 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที กรองด้วยกระดาษกรอง เมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร และวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดี คำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี

5.2 ศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

เพื่อหาระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตรต่อปริมาณเถ้าลอยที่ศึกษาได้จากข้อ 5.1 ทุกการทดลองแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง (1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง) และเป็นวัน (1, 2, 3, 4 และ 5 วัน) ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

5.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนข้อ 5.1 แต่ใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้อ 5.2 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ เขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์ม และสมการการดูดซับของแลงเมียร์และ ฟรุนดลิช

5.4 ศึกษาปริมาณดินที่เหมาะสม

ชั่งดินปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ และทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 5.1

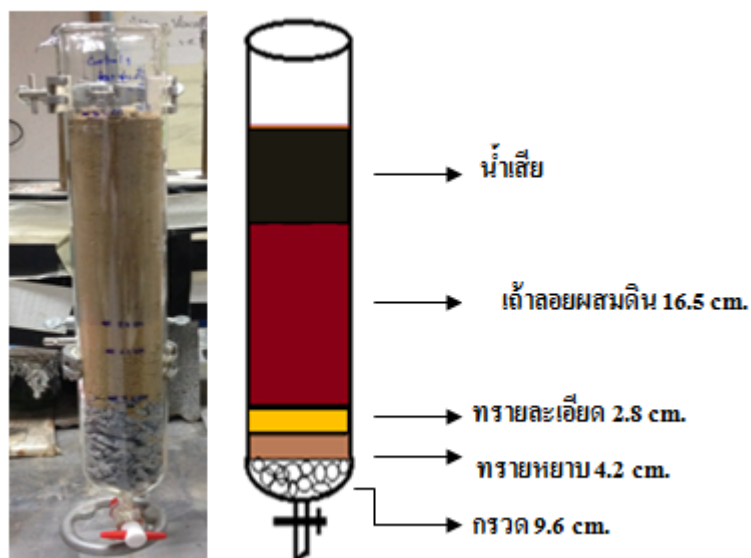
5.5 ศึกษาอัตราส่วนปริมาณเถ้าลอยต่อดินที่เหมาะสม

เพื่อหาอัตราส่วนเถ้าลอยต่อดินที่เหมาะสม โดยใช้ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร แปรผันอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อดินเป็น 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 และ 1:50 และทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับ ข้อ 5.1

6. ศึกษาประสิทธิภาพของชั้นวัสดุเพาะปลูกในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสีย โดยวิธีการแบบคอลัมน์

6.1 วิธีการบรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกในคอลัมน์

ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ความสูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูก โดยบรรจุชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทรายหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2.8 เซนติเมตร และถ้ำลอยผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อที่ 5.5 สูง 16.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกเลียนแบบระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

6.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสีย

6.2.1 การจำลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระยะเวลาบำบัดตามระยะเวลาสัมผัสที่ศึกษาได้จากวิธีแบบเบตซ์

ก. แบบปล่อยผ่าน

เติมน้ำเสีย 2,000 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง และเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่าน ชั้นวัสดุปลูกทุก 200 มิลลิลิตร นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีจนประสิทธิภาพลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือคงที่

ข. แข่งขันน้ำเสีย 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ขังน้ำเสียทิ้งไว้ 4 วัน และเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ นำน้ำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดี จากนั้นปล่อยแห้ง 3 วัน ทำการทดลองต่อจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือคงที่

ค. แข่งขันน้ำเสีย 3 ชั่วโมง

ทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ขังน้ำเสียทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง และเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ นำน้ำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดี จากนั้นเติมน้ำเสียอีก 200 มิลลิลิตร ขังทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง ทำการทดลองเช่นเดิม จนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือคงที่

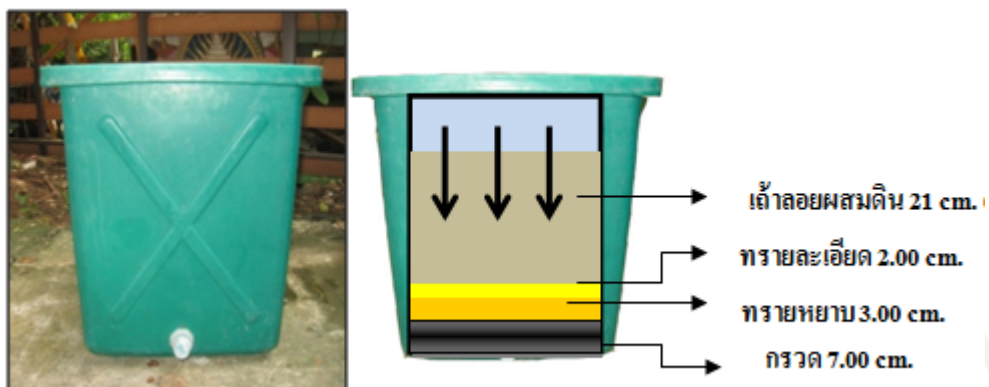
6.2.2 คอลัมน์ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 6.2.1 โดยเปลี่ยนจากการใช้ดินผสมเถ้าลอย เป็นการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับวัสดุเพาะปลูกชั้นอื่นๆ เพื่อเป็นชุดควบคุมผลการทดลอง

7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีด้วยเถ้าลอย โดยการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

7.1 วิธีการบรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกในกระบะ

ทำการทดลอง โดยใช้กระบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร โดยบรรจุวัสดุเพาะปลูกในอัตราส่วน คือ ชั้นกรวด 7 เซนติเมตร ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ้ำลอยผสมดินที่ได้จากการศึกษาข้อที่ 5.5 สูง 21 เซนติเมตร ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 กระบะบรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูก

จากนั้นปลูกพืชต้นรูปถุน และหญ้าแฝก อย่างละกระบะจนเจริญเติบโต และก่อนทดลองทำการตัดพืชทั้งสองให้มีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร

7.2 การจำลองการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

นำผลการทดลองที่ได้จากหัวข้อ 6.2 มาใช้ในการทดลองขั้นตอนนี้ โดยเลือกจากระบบบำบัดที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเชื้อและกระดาษดีที่สุด และทำการทดลองโดยการเติมน้ำเสีย 20 ลิตร ดังภาพที่ 30 แข่งขันน้ำเสียด้วยระยะเวลาที่ศึกษาได้ จากนั้นปล่อยน้ำออกทางช่องด้านล่างที่อยู่ข้างกระบะ นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดี ทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือคงที่



ภาพที่ 30 กระบะปลูกธูปฤาษี และหญ้าแฝก

7.3 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 7.1 และ 7.2 โดยเปลี่ยนจากการใช้ดินผสมเก่าลอย เป็นการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับวัสดุเพาะปลูกอื่นๆ โดยกระบะชุดควบคุมปลูกหญ้าแฝก เพื่อเป็นชุดควบคุมการทดลอง

ผลและวิจารณ์

การศึกษาการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ที่ผ่านการบำบัดในขั้นตอนที่ 1 (Primary treatment) คือ บ่อดักตะกอน และขั้นตอนที่ 2 (Secondary treatment) เป็นการบำบัดแบบชีวภาพด้วยระบบตะกอนเร่ง เพื่อกำจัดตะกอนแขวนลอยและสารอินทรีย์บางส่วนออกจากน้ำเสีย ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการบำบัดในขั้นตอนที่ 3 หรือ เรียกว่า ขั้นตติยภูมิ (Tertiary treatment) เพื่อกำจัดสีของน้ำและซีโอดีที่ยังคงเหลืออยู่ โดยการประยุกต์ใช้ เถ้าลอยร่วมกับระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองแบบแบคทีเรีย เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีของน้ำและซีโอดีในน้ำเสีย ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองแบบคอลัมน์ และส่วนที่ 3 เป็นการจำลองระบบบึงประดิษฐ์ในกระบอกผสมผสานกับการปลูกพืช ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

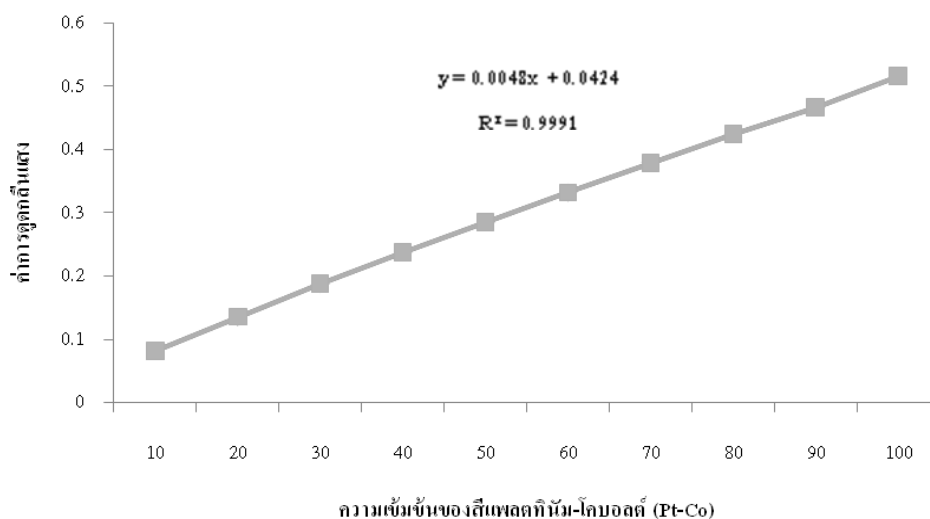
เถ้าลอย เป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ 90% และชีวมวล 10% ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ ซึ่งชีวมวลเป็นเปลือกไม้ เศษไม้ ที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยเถ้าลอยที่ได้จากการเตรียมตามวิธีการในข้อที่ 2 มีลักษณะเป็นผงละเอียด และมีสีเทาเข้ม แสดงดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 ลักษณะของเถ้าลอยที่เตรียมเป็นตัวดูดซับ

2. ผลการเตรียมกราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ที่เตรียมจากการทดลองมีลักษณะเป็นเส้นตรง สมการถดถอยเชิงเส้น คือ $y = 0.0048x + 0.0424$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) เท่ากับ 0.9991 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ 0.9950-1.0000 ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม –โคบอลต์

3. ผลการศึกษาคุณภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่ง

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ พบว่าค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 2 ยกเว้นค่าซีไอดีเท่ากับ 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสีของน้ำที่ตรวจวัดได้เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์เท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ซึ่งเกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคน้ำที่กำหนดไว้ไม่เกิน 5-15 Pt-Co unit (การประปาส่วนภูมิภาค, 2553)

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบตะกอนเร่งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ

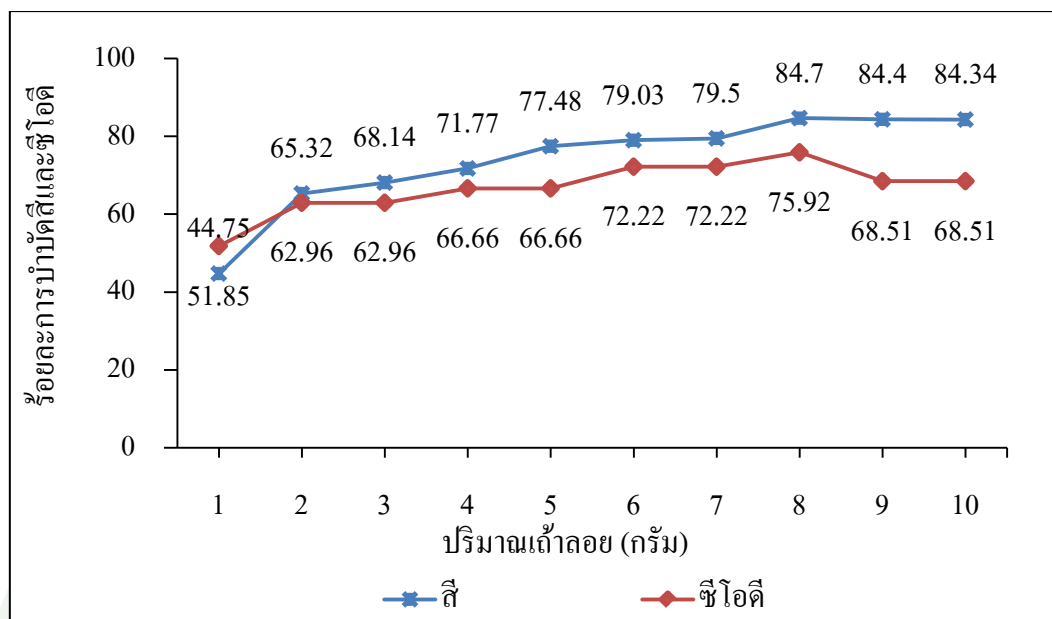
พารามิเตอร์	น้ำเสีย ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
พีเอช	8.7	5.5-9.0
EC (mS/cm.)	2.38	-
TDS (mg/L)	1,362	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (ppt.)	1.1	-
ความขุ่น (NTU)	31.7	-
บีโอดี (mg/L)	5.00	ไม่เกิน 20
ซีโอดี (mg/L)	172.80	ไม่เกิน 120

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าในส่วนของซีโอดีและสีของน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งแล้ว แต่ยังคงมีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงควรได้รับการบำบัดในลำดับขั้นต่อไป

4. ผลการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษด้วยถ้ำลอยและไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการทดลองแบบแบตช์ (Batch)

4.1 ผลการศึกษาปริมาณถ้ำลอย

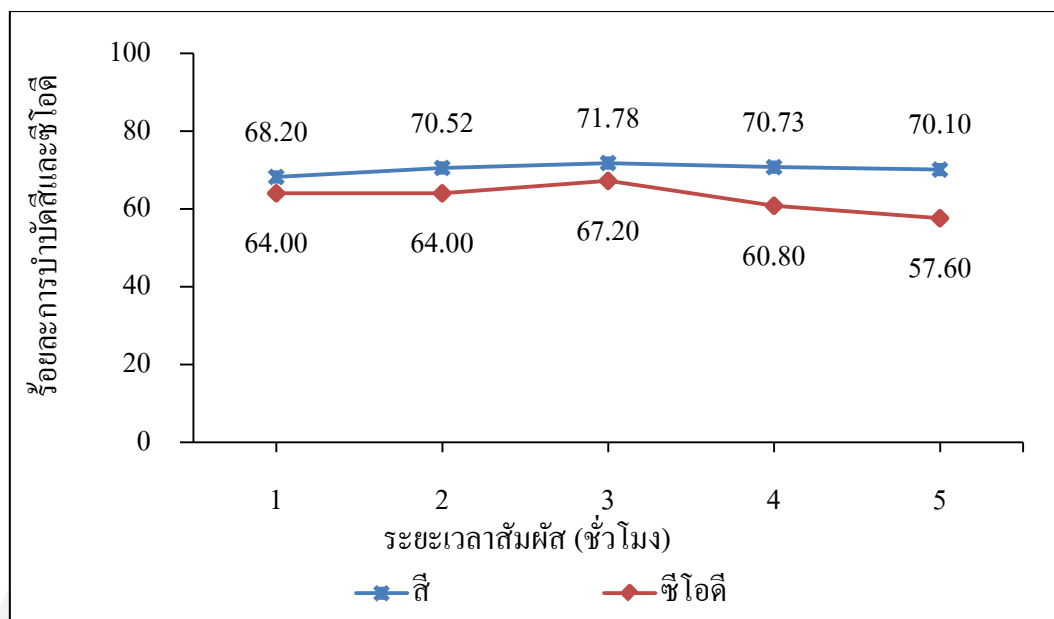
จากการทดลองเมื่อเพิ่มถ้ำลอยจำนวน 1,2,3,4,5,6,7,8,9 จนถึง 10 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ้ำลอยจนกระทั่งประสิทธิภาพคงที่และมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณถ้ำลอยเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสาร แต่ปริมาณมลสารที่ถ้ำลอยดูดซับไว้ได้จะมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการคายซับร่วมด้วย (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) โดยถ้ำลอยปริมาณ 8 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีของน้ำและซีโอดี ดีที่สุดคิดเป็นร้อยละ 84.70 และ 75.92 ตามลำดับ ดังภาพที่ 33



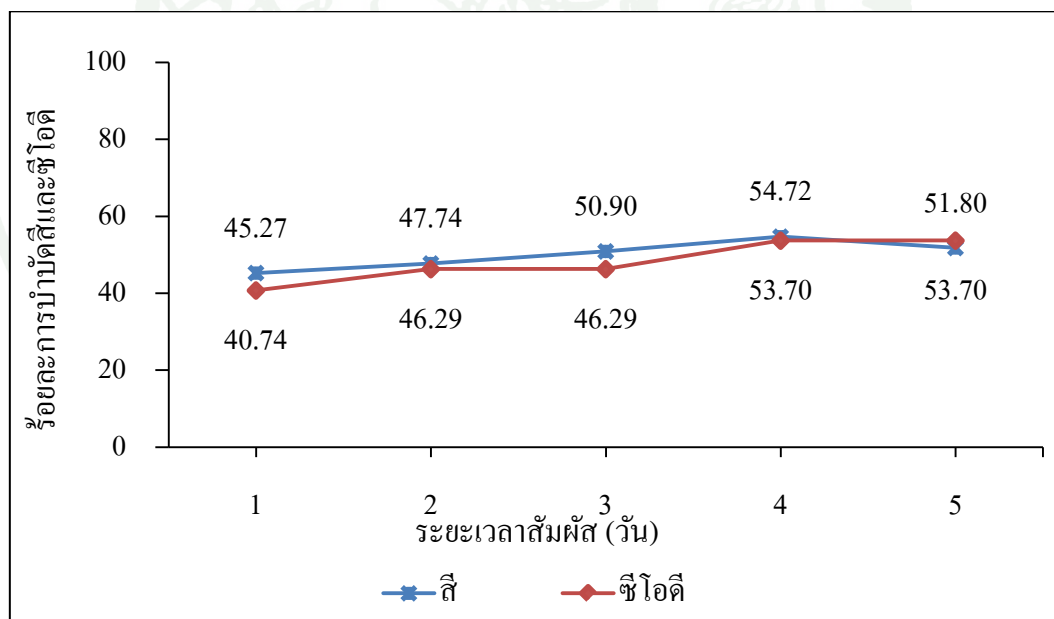
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีกับปริมาณแฉ่ำลอย

4.2 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัส

จากการทดลองโดยใช้ปริมาณแฉ่ำลอยเท่ากับปริมาณที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดจากข้อ 4.1 เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และแปรผันระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 1-5 ชั่วโมง และ 1-5 วัน พบว่าระยะเวลาที่ 3 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีดีที่สุด ร้อยละ 71.78 และ 67.20 ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 4 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีดีที่สุด ร้อยละ 54.72 และ 53.70 ตามลำดับ อธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาทำให้มลสารมีโอกาสสัมผัส หรือถูกดูดซับด้วยแฉ่ำลอยมากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับหรือแฉ่ำลอยมีปริมาณจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่ ดังภาพที่ 34 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมงให้ร้อยละการบำบัดทั้งสีของน้ำและซีไอดีดีกว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน อาจเนื่องมาจาก ระยะเวลาเป็นวันนั้นจะมีผลต่อตัวดูดซับที่ดูดซับมลสารในน้ำเสียไว้เป็นเวลานาน ทำให้พื้นที่ผิวหรือบริเวณที่ทำการดูดซับลดน้อยลง ดังนั้นการดูดซับจึงมีประสิทธิภาพน้อยกว่า ระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง



(ก.)

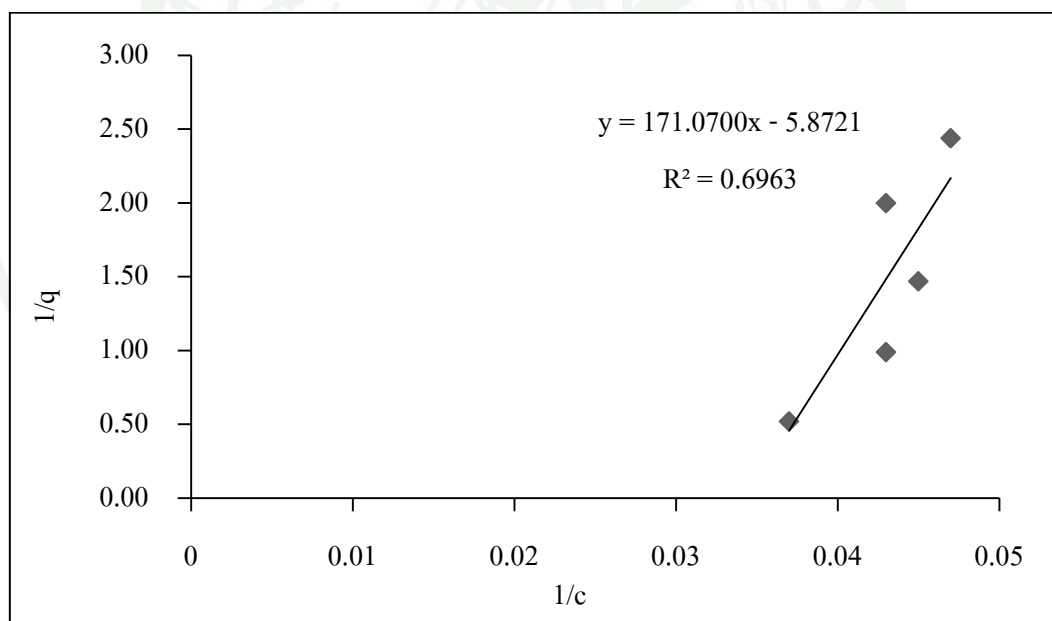


(ข.)

ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและคลอรีนกับระยะเวลาสัมผัสเป็น ชั่วโมง (ก.) และระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน (ข.)

4.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

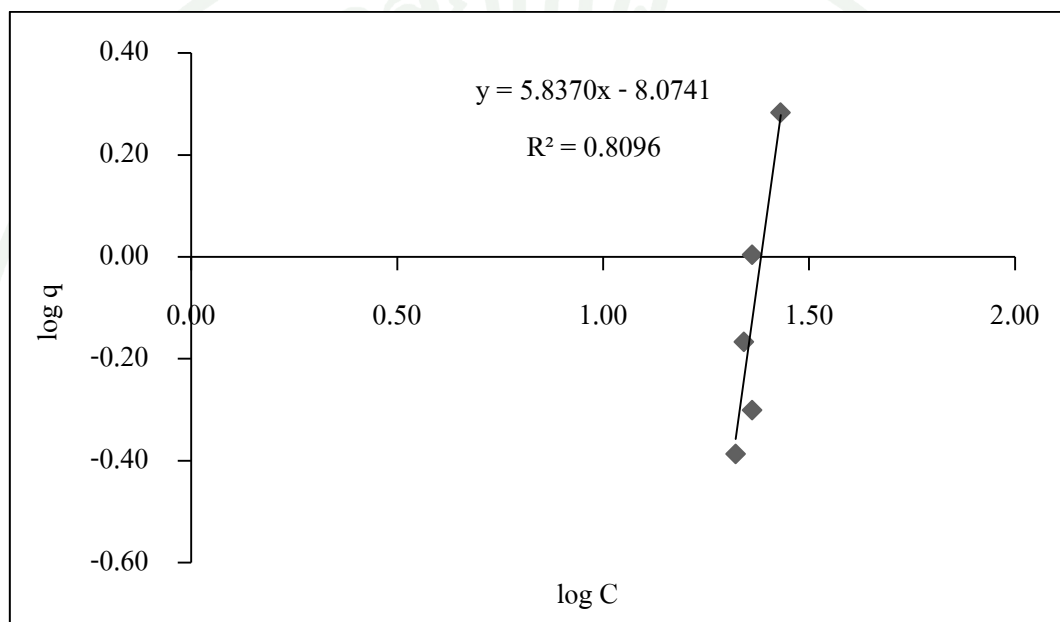
นำผลทดลองการศึกษาการดูดซับของถ้ำลอยมาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับของ แลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยแปรผันปริมาณถ้ำลอยต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมพัทธ์ เท่ากับ 3 ชั่วโมง เมื่อนำผลการศึกษาไปเข้าสมการการดูดซับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.6963 และ 0.8096 ดังภาพที่ 35 และภาพที่ 36 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ของไอโซเทอร์มฟรุนดลิชมีค่ามากกว่าของ แลงเมียร์ แสดงว่ากลไกการดูดซับของถ้ำลอยนี้สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยมีกลไกการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อ เดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่ โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ที่เป็นเช่นนี้ได้เพราะถ้ำลอยมี ลักษณะเป็นรูพรุน การดูดซับจึงเกิดในรูพรุนแบบซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 35 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับด้วยถ้ำลอย

จากภาพที่ 35 สมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์พบว่าจุดตัดแกน Y มีค่าติดลบ (-5.8721) ทำให้เส้นกราฟตัดแกน X ที่จุด $\frac{1}{C}$ มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นหมายถึง C ซึ่งเป็นความเข้มข้นของ

ตัวถูกดูดซับที่เหลือน้อยในสารละลายมีค่าน้อย ประกอบกับ ณ จุด $\frac{1}{q}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง q ซึ่งคือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า C ที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับหรือมลสารในน้ำเสียได้มาก ประกอบกับการทดลองมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่ จึงส่งผลให้ C มีค่าน้อยมากและ q มีค่ามากนั่นเอง

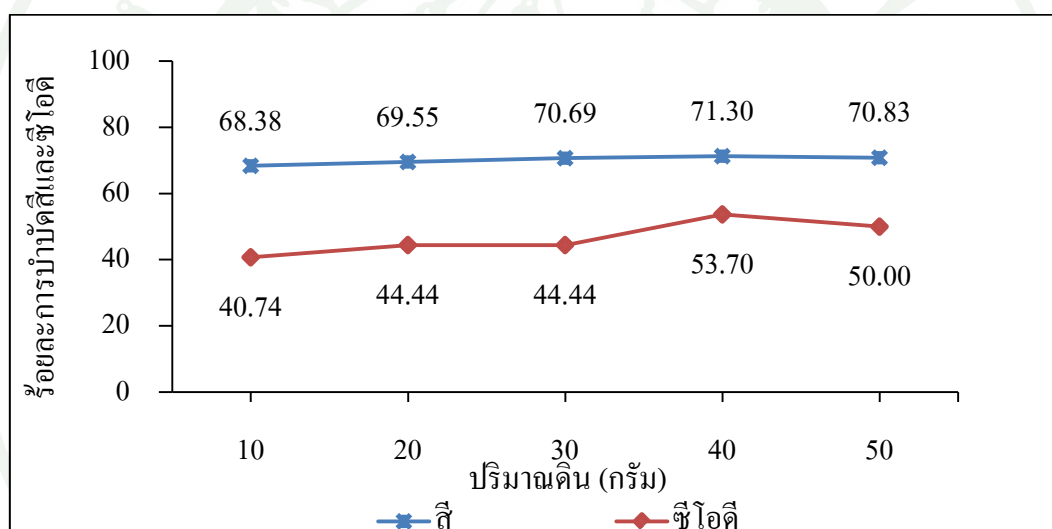


ภาพที่ 36 ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับด้วยถ้ำลอย

ส่วนไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับด้วยถ้ำลอย ในภาพที่ 36 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการไอโซเทอร์มฟรุนดิชที่ได้กับสมการไอโซเทอร์มฟรุนดิชทั่วไป คือ $\log q = \frac{1}{n} \log C + \log K$ พบว่า $\frac{1}{n}$ มีค่ามาก (ความชันมาก) แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของถ้ำลอยในทุกค่าความเข้มข้น (C) มีความสามารถสูง หรือกล่าวได้ว่าถ้ำลอยมีพื้นที่ผิวดูดซับปริมาณมาก (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.4 ผลการศึกษาปริมาณดิน

จากการทดลองเมื่อซังดิน 10,20,30,40 และ 50 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่าปริมาณดินที่ 40 กรัม ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ดีที่สุด คือร้อยละ 71.30 และ 53.70 ตามลำดับ ดังภาพที่ 37 อธิบายได้ว่า ในการเพิ่มปริมาณดินทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน จนกระทั่งคงที่และอาจลดลงเนื่องจากการคายซับร่วมด้วย ผลการทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าดินสามารถช่วยในการดูดซับมลสารในน้ำเสียได้เช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในดินเป็นตัวช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วย

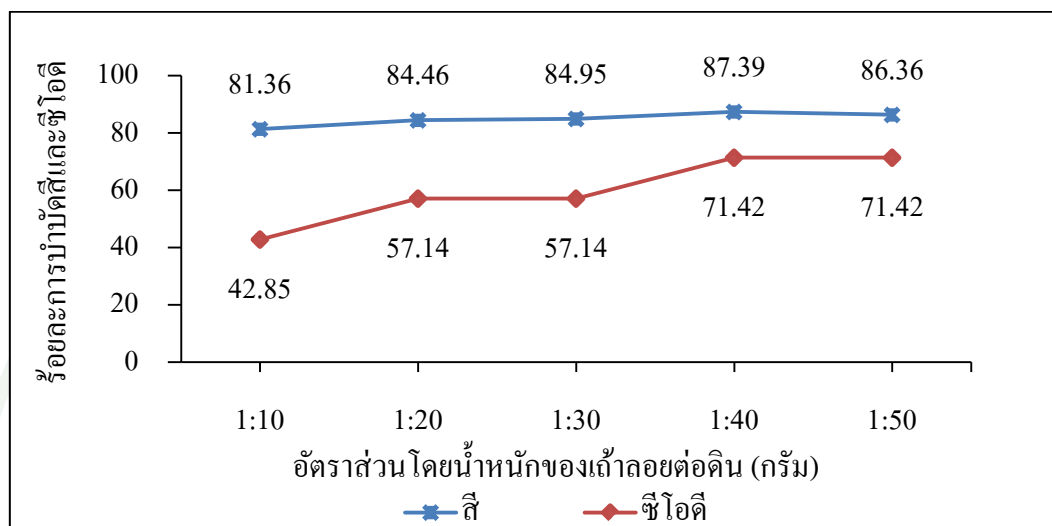


ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับปริมาณดิน

4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อดิน

จากการทดลองซึ่งแปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อดินที่ 1:10,1:20,1:30,1:40 และ 1:50 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งคงที่ โดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 87.39 และ 71.42 ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 1:40 ดังภาพที่ 38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดทั้งสีของน้ำและซีโอดีดีกว่าการ

ใช้ดินเพียงอย่างเดียว โดยที่ดิน 40 กรัม สามารถบำบัดสีและซีโอดีได้เพียงร้อยละ 71.30 และ 53.70 ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อดินที่อัตราส่วน 1:40 ในการวิจัยขั้นต่อไป



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อดิน

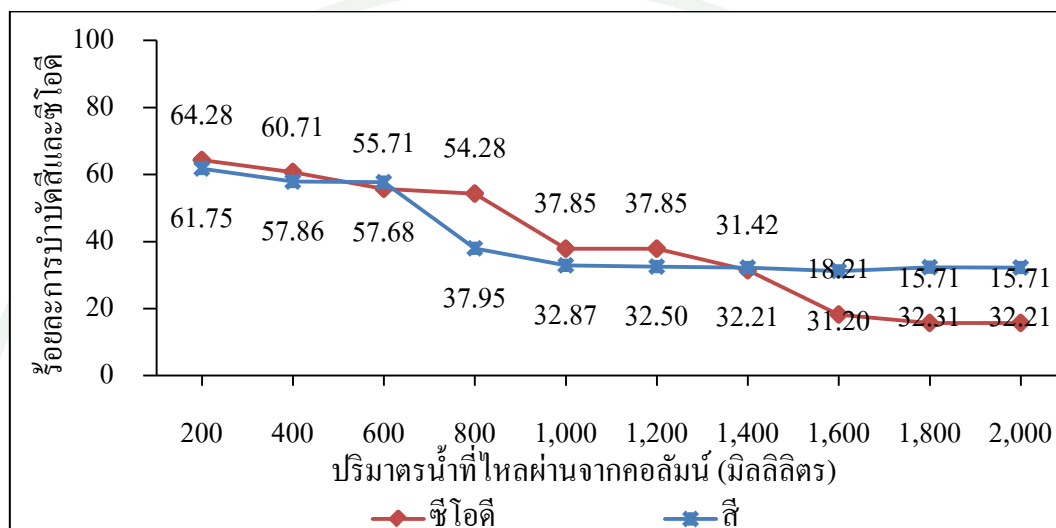
5. ศึกษาประสิทธิภาพของชั้นวัสดุเพาะปลูกในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียโดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดของชั้นวัสดุเพาะปลูก โดยทำการทดลอง 3 แบบ คือ ปล่อยให้ผ่าน แข่งขันน้ำเสีย 4 วัน ปล่อยให้แห้ง 3 วัน และแข่งขันน้ำเสีย 3 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 วิธีการแบบปล่อยให้ผ่าน

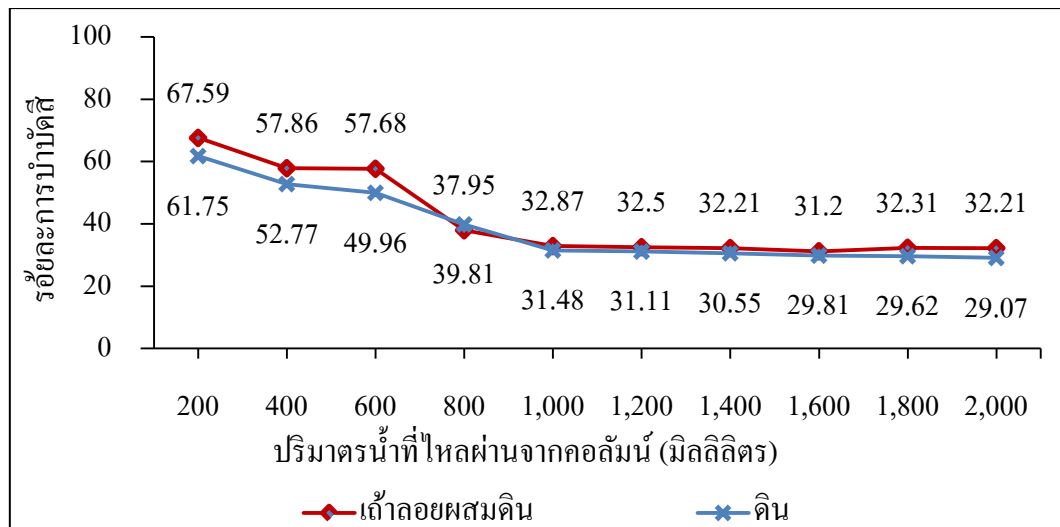
ทดลองโดยปล่อยให้ผ่านน้ำเสีย 2,000 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูกอย่างต่อเนื่อง แล้วเก็บตัวอย่างน้ำที่ไหลผ่านชั้นวัสดุปลูกทุก 200 มิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีในช่วงแรกจะมีค่าสูง เนื่องจากว่าตัวดูดซับหรือเถ้าลอยนั้นยังคงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมลสารได้

มาก โดยสามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ดีสุดที่ปริมาณน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร โดยค่าสีของน้ำเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ลดลงเหลือ 34.08 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 61.75 และสามารถบำบัดซีโอดีจากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 50.00 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการบำบัด 64.28 ดังภาพที่ 39

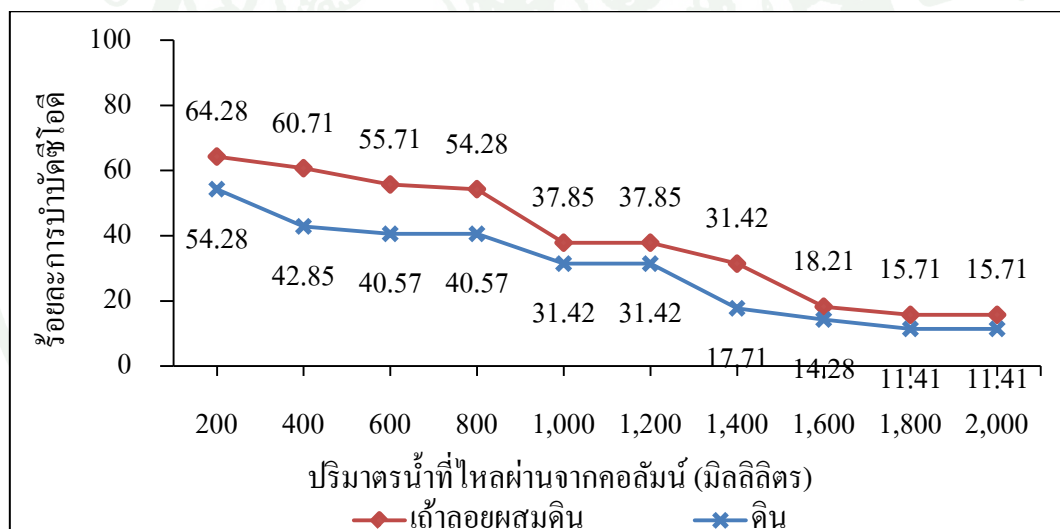


ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

นอกจากนี้ได้ทำการทดลองชุดควบคุมโดยชั้นบนสุดของวัสดุเพาะปลูกเป็นดินเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดกับการทดลองที่มีถ้ำลอยเป็นส่วนผสมกับดิน พบว่าคอลัมน์ที่มีถ้ำลอยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีกว่าชุดควบคุม โดยมีประสิทธิภาพคงที่มากกว่า และสามารถบำบัดน้ำได้ในปริมาณมากกว่า โดยในการบำบัดครั้งแรก คอลัมน์ที่มีถ้ำลอยผสมดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 5.84 และ 10.00 ดังภาพที่ 40 (ก) และ (ข) ตามลำดับ เนื่องมาจากถ้ำลอยที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีโพรงข้างใน ที่เรียกว่าซีโนสเฟีย (ปริญาญา, 2547) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ตัวอย่างหนึ่งของตัวดูดซับ ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงความสามารถในการดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้นโดยมลสารในน้ำเสียจะเข้าไปตามรูพรุนขนาดเล็กๆที่มีอยู่จำนวนมากในถ้ำลอย



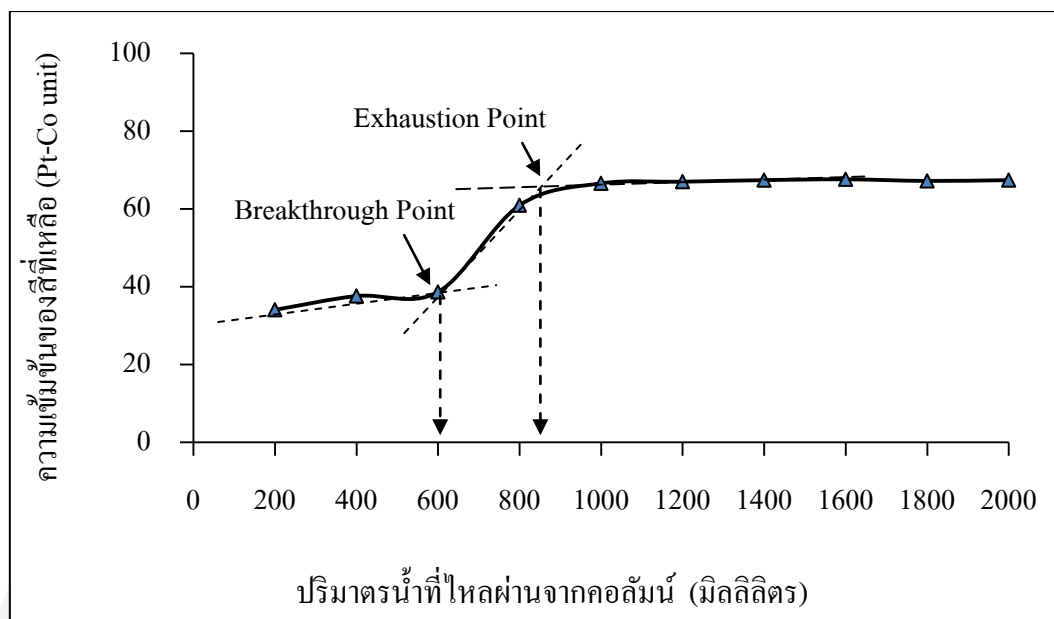
(ก.)



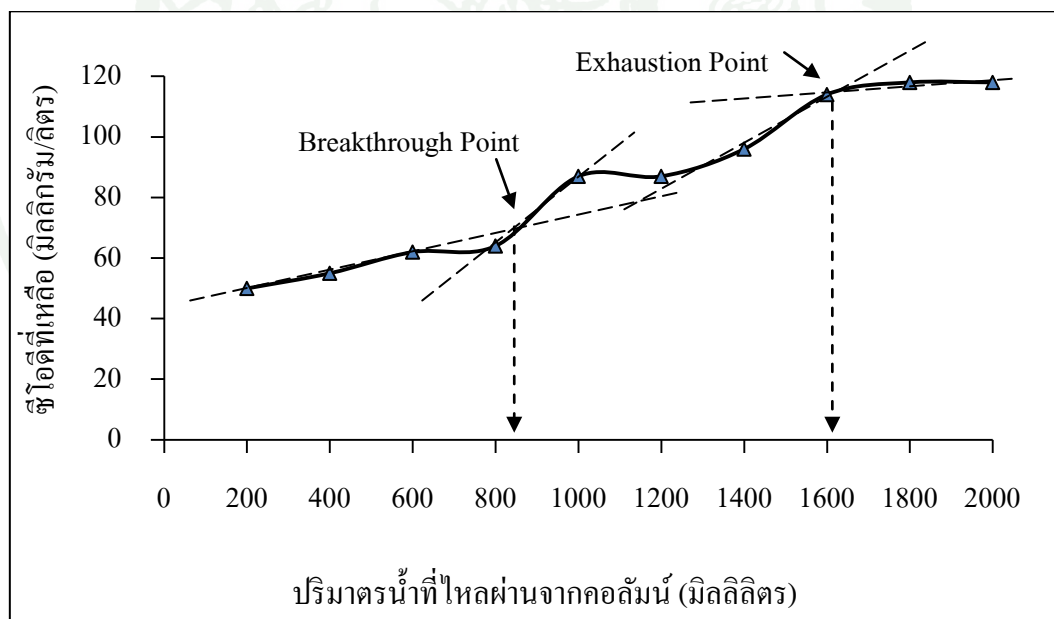
(ข.)

ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินเปรียบเทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว

ซึ่งในการทดลองด้วยวิธีการแบบคอลัมน์ เมื่อสร้างกราฟเบรคทูร์จ (Breakthrough curve) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีและซีไอดีที่เหลือในน้ำกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ เพื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านลอยได้ผลดังภาพที่ 41 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ พบว่าจุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ หรือจุดเบรคทูร์จ (Breakthrough point) คือ ที่ปริมาตรน้ำเสียถูกบำบัดไป 600 มิลลิลิตร สีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 38.66 Pt-Co unit และจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) ที่ปริมาตรน้ำเสียถูกบำบัดไป 820 มิลลิลิตร สีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 60.95 Pt-Co unit ต่อจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ ส่วนการบำบัดซีไอดีจุดเริ่มหมดสภาพ คือที่ ปริมาตรน้ำเสีย 820 มิลลิลิตร ซีไอดีเหลืออยู่เท่ากับ 64.00 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ คือที่ ปริมาตรน้ำเสียถูกบำบัดไป 1,600 มิลลิลิตร ซีไอดีเหลืออยู่เท่ากับ 114.50 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อจากนั้น ซีไอดีก็ยังคงถูกบำบัดต่อได้อีกอย่างคงที่



(ก.)

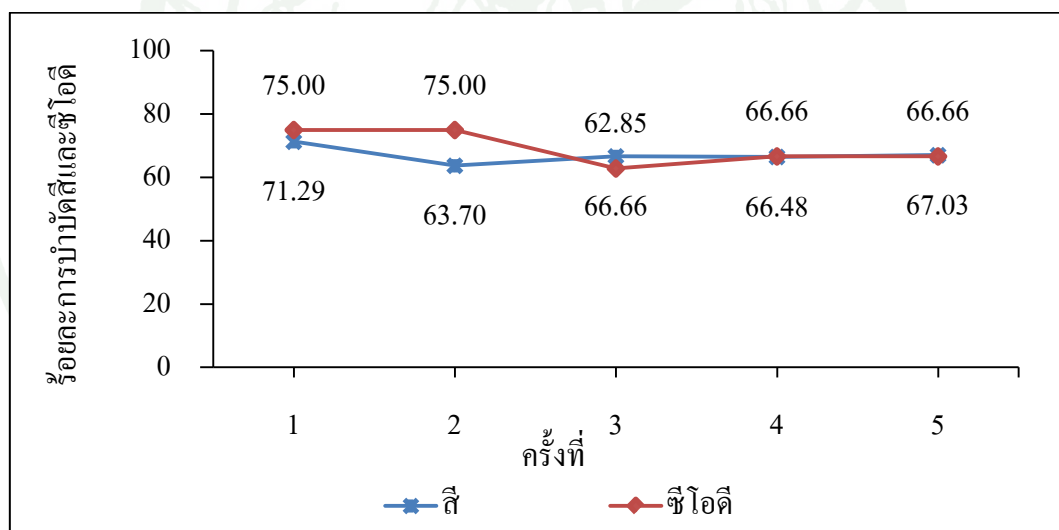


(ข.)

ภาพที่ 41 กราฟเบรคทรูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และสีไอดี (ข.) ที่เหลือของการทดลองด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์

5.2 แข่ง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน

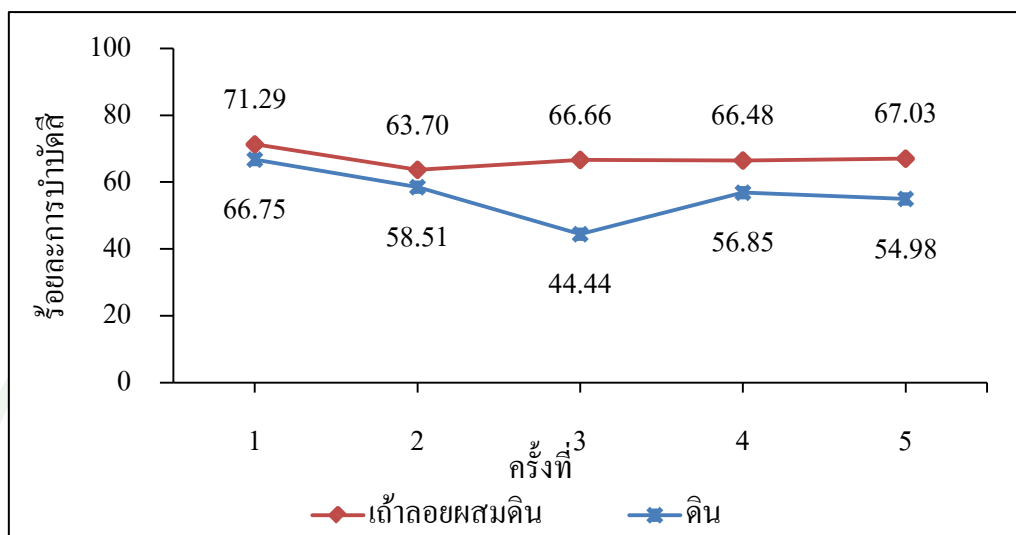
ทดลองโดยการแข่งน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก เป็นเวลา 4 วัน ปล่อยน้ำเสียออกจากคอลัมน์นำไปวิเคราะห์ และปล่อยให้วัสดุปลูกแห้ง 3 วันพบว่าในครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดค่าสีของน้ำเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ลดลงเหลือ 23.45 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 71.29 และสามารถบำบัดซีโอดี จากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการบำบัดเท่ากับ 75.00 ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อระยะเวลามากขึ้นหรือจำนวนครั้งของการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีจะลดลง โดยในครั้งแรกพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับ มลสารต่างๆยังมีมาก เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งถ้ำลอยและดินจะถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารต่างๆ ทำให้อัตราการดูดซับคงที่และอาจมีแนวโน้มลดลง ดังภาพที่ 42



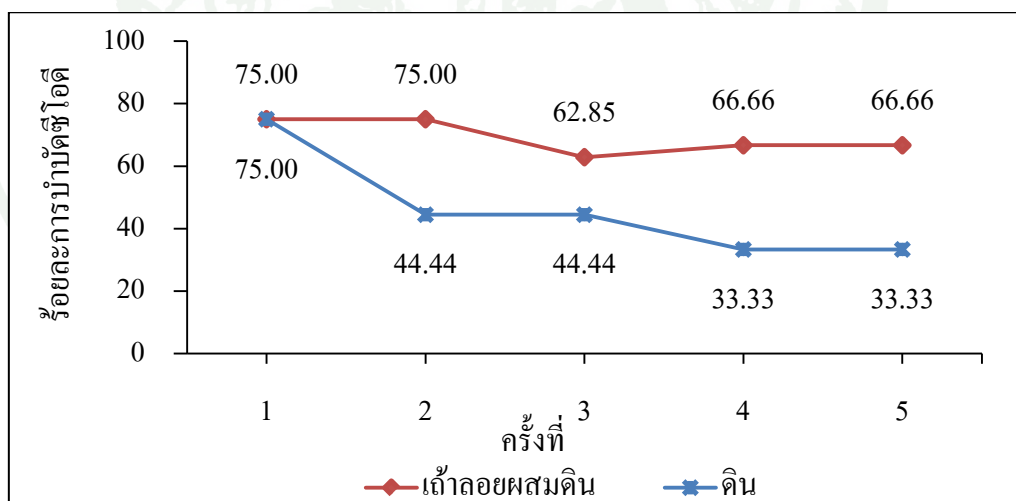
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแข่ง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

นอกจากนี้ได้ทำการทดลองหาค่าควบคุมโดยชั้นบนสุดของวัสดุเพาะปลูกเป็นดินเพียงอย่างเดียว ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.1 โดยครั้งแรกของการบำบัดสีของน้ำพบว่าคอลัมน์ที่มีถ้ำลอยผสมดินมีประสิทธิภาพมากกว่าคิดเป็นร้อยละ 4.54 และบำบัดซีโอดีในครั้งที่ 2

ได้มากกว่าร้อยละ 30.56 ดังภาพที่ 43 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และจะแตกต่างกันมากขึ้นในรอบการบำบัดต่อมา



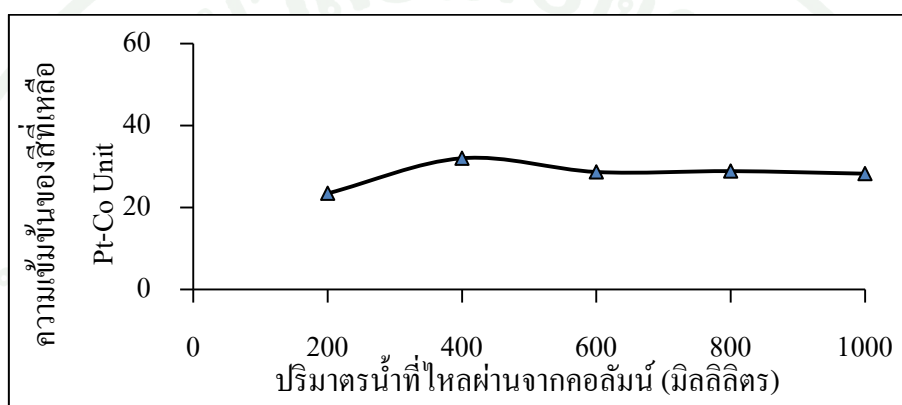
(ก.)



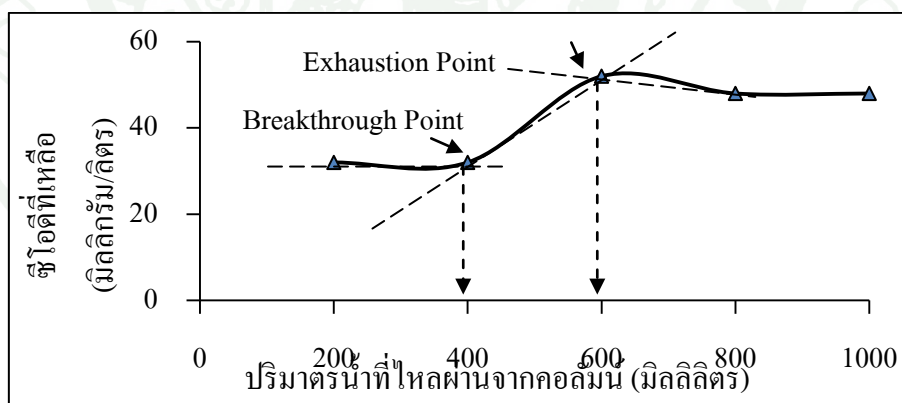
(ข.)

ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดดีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการแข่งขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน กับ ครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน เปรียบเทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว

เมื่อสร้างกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสีที่เหลือกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ ดังภาพที่ 44 (ก.) ซึ่งพบว่าไม่สามารถแสดงจุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับสีได้ เนื่องจากว่ามีช่วงการเก็บน้ำที่น้อย และภาพที่ 44 (ข.) จุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพ คือที่ปริมาณน้ำเสีย 400 มิลลิลิตร ซีไอดีเหลืออยู่เท่ากับ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ คือที่ปริมาณน้ำเสียถูกบำบัดไป 600 มิลลิลิตร ซีไอดีเหลืออยู่เท่ากับ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อจากนั้นซีไอดีก็ยังคงถูกบำบัดต่อไปได้อีกอย่างคงที่



(ก.)

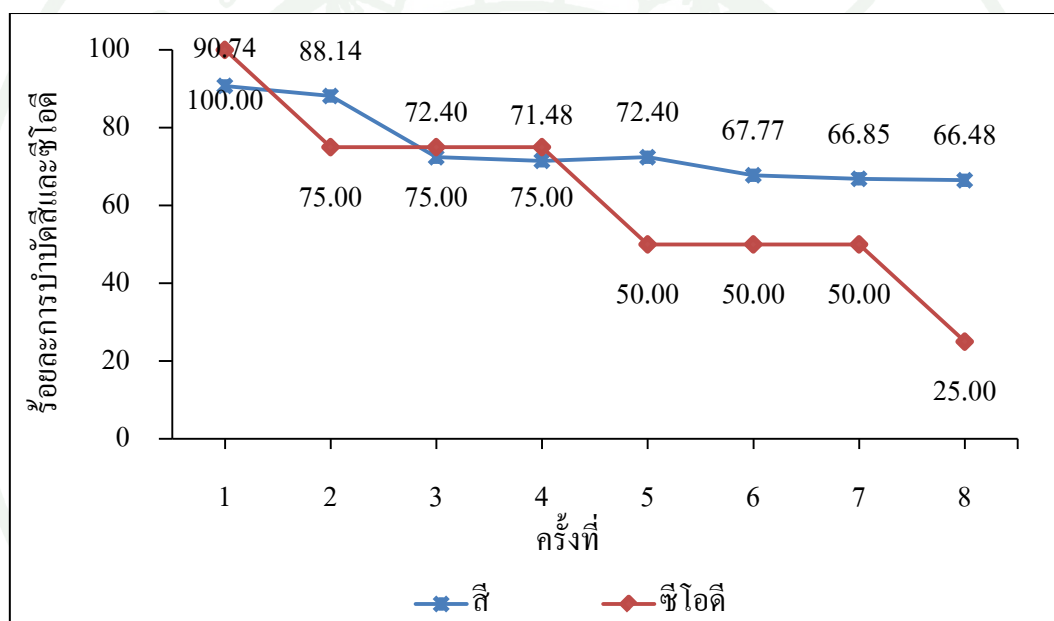


(ข.)

ภาพที่ 44 กราฟเบรคทรูจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) ที่เหลือของการทดลองด้วยวิธีการแช่แข็ง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วันกับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์

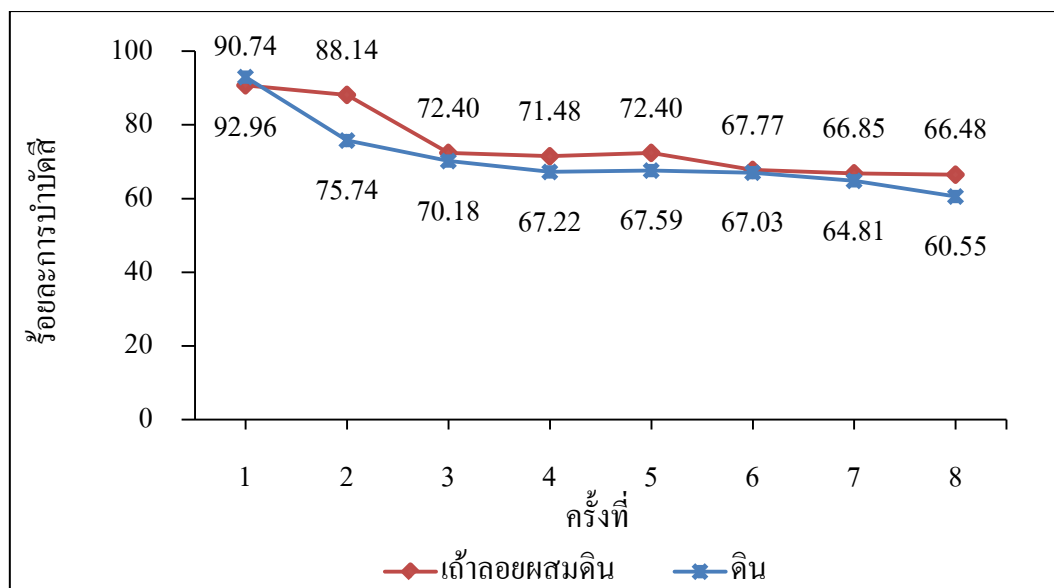
5.3 แข่งขัน 3 ชั่วโมง

ทดลองโดยการแข่งขันน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูก 3 ชั่วโมง ปล่อยน้ำเสียออกจากคอลัมน์และทำการทดลองซ้ำ พบว่าการบำบัดครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีดีที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดค่าสีของน้ำเริ่มต้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ลดลงเหลือ 1.58 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 90.74 และสามารถบำบัดซีโอดีจากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 0.00 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละการบำบัดเท่ากับ 100.00 ซึ่งอธิบายผลการทดลองได้เช่นเดียวกับข้อ 5.2 แสดงดังภาพที่ 45

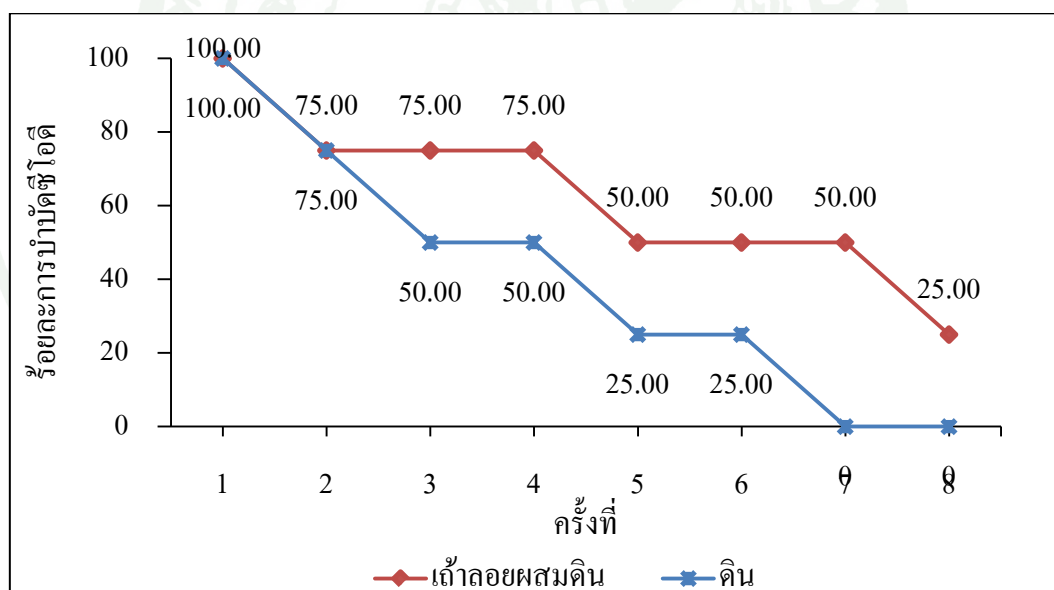


ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีด้วยวิธีการแข่งขัน 3 ชั่วโมง กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

สำหรับชุดควบคุมให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีน้อยกว่าเช่นเดียวกับการบำบัดแบบแข่งขันเป็นวัน โดยอธิบายผลได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.1 ซึ่งในครั้งแรกของการบำบัดสีของน้ำพบว่าคอลัมน์ที่มีถ้ำลอยผสมดินให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า คิดเป็นร้อยละ 2.22 ดังภาพที่ 46 (ก) และการบำบัดซีโอดีคิดในครั้งที่ 3 คิดเป็นร้อยละ 25.00 ดังภาพที่ 46 (ข) และจะต่างกันมากขึ้นในรอบการบำบัดต่อมา



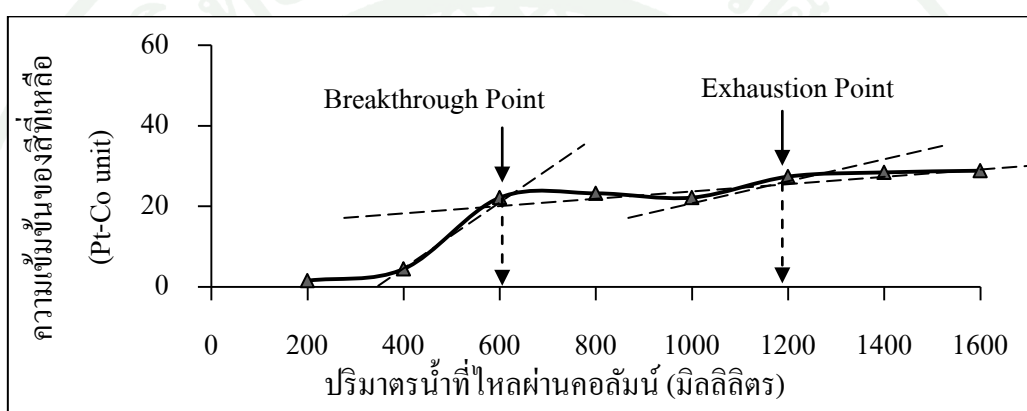
(ก.)



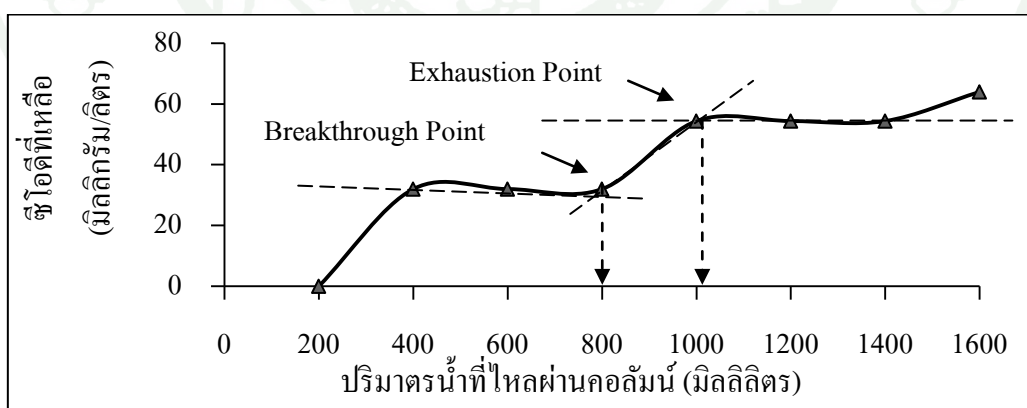
(ข.)

ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดดีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมงกับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสียของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินเปรียบเทียบกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว

เมื่อดูประสิทธิภาพการดูดซับของถ้ำลอยดังภาพที่ 47 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ พบว่า จุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพ หรือจุดเบรคทูรจ์ คือ ที่ปริมาณน้ำเสียถูกบำบัดไป 600 มิลลิลิตร สีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 22.20 Pt-Co unit และจุดหมดสภาพ ปริมาณน้ำเสียถูกบำบัดไป 1,200 มิลลิลิตร สีของน้ำเหลืออยู่เท่ากับ 27.41 Pt-Co unit ต่อจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดคงที่ ส่วนการบำบัดซีโอดีจุดเริ่มหมดสภาพ คือที่ปริมาณน้ำเสีย 800 มิลลิลิตร ซีโอดีเหลืออยู่เท่ากับ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร และจุดหมดสภาพ คือที่ปริมาณน้ำเสียถูกบำบัดไป 1,000 มิลลิลิตร ซีโอดีเหลืออยู่เท่ากับ 54.40 มิลลิกรัม/ลิตร ต่อจากนั้นซีโอดีก็ยังคงถูกบำบัดต่อไปได้อย่างคงที่



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 47 กราฟเบรคทูรจ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ที่เหลือของการทดลองด้วยวิธีการแซ่ง 3 ชั่วโมง กับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์

จากผลการทดลองการบำบัดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธีพบว่า วิธีการแบบปล่อยผ่านไปให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้น้อยกว่าวิธีการแบบแช่ขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน และแบบแช่ขัง 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าช่วงระยะเวลาของการสัมผัสกันระหว่างมลสารและตัวดูดซับมีระยเวลาน้อย ทำให้ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับมลสารในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในขณะที่การแช่ขังแบบ 3 ชั่วโมง จะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีได้ดีกว่า การแช่ขังแบบ 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากระยะเวลาการบำบัดแบบเป็นวันนั้น จะส่งผลต่อตัวดูดซับที่ดูดซับมลสารในน้ำเสียไว้เป็นเวลานาน ซึ่งเป็นผลให้พื้นที่ผิวหรือบริเวณที่ทำการดูดซับนั้นลดน้อยลง หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของตัวดูดซับลดลง ดังนั้น ประสิทธิภาพในการดูดซับมลสารในน้ำเสียจึงมีค่าน้อยกว่าระยะเวลาการบำบัดแบบ 3 ชั่วโมง

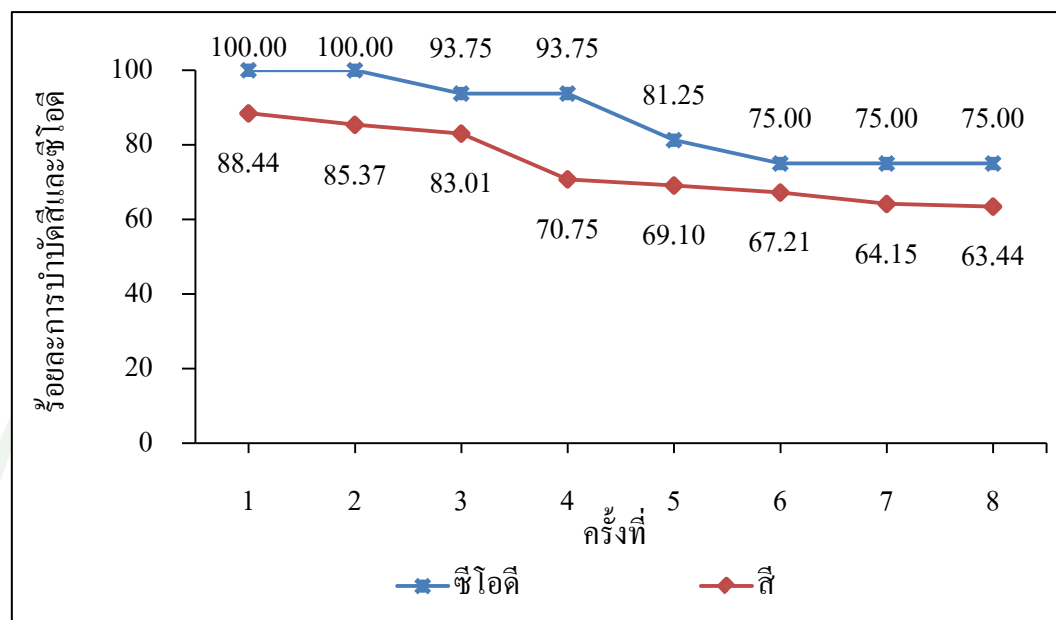
6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี โดยการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

ทำการทดลองโดยจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ในกระเบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร ที่บรรจุชั้นวัสดุปลูกเช่นเดียวกับการทดลองแบบคอลัมน์โดยชั้นบนเป็นถ้ำลอยผสมดินผสมผสานกับการปลูกพืชบำบัด 2 ชนิด คือ ทุปฤยั และหญ้ำแฝกในแต่ละกระเบะ และทำการทดลองหน่วยควบคุมโดยการใช้ดินเพียงอย่างเดียวและปลูกหญ้ำแฝก การบำบัดแช่ขังน้ำเสีย 20 ลิตร ในแต่ละกระเบะเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยน้ำออกทางด้านล่างกระเบะนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดได้ผลการทดลองดังนี้

6.1 กระเบะที่ปลูกทุปฤยั

ผลการทดลองพบว่าการบำบัดครั้งแรกมีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงที่สุด โดยบำบัดสีของน้ำเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ลดลงเหลือ 1.37 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 88.44 และสามารถบำบัดซีโอดี จากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการบำบัด 100.00 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ว่าใน 3 ชั่วโมงแรกหรือการบำบัดครั้งแรก ตัวดูดซับยังคงมีพื้นที่ผิวสัมผัสอยู่ปริมาณมาก จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆลดลง จนกระทั่งถึงครั้งที่ 6,7 และ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มคงที่ โดยยังคงบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 75.00 มีซีโอดีในน้ำเหลืออยู่ 64.00 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่

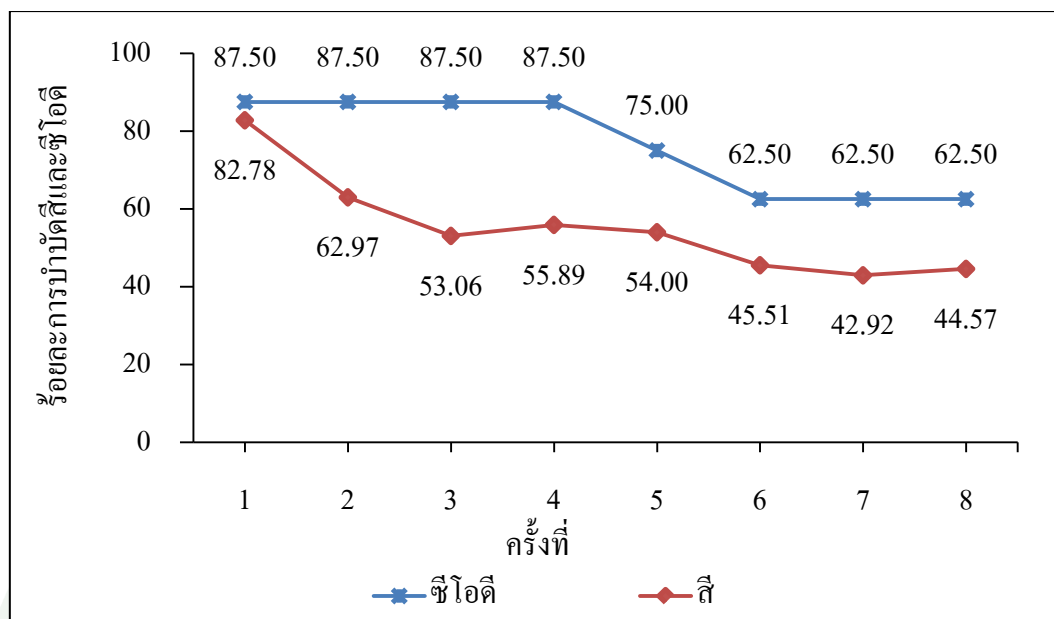
ควบคุม (120 มิลลิกรัม/ลิตร) แต่สีของน้ำมีค่าเกิน 15 Pt-Co unit ที่การบำบัดครั้งที่ 4 เท่ากับ 17.00Pt-Co unit ดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกธูปฤาษี

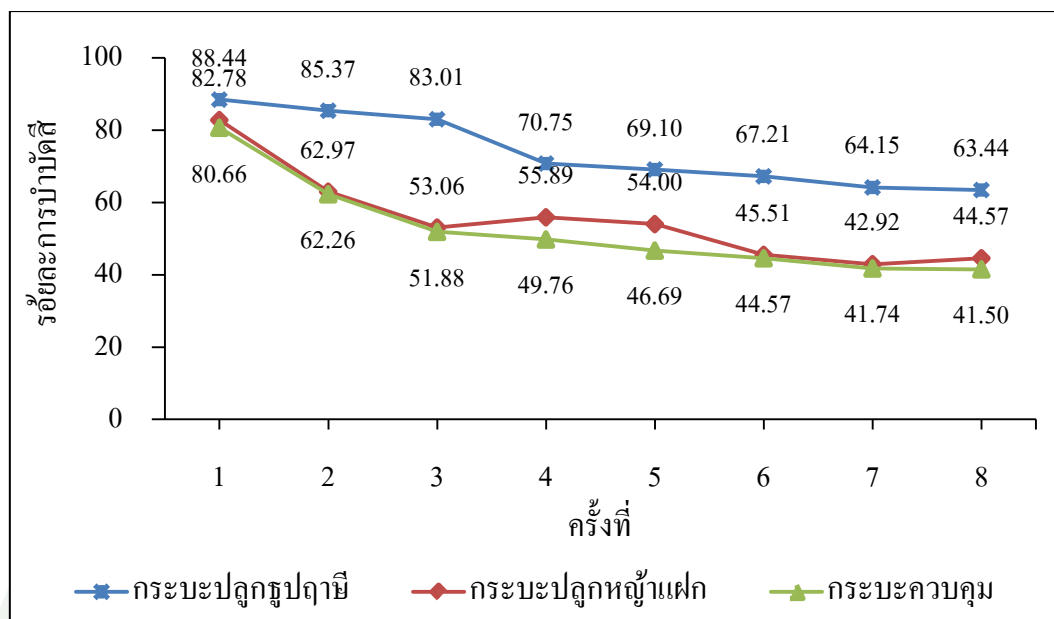
6.2 กระเบที่ปลูกหญ้าแฝก

ผลการทดลองพบว่าการบำบัดครั้งแรกมีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีดีที่สุด โดยบำบัดสีของน้ำเริ่มต้นซึ่งมีค่าเท่ากับ 79.50 Pt-Co unit ลดลงเหลือ 6.37 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 82.78 และสามารถบำบัดซีไอดี จากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการบำบัด 87.50 ตามลำดับ ซึ่งอธิบายผลได้เช่นเดียวกับข้อ 6.1 จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดค่อยๆลดลง จนกระทั่งถึงครั้งที่ 6,7 และ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดเริ่มคงที่ โดยยังคงบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 62.50 มีซีไอดีในน้ำเหลืออยู่ 96.00 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่ควบคุม ส่วนสีของน้ำมีค่าเกิน 15 Pt-Co unit ที่การบำบัดครั้งที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.87 Pt-Co unit คิดเป็นร้อยละการบำบัด 62.97 ดังภาพที่ 49

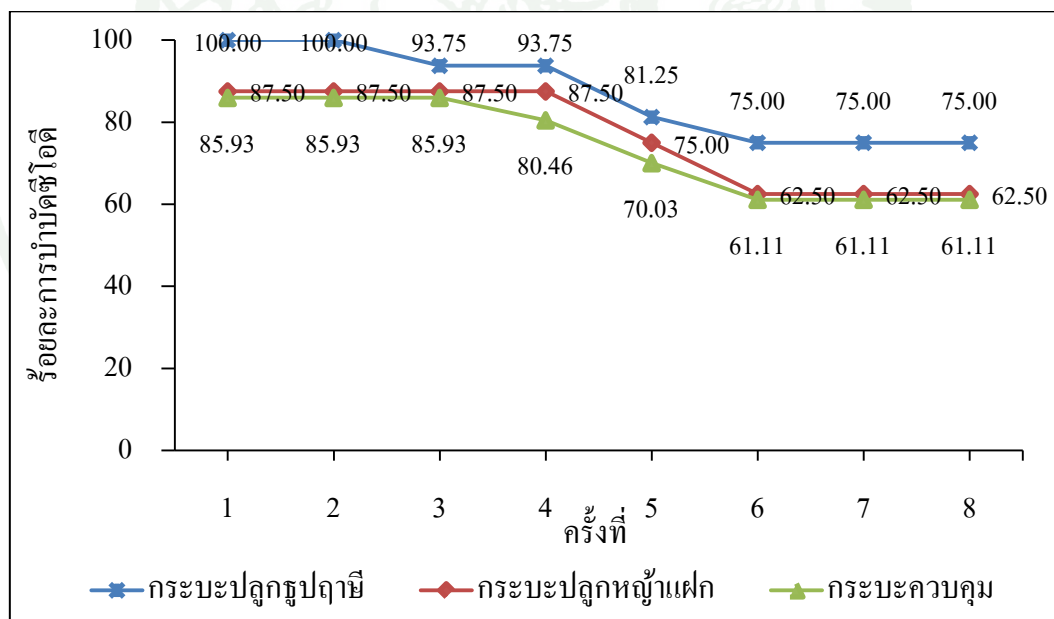


ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดีของน้ำและซีไอดีด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระบะปลูกกล้วยไม้

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของรูปถ้ำและกล้วยไม้ พบว่ารูปถ้ำให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่ากล้วยไม้ เป็นพืชที่สามารถทนต่อความเป็นกรดต่างและความเค็มได้ดี มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร และโลหะหนักได้ในปริมาณสูง มีลำต้นใต้ดินเป็นแบบ Rhizome (สุภาพร และพิสนุย์, 2535) ประกอบกับกระบะที่ทำการเพาะปลูกในการทดลองนั้นมีการเจริญเติบโตของรูปถ้ำ แตกหน่อมากกว่ากล้วยไม้ และด้วยคุณลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของรูปถ้ำนั้น คือ ภายในลำต้นมีคุณสมบัติในการดูดน้ำและธาตุอาหารเปรียบดั่งเซลล์ฟองน้ำ (สุมล, 2557) และรากที่มีขนาดใหญ่กว่ากล้วยไม้ นั้น จึงช่วยเอื้อประโยชน์ต่อพืชได้สูง ซึ่งเมื่อถ้ำลอยดูดซับมลสารต่างๆไว้ในรูปของสารอินทรีย์วัตถุและจุลินทรีย์นั้นจะเปลี่ยนรูปอินทรีย์วัตถุเป็นอนินทรีย์วัตถุ จากนั้นรากก็จะสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ และด้วยน้ำเสียซึ่งผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งมาแล้ว ทำให้เหลือเพียงสารอินทรีย์ หรือ มลสารอื่นๆที่มีขนาดเล็ก จึงเป็นผลให้กระบะที่ปลูกรูปถ้ำมีประสิทธิภาพการดูดซับซีไอดีและซีไอดีของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษได้ดีกว่าหน่วยทดลองอื่น ดังภาพที่ 50 (ก.) และ (ข.)



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 50 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) กับครั้งที่ที่ปล่อยผ่านจากกระบะปลูกหญ้าม้า หญ้าแฝก และกระบะควบคุม

7. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์จำลองโดยใช้ถ้ำลอยผสมกับดิน

คุณภาพน้ำหลังการบำบัดด้วยวิธีการจำลองระบบแบบบึงประดิษฐ์โดยใช้ถ้ำลอยผสมกับดินร่วมกับปลูกจุลินทรีย์ และหญ้าแฝก โดยกระบวนที่ปลูกจุลินทรีย์ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี คิดเป็นร้อยละ 88.44 และ 100.00 ตามลำดับ และหญ้าแฝก ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 82.54 และ 87.50 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นของน้ำเสีย จุลินทรีย์และหญ้าแฝกสามารถบำบัดค่าสีของน้ำจากเริ่มต้น 79.50 Pt-Co unit เหลือ 1.37 และ 6.37 Pt-Co unit ตามลำดับ และสามารถบำบัดค่าซีโอดีจากเริ่มต้น 172.80 มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร และ 32.00 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งและหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมกับดินร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก และจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์ น้ำเสียที่ผ่านระบบ Activated Sludge	ผลวิเคราะห์น้ำเสีย หลังผ่านการบำบัด ด้วยระบบบึงประดิษฐ์			มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม
		หญ้าแฝก	จุลินทรีย์	ชุด ควบคุม	
พีเอช	8.7	8.9	8.9	8.8	5.5-9.0
EC (mS/cm.)	2.38	2.75	2.58	2.55	-
TDS (mg/L)	1,362	1,820	1,670	1,600	ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (ppt.)	1.1	4.0	3.1	2.50	-
ความขุ่น (NTU)	31.70	45.85	42.50	48.35	-
ซีโอดี (mg/L)	172.80	32.00	0.00	36.00	ไม่เกิน 120
สี Pt-Co Unit	79.50	6.37	1.37	8.25	5-15

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเชื้อและกระดาษชั้นดียว โดยมี การนำเถ้าลอยซึ่งได้จากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์ 90% และชีวมวล 10% มาผสมกับดินเพื่อใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกร่วมกับ กรวด ทราบหยาบ ทราบละเอียด และปลูกพืชที่ใช้ บำบัดคือ ฐูปฤาษี และหญ้าแฝก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การ ทดลองแบบเบตซ์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ขั้นตอนที่ 2 การทดลองแบบคอลัมน์เพื่อจำลองชั้น วัสดุเพาะปลูก และขั้นตอนที่ 3 การจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์

ในการทดลองแบบเบตซ์พบว่า เถ้าลอยปริมาณ 8 กรัม ต่อ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และที่ ระยะเวลาสัมผัส 3 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 71.78 และ 67.20 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อปริมาณดินที่เหมาะสม คือ 1:40 กรัม สามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ร้อยละ 87.39 และ 71.42 ตามลำดับ โดยมี ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรอนดิช และจากการทดลองแบบคอลัมน์ ซึ่ง เป็นการศึกษากิจกรรมของชั้นวัสดุเพาะปลูก พบว่าการแช่งน้ำเสียไว้ 3 ชั่วโมง ในครั้งแรก ของการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีมีประสิทธิภาพดีที่สุด คิดเป็นร้อยละ 90.74 และ 100.00 ตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการแช่งน้ำเสียไว้เป็นเวลา 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน (ร้อยละ 71.29 และ 75.00 ตามลำดับ) และการปล่อยผ่านแบบต่อเนื่อง (ร้อยละ 61.75 และ 64.28 ตามลำดับ) ส่วนการทดลอง การบำบัดแบบประยุกต์โดยการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิด คือ ฐูปฤาษี และหญ้าแฝก พบว่าพืชทั้ง 2 ชนิด ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีใกล้เคียงกันคิดเป็นร้อย ละ 82.78 และ 87.50 ตามลำดับ และบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 88.44 และ 100.00 ตามลำดับ โดยที่ ฐูปฤาษีนั้นให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีที่สูงกว่าคิดเป็นร้อยละ 5.66 และ 12.50 ตามลำดับ โดยสามารถบำบัดค่าสีของน้ำเริ่มต้นจาก 79.50 เหลือ 1.37 Pt-Co unit และบำบัด ซีโอดี จาก 172.80 เหลือ 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับชุดควบคุมที่ชั้นบนสุดของวัสดุเพาะปลูกจะใช้ดิน เพียงอย่างเดียว พบว่าให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าระบบที่ใช้เถ้าลอยผสมดิน โดยระบบที่ ใช้ เถ้าลอยผสมดินนั้นสามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้มากกว่าชุดควบคุมประมาณร้อยละ 8-2

และ 5-10 ตามลำดับ ดังนั้นการผสมเก๋าลอยร่วมกับวัสดุเพาะปลูกจึงช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียดีขึ้น เนื่องจากเก๋าลอยมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นตัวดูดซับมลสาร ประกอบไปด้วยโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมาก ในขณะที่รูปถ่าย เป็นพืชที่โครงสร้างภายในมีคุณสมบัติในการดูดน้ำและธาตุอาหารทำให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ขนาดเล็กในน้ำเสียไปใช้ในการเจริญเติบโตได้มากขึ้น ขณะเดียวกันดินก็มีจุลินทรีย์ตามธรรมชาติช่วยย่อยสลายโมเลกุลของสีให้หมดได้ ถึงแม้ว่าระบบบำบัดแบบธรรมชาตินี้จะช่วยลดค่าสีของน้ำและซีไอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังพบข้อด้อยของระบบที่เป็นผลให้ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นสูงขึ้นกว่าค่าวิเคราะห์น้ำเสียเริ่มต้น เนื่องมาจากชั้นวัสดุเพาะปลูกมีการชะล้างเจือปนและสารอินทรีย์ออกมา ดังนั้นจากการทดลองและเหตุผลดังกล่าวไป แสดงให้เห็นได้ว่า เก๋าลอยมีประสิทธิภาพที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ได้ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิ เพื่อบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษที่ยังคงมีปัญหาเรื่องสีและค่าซีไอดีอยู่ หลังจากการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบตะกอนเร่งแล้ว

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการใช้ประโยชน์เก๋าลอยและระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์สำหรับการบำบัดขั้นตติยภูมิของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ควรมีการศึกษาตัวดูดซับประเภทอื่นๆ ที่สามารถจะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษร่วมกับระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ และศึกษานำเก๋าลอยไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่นๆ เช่นน้ำเสียชุมชน เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับการใช้ระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์กับโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากจำเป็นต้องใช้พื้นที่เยอะ
3. ควรศึกษาหาวิธีการพัฒนาความเป็นไปได้ในการลดค่าพารามิเตอร์ประเภทอื่นๆ เช่น ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความเค็ม เป็นต้น เนื่องจากว่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นภายหลังการบำบัด เพราะเกิดจากการชะล้างสิ่งปนเปื้อนออกมามาก

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. คู่มือการออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2541. การปลูกหญ้าแฝกเพื่อการฟื้นฟูทรัพยากรดินและสภาพแวดล้อม. สถาบันวิจัยและพัฒนาหญ้าแฝก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ
- กรมอุทยานแห่งชาติสัตว์ป่าและพันธุ์พืช. 2554. สารานุกรมพืช. ฐปถายี. แหล่งที่มา: <http://web3.dnp.go.th>, 16 ตุลาคม 2557.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- การประปาส่วนภูมิภาค. 2553. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค. ค่ามาตรฐานน้ำที่โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: <http://www.pwa.co.th/document/spec.html>, 17 ตุลาคม 2557.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. สยามสเคชั่นเนอริชฟฟลายนส์, กรุงเทพฯ.
- ดวงพร สุวรรณกุล และ รังสิต สุวรรณเขตนิคม. 2544. วัชพืชในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เด่นพงษ์ โพธิ์สวัสดิ์ และ กฤติยา เลิศโกยะสมบัติ. 2551. การศึกษาการลดสีน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัดของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษด้วยเถ้าหนักและเถ้าลอยโดยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ธีรวัฒน์ สินศิริ. 2554. ผลกระทบของความละเอียดเถ้าถ่านหินต่อปฏิกิริยาปอซโซลานในเพสต์. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 9(1): 40-48.

นิพนธ์ ตั้งคณาภิรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณาภิรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สยามคราฟท์อุตสาหกรรมจำกัด. 2556. ข้อมูลน้ำเสียและการบำบัดน้ำเสีย. ระบบบำบัดน้ำเสีย. แหล่งที่มา: <http://www.siamkraft.com>, 15 ตุลาคม 2557.

ปริญญา จินดาประเสริฐ. 2547. เถ้าลอยในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง). พิมพ์ครั้งที่ 1. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

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

วรวิมล มัชยัณต์, โสภกา วิศิษฐ์ศักดิ์ และ โจเซฟ เคดารี. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพบดลือกดินดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. แหล่งที่มา: http://rdi.ku.ac.th/kasetresearch54/GroupEconomic/43-Worawut_mat/template.html, 28 ตุลาคม 2556.

สถาบันวิจัยและพัฒนาห้วยแฝก. 2554. พันธุ์หญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2542. พรรณไม้ในในประเทศไทย. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ. น.166.

สุภาพร จันรุ่งเรือง และ พิสนุย์ จัตุวาพรวนิช. 2535. ศึกษาศักยภาพการใช้รูปถ่ายในการบำบัดน้ำเสีย. สำนักพิมพ์รวมสาสน์, กรุงเทพฯ.

ศุภมล นิลรัตน์นิสากร. 2557. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยต้นรูดฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.

สำนักงานเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม. 2546. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

อารยา เจริญวิทยานนท์ และ วริดา บุญวงศ์. 2554. การใช้ประโยชน์จากต้นกกและรูดฟ้าเป็นตัวดูดซับในกระบวนการดูดซับ Ni^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} . วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อัญชลี สุวรรณมณี. 2548. การใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพและเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Boyd, C. 1970. Vascular aquatic plants for mineral nutrients removal from polluted water. **Econ.**(2444): 94-103.

Bryce, J. 1980. Sulfite pulping. **Econ.**(1255): 291-376.

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

Kartesz, J. 2002. **Typha angustifolia**. **Integrated Taxonomic Information System (ITIS)**. Available Source : <http://www.itis.usda.gov/inex.html>. September 20, 2002.

Long, Y., W. Yufei, M. Hongzhu, H. Zhiping, Z. Qiang and C.Yashao. 2012. Feasibility of fly ash-based composite coagulant for coal washing wastewater treatment. **Hazardous Materials**. 203: 221-228.

Majlinda, N., D. Nexhat, D. Zeneli, S. Gashi and D.Hoxha. 2011. Coal ash as adsorbent for heavy metal ions in standard solutions industrial wastewater and streams.

Ecohydrology Hydrobiology. 11: 129-132.

Weber, Jr., L. Kuang and J. Walter. 1981. Characterization of Mass Transfer Parameters for Adsorber Modeling and Design. **Water Pollution Control Federation.**53(10): 1541-1548

Wirojanagud, W., N. Supachaisakorn and A. Boonpoke. 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.



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับปริมาณแฉะลอย

ปริมาณแฉะลอย (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.824	0.820	0.822	44.75
2	0.517	0.515	0.516	65.32
3	0.470	0.478	0.474	68.14
4	0.420	0.420	0.420	71.77
5	0.335	0.335	0.335	77.48
6	0.314	0.310	0.312	79.03
7	0.305	0.305	0.315	79.50
8	0.227	0.227	0.227	84.70
9	0.232	0.233	0.232	84.40
10	0.233	0.233	0.233	84.34

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับปริมาณแฉะลอย

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการบำบัด
1	51.85
2	62.96
3	62.96
4	66.66
5	66.66
6	72.22
7	72.22
8	75.92
9	68.51
10	68.51

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.149	0.153	0.151	68.20
2	0.141	0.139	0.140	70.52
3	0.139	0.135	0.137	71.78
4	0.140	0.139	0.139	70.73
5	0.142	0.142	0.142	70.10

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละการบำบัด
1	64.00
2	64.00
3	67.20
4	60.80
5	57.60

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับระยะเวลาสัมผัส (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.243	0.244	0.243	45.27
2	0.235	0.230	0.232	47.74
3	0.218	0.219	0.219	50.90
4	0.203	0.200	0.200	54.72
5	0.214	0.214	0.214	51.80

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีกับระยะเวลาสัมผัส (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละการบำบัด
1	40.74
2	46.29
3	46.29
4	53.70
5	53.70

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับปริมาณดิน

ปริมาณดิน (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
10	0.464	0.477	0.4705	68.38
20	0.451	0.455	0.453	69.55
30	0.432	0.440	0.440	70.69
40	0.425	0.430	0.427	71.30
50	0.435	0.433	0.434	70.83

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีกับปริมาณดิน

ปริมาณดิน (กรัม)	ร้อยละการบำบัด
10	40.74
20	44.44
30	44.44
40	53.70
50	50.00

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ
 ฝ้าลอยต่อดิน

อัตราส่วนโดย น้ำหนัก ฝ้าลอย:ดิน	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1:10	0.346	0.340	0.343	81.36
1:20	0.285	0.288	0.286	84.46
1:30	0.274	0.280	0.277	84.95
1:40	0.232	0.235	0.232	87.39
1:50	0.253	0.250	0.251	86.36

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอติกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของฝ้า
 ลอยต่อดิน

อัตราส่วน โดยน้ำหนัก ฝ้าลอย:ดิน	ร้อยละการบำบัด
1:10	42.85
1:20	57.14
1:30	57.14
1:40	71.42
1:50	71.42

ตารางผนวกที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ้ำลอย

ปริมาณถ้ำลอย (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	Log q	Log C
2	104	27	0.05	1.920	0.520	0.037	0.283	1.431
4	104	23	0.05	1.010	0.990	0.043	0.004	1.362
6	104	22	0.05	0.680	1.470	0.045	-0.167	1.342
8	104	23	0.05	0.500	2.000	0.043	-0.301	1.362
10	104	21	0.05	0.410	2.440	0.047	-0.387	1.322

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่านกับ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
200	0.165	0.248	0.206	61.75
400	0.216	0.231	0.223	57.86
600	0.224	0.233	0.228	57.68
800	0.328	0.342	0.335	37.95
1,000	0.364	0.361	0.362	32.87
1,200	0.365	0.364	0.364	32.50
1,400	0.367	0.365	0.366	32.21
1,600	0.367	0.368	0.367	31.20
1,800	0.369	0.362	0.365	32.31
2,000	0.367	0.365	0.366	32.21

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแบบปล่อยผ่าน กับปริมาณน้ำที่ไหลผ่านจากคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ปริมาณน้ำ(มิลลิลิตร)	ร้อยละการบำบัด
200	64.28
400	60.71
600	55.71
800	54.28
1,000	37.13
1,200	37.13
1,400	31.42
1,600	17.71
1,800	15.71
2,000	14.28

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วัน ปล่อยแห้ง 3 วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.155	0.155	0.155	71.29
2	0.195	0.198	0.196	63.70
3	0.180	0.180	0.180	66.66
4	0.183	0.180	0.181	66.48
5	0.178	0.178	0.178	67.03

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 4 วันปล่อย
แห้ง 3 วัน กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ครั้งที่	ร้อยละการบำบัด
1	75.00
2	75.00
3	62.85
4	66.66
5	66.66

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมง กับ
ครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.050	0.050	0.050	90.74
2	0.063	0.066	0.064	88.14
3	0.148	0.150	0.149	72.40
4	0.154	0.154	0.154	71.48
5	0.149	0.149	0.149	72.40
6	0.173	0.175	0.174	67.77
7	0.179	0.179	0.179	66.85
8	0.183	0.180	0.181	66.48

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการแช่ขัง 3 ชั่วโมง กับครั้งที่ของการบำบัดน้ำเสีย ของคอลัมน์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดิน

ครั้งที่	ร้อยละการบำบัด
1	100.00
2	75.00
3	75.00
4	75.00
5	50.00
6	50.00
7	50.00
8	25.00

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกรูปถาผี

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.049	0.049	0.049	88.44
2	0.060	0.065	0.062	85.37
3	0.071	0.073	0.072	83.01
4	0.124	0.124	0.124	70.75
5	0.129	0.133	0.131	69.10
6	0.139	0.140	0.139	67.21
7	0.151	0.153	0.152	64.15
8	0.155	0.155	0.155	63.44

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกรูปทรงแปด

ครั้งที่	ร้อยละการบำบัด
1	100.00
2	100.00
3	93.75
4	93.75
5	81.25
6	75.00
7	75.00
8	75.00

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกหน้าแปก

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.074	0.073	0.073	82.78
2	0.157	0.157	0.157	62.97
3	0.199	0.200	0.199	53.06
4	0.186	0.189	0.187	55.89
5	0.195	0.195	0.195	54.00
6	0.230	0.233	0.231	45.51
7	0.240	0.244	0.242	42.92
8	0.235	0.235	0.235	44.57

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปลูกรูปทรงแปดเหลี่ยม

ครั้งที่	ร้อยละการบำบัด
1	87.50
2	87.50
3	87.50
4	87.50
5	75.00
6	62.50
7	62.50
8	62.50

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้ถ้ำลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระเบปชุดควบคุม

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง		ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
1	0.078	0.086	0.082	80.66
2	0.160	0.160	0.160	62.26
3	0.206	0.203	0.204	51.88
4	0.212	0.215	0.213	49.76
5	0.230	0.223	0.226	46.69
6	0.240	0.230	0.235	44.57
7	0.250	0.244	0.247	41.74
8	0.250	0.246	0.248	41.50

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดีด้วยวิธีการจำลองระบบบำบัดแบบบึงประดิษฐ์ที่ใช้เฝ้าลอยผสมดินกับครั้งที่ของการบำบัดจากกระบะชุดควบคุม

ครั้งที่	ร้อยละการบำบัด
1	85.93
2	85.93
3	85.93
4	80.46
5	70.03
6	61.11
7	61.11
8	61.11

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวมินา เฟื่องแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	13 มีนาคม 2532
สถานที่เกิด	จังหวัดปทุมธานี
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำแหน่งหน้าที่การทำงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-