



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

.....  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

.....  
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ และกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

Domestic Wastewater Treatment by Utilizing Lignite Fly Ash from Pulp and Paper Industry as Pollutants Adsorbent in Natural Treatment System

ชื่อผู้วิจัย นางสาวนภัสวรรณ ตั้งเต็มทรัพย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ..... รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. .... )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ..... รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D. .... )

หัวหน้าภาควิชา

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

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

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

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็น  
ตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

Domestic Wastewater Treatment by Utilizing Lignite Fly Ash from Pulp and Paper Industry as  
Pollutants Adsorbent in Natural Treatment System

โดย

นางสาวนภัสวรรณ ตั้งเต็มทรัพย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

นักสุวรรณ ตั้งเดิมนรพี 2557: การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์จาก  
โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบ  
ธรรมชาติ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์  
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รองศาสตราจารย์กณิตา ตังคณานุรักษ์, วท.ม. 127 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดมลสารในน้ำเสียชุมชน โดยนำถ้ำลอยลิกไนต์ที่เป็นของ  
เสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษมาใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับมลสารในระบบ  
บำบัดแบบธรรมชาติ จากการทดลองแบบแบตช์ พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัม ต่อ 50 มิลลิลิตร ของ  
น้ำเสียชุมชนจากบ่อเก็บรวบรวมของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ให้  
ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 81.52 และ 75.00 ตามลำดับ  
ตลอดจนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:20 ไอโซเทอร์มการดูด  
ซับมีความสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในการทดลองแบบการไหล  
ต่อเนื่องพบว่าที่ระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ (ร้อยละ 85.35)  
และซีโอดี (ร้อยละ 90.91) ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดแบบอื่น นอกจากนั้นได้ทำการ  
ทดลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ (พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม) ในกระบะสี่เหลี่ยมที่บรรจุชั้นวัสดุกรองและ  
ชั้นบนสุดเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:20 ปลูกธูปฤาษีและหญ้าแฝก และ  
ใช้ระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าพืชทั้งสองชนิดให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี  
ของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โทฟอสเฟตได้ดีคือร้อยละ 86.05, 85.94, 86.36, 61.18 และ  
94.84 ตามลำดับสำหรับธูปฤาษี และเท่ากับร้อยละ 93.42, 90.63, 95.45, 75.66 และ 95.80  
ตามลำดับสำหรับหญ้าแฝก ในขณะที่ชุดควบคุมที่ไม่ได้ใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ให้ประสิทธิภาพในการ  
บำบัดมลสารได้ต่ำกว่าคือเท่ากับร้อยละ 17.63, 12.50, 27.27, 22.37 และ 4.13 ตามลำดับ ดังนั้นถ้ำ  
ลอยลิกไนต์มีศักยภาพที่ดีสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบบำบัดแบบ  
ธรรมชาติ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Naphatsawan Tangtermsarp 2014: Domestic Wastewater Treatment by Utilizing Lignite Fly Ash from Pulp and Paper Industry as Pollutants Adsorbent in Natural Treatment System. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 127 pages.

The purposes of this research was to remove pollutants in domestic wastewater by utilizing lignite fly ash residue from pulp and paper industry be used as pollutants adsorbent in natural treatment system. In the batch experiments, it was found that lignite fly ash 5 g per 50 mL of domestic wastewater from collected pond of Kasetsart University with 4 h of retention time gave the maximum removal efficiency of water color and COD at 81.52% and 75.00% respectively and also the suitable ratio by weight of lignite fly ash to soil was 1:20. The adsorption isotherm was consistent with both of the Langmuir and Freundlich isotherm. The continuous flow experiment revealed that at 4 h of treatment time gave the more removal efficiency of water color (85.35%) and COD (90.91%) than others treatment. In addition, the natural treatment (constructed wetland) were performed in square tank which filled with filtration layer and mixture of lignite fly ash and soil in ratio by weight at 1:20 on the top layer growing *Typha angustifolia* L. and *Vetiveria zizanioides* and 4 h of treatment time. The results revealed that both of plants gave a good efficiency to treat color, BOD, COD, TKN and orthophosphate which were 86.05%, 85.94%, 86.36%, 61.18% and 94.84% respectively for *Typha angustifolia* L. and 93.42%, 90.63%, 95.45%, 75.66% and 95.80% respectively for *Vetiveria zizanioides*. While the controlled treatment unit which without using lignite fly ash gave the poor removal which were 17.63%, 12.50%, 27.27%, 22.37% and 4.13% respectively. Therefore, lignite fly ash have a good potential for improving the treatment efficiency of the natural treatment system.

---

Student's signature

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คณิตา ตั้งคณาบุรุษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ ตั้งคณาบุรุษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และสละเวลาในการชี้แนะ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม ทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำสั่งสอน แก่ผู้วิจัยเพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ คุณน้ำบันเทิง เจ้าหน้าที่ดูแลบ่อน้ำบาดน้ำเสีย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการไปเก็บตัวอย่างน้ำที่นำมาวิจัยในทุกๆ ครั้ง

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม รุ่น 35 และ 36 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งคำปรึกษา คำร่างกาย และกำลังใจตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวตั้งเต็มทรัพย์ และครอบครัวพิชัยอุดมเดช ที่คอยเป็นกำลังใจในการศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้เมตตา อบรม สั่งสอน และคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนทุนการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นภัสวรรณ ตั้งเต็มทรัพย์

ตุลาคม 2557

## สารบัญ

### หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	62
อุปกรณ์	62
วิธีการ	65
ผลและวิจารณ์	73
สรุปและข้อเสนอแนะ	105
สรุป	105
ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	108
ภาคผนวก	116
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	127

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณการเกิดและปริมาณความสกปรกรวมจากน้ำเสียภาคเกษตรกรรมในปี พ.ศ. 2555	6
2	สภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมทั้งประเทศไทย พ.ศ. 2555	7
3	อัตราการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคของประชากรแบ่งตามพื้นที่	12
4	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/ต่อคนต่อวัน) แบ่งตามภาค	13
5	จำนวนประชากรไทยปี พ.ศ. 2556 กับปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นทั้งหมด	14
6	สถานภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนทั้งประเทศปี พ.ศ.2556	15
7	องค์ประกอบทางเคมีของแกลลอลิกไนต์	40
8	กลไกการกำจัดมลสารต่างๆในน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	50
9	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ-เคมี ของน้ำเสียชุมชน จากบ่อรวบรวมของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน	75
10	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลา บำบัดต่างๆกันของชุดควบคุมในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง	90
11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลาบำบัด ต่างๆกัน โดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง	94
12	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลาบำบัด ต่างๆกัน โดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง	94
13	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยปลูกหญ้าแฝก และต้นรูปถาฮึในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ	99
14	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดย ปลูกหญ้าแฝกเปรียบเทียบกับชุดควบคุม	100
15	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ-เคมี ของน้ำเสียชุมชนเริ่มต้นและคุณภาพน้ำ ที่ผ่านระบบบำบัดแบบธรรมชาติ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน	103

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานออร์โทฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง	117
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับปริมาณแกลลอลิกไนต์ จากการทดลองแบบแบตช์	117
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับปริมาณแกลลอลิกไนต์ จากการทดลองแบบแบตช์	118
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาจากการทดลอง แบบแบตช์	118
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับระยะเวลาจากการทดลอง แบบแบตช์	119
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของแกลลอลิกไนต์ต่อดินจากการทดลองแบบแบตช์	120
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ แกลลอลิกไนต์ต่อดินจากการทดลองแบบแบตช์	120
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแกลลอลิกไนต์	121
9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีโอดีกับร้อยละการบำบัดในการ ทดลองแบบปล่อยผ่าน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง	121
10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีโอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา สัมผัส 4 ชั่วโมง จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง	122
11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีโอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา สัมผัส 4 วัน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง	122
12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีโอดีกับร้อยละการบำบัดในการ ทดลองแบบปล่อยผ่าน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม	123
13	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีโอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา สัมผัส 4 ชั่วโมง จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม	124

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
14	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณลักษณะ และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม	124
15	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆของดินผสมเถ้ายลยลิกในัฒร่วมกับทการปลุกหญ่้าฝล็ก	125
16	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆของดินผสมเถ้ายลยลิกในัฒร่วมกับทการปลุกฐูปถายัฒ	126
17	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆกับทการใช้ดินไม่ผสมเถ้ายลยลิกในัฒร่วมกับทการปลุกหญ่้าฝล็กในชุดควบคุม	126

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	19
2	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	20
3	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	21
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว	21
5	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ	23
6	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	24
7	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	26
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	29
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	30
10	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	31
11	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	32
12	แบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	33
13	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	33
14	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	34
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	35
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	36
17	Breakthrough Curve ของ Fixed-bed Adsorption Column	37
18	รูปแบบของกราฟเบรคทรูจในกระบวนการดูดติดผิว	38
19	เปรียบเทียบรูปร่างและลักษณะผิวของถ้ำลอยขนาดเล็ก (ก.) กับถ้ำลอยขนาดใหญ่ (ข.)	41
20	การแบ่งประเภทของถ้ำลอย Class C (ก.) และถ้ำลอย Class F (ข.)	42
21	การหมุนเวียน สะสม และการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารในแปลงพืชบำบัด	43
22	ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว	45
23	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง	46

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบพืชลอยน้ำ	48
25	ต้นธูปฤาษี ( <i>Typha angustifolia</i> Linn.)	52
26	หญ้าแฝกหอม (ก.) และหญ้าแฝกคอน (ข.)	56
27	กราฟมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต	73
28	กราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์	74
29	ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์	76
30	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์กับปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์	77
31	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์กับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง	78
32	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์กับระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน	78
33	ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ของแลงเมียร์ (ก.) และฟรุนดิช (ข.)	79
34	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ของถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ	82
35	คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ	83
36	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ ไหลผ่านออกจากคอลัมน์แบบปล่อยผ่านทุก 30 นาที	84
37	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอไซด์ (ข.) ที่เหลือกับ ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แบบปล่อยผ่าน	85
38	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง	86
39	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอไซด์ (ข.) ที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง	87
40	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอไซด์ กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน	88
41	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอไซด์ (ข.) ที่เหลือ กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน	89
42	คอลัมน์แก้วชุดควบคุมในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง	90

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
43	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ปล่อยผ่าน)	91
44	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ระยะเวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง)	92
45	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ระยะเวลาสัมผัสที่ 4 วัน)	93
46	กระบวนบรรจุชั้นวัสดุปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ	95
47	กระบวนจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติเพาะปลูกหญ้าแฝก (ก.) และต้นรูปถาผี (ข.)	95
48	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ กับครั้งที่การบำบัดต่อระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมงของการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยการปลูกหญ้าแฝก	97
49	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ กับครั้งที่การบำบัดต่อระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมงของการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยการปลูกต้นรูปถาผี	98
50	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม	100
51	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (BOD) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม	101
52	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี (COD) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม	101
53	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม	102
54	เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าออร์โธฟอสเฟต จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม	102

การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิต  
เยื่อและกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

**Domestic Wastewater Treatment by Utilizing Lignite Fly Ash from Pulp and  
Paper Industry as Pollutants Adsorbent in Natural Treatment System**

คำนำ

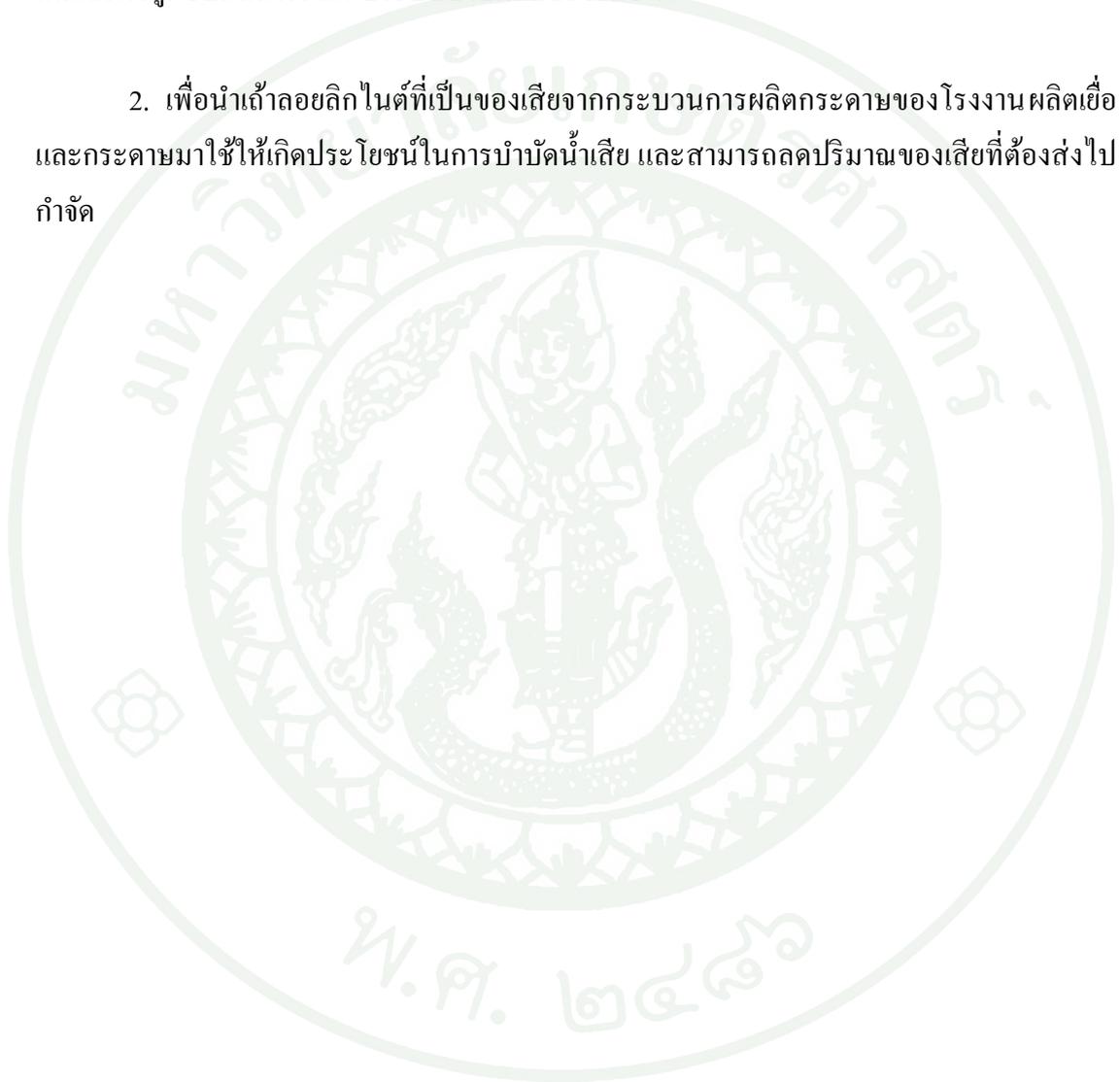
สภาพน้ำเสียชุมชนในปัจจุบันมีสารมลพิษปนเปื้อนมากขึ้นทั้งในรูปสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์จากกิจกรรมการใช้สารเคมีในชีวิตประจำวัน เช่น การทำครัว ล้างรถ ชำระล้างสิ่งสกปรก สิ่งปฏิกูล รวมถึงของเสียอันตรายต่างๆจากบ้านเรือน ซึ่งเมื่อปนเปื้อนมากับน้ำที่ใช้แล้วย่อมทำให้คุณภาพน้ำเปลี่ยนแปลงไปทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ อีกทั้งระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของประเทศไทยในปัจจุบันยังไม่สามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2554) ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำหรือน้ำเสียที่มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับในอดีต ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และระบบนิเวศสิ่งแวดล้อม ประกอบกับปริมาณความต้องการใช้กระดาษในชีวิตประจำวันต่างๆที่เพิ่มขึ้น โดยคนไทยใช้กระดาษเฉลี่ยปีละ 3.9 ล้านตัน หรือ คนละประมาณ 60 กิโลกรัมต่อปี (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ, 2556) ทำให้อุตสาหกรรมผลิตกระดาษต้องเพิ่มอัตราการผลิตเพื่อรองรับปริมาณความต้องการใช้กระดาษนั้น ก่อให้เกิดเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตในขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยเถ้าลอยลิกไนต์ของโรงงานผลิตกระดาษเช่น เอสซีจี เปเปอร์ มีปริมาณมากถึง 49,000 ตัน/ปี (บริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน), 2555) ซึ่งในแต่ละปีเถ้าลอยลิกไนต์เหล่านี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการฝังกลบถมที่ดิน หรือการนำไปขายเป็นส่วนผสมในการผลิตปูนซีเมนต์ แต่ยังมีเถ้าลอยลิกไนต์อีกปริมาณมากที่ยังไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการใช้เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยใช้พืชบำบัดได้แก่หญ้าแฝกและรูปถาผี อาศัยกระบวนการทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยพืช ดิน และการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในการบำบัด ร่วมกับการใช้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษที่เป็นของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยผสมกับดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัวดูดซับมลสาร ซึ่งคุณสมบัติทรงกลมขนาดเล็กของเถ้าลอยลิกไนต์จะช่วยดูด

แทรกช่องว่างระหว่างเม็ดดินเพิ่มความหนาแน่นของดิน อีกทั้งถ้าลอยลึกในตัวยังมีอนุภาครูพรุน และพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงจึงสามารถช่วยในการดูดซับสารมลพิษที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก และสารมลพิษอื่นๆ ได้ดียิ่งขึ้น โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อลดค่าซีโอดีและสีของน้ำเสียชุมชน เป็นเทคโนโลยีอย่างง่าย ใช้วัสดุพืชและพืชท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง มุ่งพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ ไม่เป็นอันตรายต่อระบบนิเวศสิ่งแวดล้อม และทำให้ของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตกระดายเป็นรูปแบบ Zero Waste โดยใช้ของเสียที่เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งเป็นการลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมที่จะนำไปกำจัดเหลือให้น้อยลงได้อีกด้วย

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นวัสดุปรับปรุงดินและตัวดูดซับมลสารร่วมกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติ
2. เพื่อนำถ้ำลอยลิกไนต์ที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตกระดาษของโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย และสามารถลดปริมาณของเสียที่ต้องส่งไปกำจัด



## การตรวจเอกสาร

### 1. น้ำเสียและแหล่งกำเนิด

#### 1.1 ความหมายของน้ำเสีย

พระราชบัญญัติส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 ออกตามความในราชกิจจานุเบกษา ให้คำนิยามว่า น้ำเสีย หมายถึง ของเสียที่อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลว หรือรวมทั้งมวลสารที่ปะปนหรือปนเปื้อนอยู่ในของเหลวนั้น

กรมควบคุมมลพิษ (2537) ให้นิยามว่า น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ มากมายจนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการ และน่ารังเกียจของคนทั่วไป ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ประโยชน์อีกต่อไป หรือถ้าปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติก็จะทำให้คุณภาพน้ำของธรรมชาติเสียหายได้

มันสิน (2542) ให้นิยามน้ำเสีย หมายถึง น้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ ในปริมาณสูงจนกระทั่งกลายเป็นน้ำที่ไม่เป็นที่ต้องการและน่ารังเกียจของคนทั่วไป น้ำเสียก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ แก่ลำน้ำซึ่งเป็นที่รองรับ เช่น ทำให้เน่าเหม็นหรือเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ เป็นต้น สิ่งเจือปนที่ทำให้น้ำกลายเป็นน้ำเสียเช่น สารอินทรีย์ต่างๆ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ กรด ด่าง ของแข็ง หรือตะกอนแขวนลอย และสิ่งต่าง ๆ ที่ลอยอยู่ในน้ำ น้ำมัน ไขมัน เกลือ และแร่ธาตุที่เป็นพิษ เช่น โลหะหนักต่างๆ สารที่ทำให้เกิดฟอง ความร้อน สารพิษต่างๆ สีและกลิ่น สารกัมมันตรังสี

#### 1.2 แหล่งกำเนิดน้ำเสีย

##### 1.2.1 เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

แหล่งน้ำต่างๆ ในธรรมชาติเกิดการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์ หรือสิ่งปฏิกูลของสัตว์ในรูปของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน หรือมีสาเหตุมาจากการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแพลงตอนแล้วตายลงพร้อมๆ กัน ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำต่ำลง หรืออาจเกิดจากการเน่าเสียได้เองเมื่ออยู่ในภาวะที่ขาดออกซิเจน นอกจากนี้การเน่าเสียอาจเกิดได้อีกประการหนึ่งคือกรณีเมื่อน้ำอยู่ในสภาพนิ่งไม่มีการหมุนเวียนถ่ายเท

### 1.2.2 จากกิจกรรมการใช้ประโยชน์แหล่งน้ำของมนุษย์

ปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้น มีสาเหตุมาจากการระบายน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดต่างๆ โดยไม่มีการบำบัดหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนปล่อยออกเป็นน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยปกติแล้วแหล่งน้ำตามธรรมชาติจะมีการฟอกตัวเองได้ ถ้าน้ำในแหล่งน้ำนั้นมีความสกปรกไม่มากนักเกินไป แต่ปัญหาน้ำเสียในปัจจุบันก็เป็นผลมาจากแหล่งน้ำได้รองรับปริมาณความสกปรกมากเกินไป จนเกินความสามารถที่ธรรมชาติจะรักษาสมดุลไว้ได้ โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาน้ำเสียคือ มนุษย์ โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มของจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้นทุกๆปี จึงมีผลทำให้มีการใช้ทรัพยากรน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภค การใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ และค่านิยมในการใช้น้ำที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากขึ้น รวมถึงการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้มีการบำบัดทำให้แหล่งน้ำธรรมชาตินั้นเน่าเสีย โดยประเภทของแหล่งกำเนิดน้ำเสีย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ คือ จากชุมชน จากอุตสาหกรรม และจากการเกษตรกรรม (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) อธิบายได้ดังนี้คือ

1) น้ำเสียจากการเกษตรกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมทางการเกษตร ทั้งการเพาะปลูกและการเลี้ยงสัตว์ ลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการเกษตรกรรมนี้จะมีสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ทั้งในรูปของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้น้ำ การไถพรวน และการใช้สารเคมีต่างๆ โดยองค์ประกอบที่จะพบมากในแหล่งน้ำใกล้เคียงกับพื้นที่ทำการเกษตรคือไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และอาจมีสารพิษปนเปื้อนอยู่ด้วย ซึ่งมาจากการใช้ยาฆ่าแมลง หรือการใช้ปุ๋ยที่มีสารประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูง เมื่อฝนตกลงมาก็จะชะสารเหล่านี้ลงมาสู่แหล่งน้ำด้วย สำหรับน้ำเสียที่มาจาก การเลี้ยงสัตว์ จะพบสิ่งสกปรกในรูปของสารอินทรีย์เป็นส่วนมาก ซึ่งมาจากสิ่งปฏิกูลที่ถูกชะล้างจากโรงเลี้ยงสัตว์ (วิระ, 2545)

น้ำเสียจากภาคเกษตรกรรมนี้เมื่อประเมินจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการปลูกข้าว การเลี้ยงสุกร และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำรวมทั้งประเทศประมาณ 114.0 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 87.6 ของปริมาณน้ำเสียทั้งประเทศและมีความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ประมาณ 890 ตันปีโอดีต่อวัน หรือร้อยละ 13.7 ของปริมาณความสกปรกทั้งประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) โดยปริมาณการเกิดและปริมาณความสกปรกรวมจากน้ำเสียภาคเกษตรกรรมในปี พ.ศ. 2555 แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ปริมาณการเกิดและปริมาณความสกปรกรวมจากน้ำเสียภาคเกษตรกรรมในปี พ.ศ.  
2555

ประเภทแหล่งกำเนิด	ปริมาณการเกิด (ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน)	ปริมาณความสกปรกรวม (ตันบีโอดี/วัน)
น้ำเสียเกษตรกรรม (รวม)	114.0	890
เพาะปลูก	106.8	390
เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	7.1	200
เลี้ยงสุกร	0.1	300

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2555)

2) น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ประกอบไปด้วยน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ตั้งแต่ขั้นตอนการล้างวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การล้างวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องจักรกล ตลอดจนการทำความสะอาด โรงงานอุตสาหกรรม เป็นแหล่งที่ปล่อยน้ำทิ้งและทำให้เกิดปัญหามลพิษขึ้นหลายแห่งทั่วโลก องค์ประกอบของน้ำทิ้งจะมีทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ หรืออาจมีสารพิษอันตรายต่างๆปนเปื้อนอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับการใช้น้ำและประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม (คณิตา, 2556)

จากการประเมินจากน้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการของโรงงาน โดยกรมควบคุมมลพิษรวมทั้งน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานและกิจกรรมอื่นๆ ในโรงงาน โดยในปี พ.ศ. 2555 ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียประมาณ 120,900 โรงงาน มีปริมาณน้ำเสียประมาณ 6.77 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 4.0% ของปริมาณน้ำเสียทั้งประเทศ ความเน่าเสียของคูคลองเกิดจากน้ำเสียประเภทนี้ประมาณ 25% (กรมควบคุมมลพิษ, 2555) โดยสภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมทั้งประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 2 ดังนี้

## ตารางที่ 2 สภาพน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมรวมทั่วประเทศไทย พ.ศ. 2555

ประเภทแหล่งกำเนิด	น้ำเสียอุตสาหกรรม (รวมทั้งประเทศ)
จำนวน โรงงานอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย	120,900 โรงงาน
ปริมาณการเกิด	6.77 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน
ปริมาณความสกปรกรวม	2,700 ตันบีโอดี/วัน
ร้อยละปริมาณน้ำเสียทั่วประเทศ	4.0
ความเน่าเสียของคูคลองเกิดจากน้ำเสียประเภทนี้	25%

### ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2555)

3) น้ำเสียจากแหล่งชุมชน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียในเมือง น้ำเสียจากชุมชนเกิดจากการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ของประชาชนที่อาศัยในชุมชน เช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน อาคาร ที่พักอาศัย โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน ร้านค้า อาคารสำนักงาน เป็นต้น น้ำทิ้งจากแหล่งชุมชนนี้จะถูกปล่อยทิ้งลงท่อน้ำโสโครก ซึ่งส่วนใหญ่จะไหลลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการบำบัดก่อน องค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในน้ำเสียจากชุมชนคือสารอินทรีย์ที่มีปริมาณสูงมากจนเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพน้ำในแหล่งน้ำเสื่อมโทรมลง และกลายเป็นแหล่งน้ำเน่าเสีย ซึ่งปริมาณการเกิดน้ำเสียชุมชนจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.4 เรื่อง สถานการณ์น้ำเสียชุมชนในประเทศไทยต่อไป

## 2. น้ำเสียชุมชน

### 2.1 ความหมายของน้ำเสียชุมชน

กรมควบคุมมลพิษ (2537) ให้นิยามความหมายของน้ำเสียชุมชน คือ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยในชุมชนและกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรก น้ำทิ้งสุขา ทั้งหลายภายในครัวเรือนและอาคารประเภทต่างๆ เป็นต้น

ธงชัย และ วิบูลย์ลักษณ์ (2540) ให้นิยามความหมายของน้ำเสียชุมชน คือ น้ำที่เกิดจาก

การใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ และระบายลงสู่ท่อระบายน้ำ แหล่งรองรับน้ำเสีย หรือแหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้ผ่านการบำบัดให้มีลักษณะดีขึ้นหรือสะอาดขึ้นก่อน ซึ่งทำให้แหล่งน้ำมีคุณภาพเสื่อมโทรมและเน่าเสียในที่สุด การใช้น้ำของประชาชนในแต่ละกลุ่มมีปริมาณหรืออัตราการใช้น้ำไม่แน่นอน ซึ่งจะต้องพิจารณาองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องหลายอย่างด้วยกันเช่น ลักษณะภูมิประเทศ ฤดูกาล ระยะเวลาของการปฏิบัติการกิจ ชนิดของกิจกรรม ความหนาแน่นของชุมชน ฐานะทางเศรษฐกิจของประชาชน นิสัย และการปฏิบัติตนของประชาชนในชุมชน เป็นต้น

เกษม (2553) กล่าวว่า แหล่งกำเนิดน้ำเสียชุมชน คือผู้ที่ทำให้มีการปนเปื้อนมลสารโดยการปล่อยน้ำทิ้งหรือการปล่อยน้ำเสีกลงสู่แหล่งน้ำโดยตรง เช่นการปล่อยน้ำจากบ่อส้วม การทิ้งขยะมูลฝอย เป็นต้น ทำให้โครงสร้างของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจนน้ำไม่สามารถทำหน้าที่เป็นทรัพยากรผู้ผลิตดั้งเดิมได้ และล้นก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำทั้งสิ้น

สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2545) ให้คำนิยามความหมายของน้ำเสียชุมชนว่า น้ำเสียชุมชนเกิดจากการใช้ประโยชน์น้ำในกิจกรรมต่างๆของประชาชนที่อาศัยในชุมชน ส่วนใหญ่จะไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้มีการบำบัดก่อน มีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากในแต่ละชุมชน องค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้แต่มีปริมาณสูง

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2556) ให้คำนิยาม น้ำเสียชุมชนว่าหมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมประจำวันของประชาชนที่อาศัยอยู่ในชุมชน และกิจกรรมที่เป็นอาชีพ ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและ ชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้นปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือนอาคารจะมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้ หรืออาจประเมินได้จากจำนวนประชากรหรือพื้นที่ใช้สอยของอาคารแต่ละประเภท

## 2.2 แหล่งกำเนิดน้ำเสียชุมชน

ขวัญฤดี (2548) กล่าวว่า แหล่งกำเนิดน้ำเสียชุมชน คือ น้ำที่เกิดจากการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆระบายน้ำทิ้งลงสู่ท่อระบายน้ำ แหล่งรองรับน้ำเสีย หรือแหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้

ผ่านการบำบัดให้มีลักษณะดีขึ้นหรือสะอาดก่อน ทำให้แหล่งน้ำมีคุณภาพน้ำเสื่อมลงและเน่าเสียในที่สุด ซึ่งกิจกรรมที่จัดอยู่ในกลุ่มที่ทำให้เกิดน้ำเสียชุมชน ได้แก่

2.2.1 บ้านพักอาศัย น้ำเสียจากบ้านพักอาศัยนี้เกิดจากเศษอาหารที่มาจากครัวเรือน การล้างจาน ภาชนะ หรือจากการปรุงอาหาร รวมถึงสารต่างๆที่เกิดจากการทำความสะอาดเสื้อผ้า สิ่งของต่างๆ ภายในบ้านและการอาบน้ำ ซึ่งบ้านพักส่วนใหญ่จะมีอัตราการระบายน้ำเสียประมาณ 200 ลิตร/คน/วัน (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2538)

2.2.2 สถานที่ประกอบธุรกิจการค้า เช่น ร้านอาหาร ภัตตาคาร ห้างสรรพสินค้า ศูนย์การค้า ร้านค้า ตลาด โรงแรม สถานเริงรมย์ และ โรงภาพยนตร์ เป็นต้น มีน้ำเสียเกิดจากห้องครัวและห้องส้วม โดยเฉพาะน้ำมันและไขมันจะมีปริมาณสูงในน้ำเสียอันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการอุดตันในท่อระบายน้ำเสีย และขวางกั้นแสงหรือออกซิเจนลงสู่ผิวน้ำได้

2.2.3 สถานที่ทำการ/สำนักงาน มีน้ำเสียจากห้องน้ำและห้องส้วมจากห้องพักและห้องครัว หรือภัตตาคารภายในโรงแรม อาคารสำนักงาน มีน้ำเสียจากห้องน้ำห้องส้วม เช่น โรงเรียน มหาวิทยาลัย สถานที่ศึกษา ที่ทำการของหน่วยงานราชการ-เอกชน และเรือนจำ เป็นต้น

2.2.4 กิจกรรมอื่นๆ เช่น สถานบริการ อาคารพาณิชย์ โรงเรียน อาคารชุด ตลาด สถานบริการจำหน่ายน้ำมัน โรงพยาบาล สถานที่ตั้งระบบสาธารณสุข โภค โรงผลิตน้ำประปา โรงบำบัดน้ำเสีย สวนสาธารณะ สถานที่ท่องเที่ยว เป็นต้น

### 2.3 ลักษณะน้ำเสียชุมชน

ในชุมชนมีการใช้น้ำในชีวิตประจำวันต่างๆทำให้ร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้ทั้งหมด กลายเป็นน้ำเสีย แล้วถูกปล่อยทิ้งจากบ้านเรือนและอาคารประเภทต่างๆลงในท่อระบายน้ำ แหล่งรองรับน้ำเสีย หรือแหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรง (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) ซึ่งลักษณะของน้ำเสียชุมชนมีองค์ประกอบต่างๆ อธิบายได้ดังนี้คือ

2.3.1 สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เช่น เศษข้าว ก๋วยเตี๋ยว พืชผัก ซึ้นเนื้อ เศษไม้ น้ำตาล เป็นต้น สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนทำให้ระดับ

ออกซิเจนละลายน้ำลดลงเกิดสภาพน้ำเน่าเหม็น ซึ่งปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำนิยามวัดด้วยค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) เมื่อค่าบีโอดีในน้ำสูงแสดงว่ามีสารอินทรีย์ปะปนอยู่มาก และสภาพน้ำเน่าเหม็นจะเกิดขึ้นได้ง่าย

2.3.2 สารอินทรีย์ ได้แก่ แร่ธาตุต่างๆที่อาจไม่ทำให้เกิดสภาพน้ำเน่าเหม็น แต่อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตถ้ามีค่าเกินที่มาตรฐานกำหนด ได้แก่ คลอไรด์ ซัลเฟต แคลเซียม แมกนีเซียม แอมโมเนีย เป็นต้น ซึ่งมักเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม แหล่งชุมชน และเกษตรกรรม ที่ปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ และอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) คือการแพร่พันธุ์ของสาหร่ายหรือแพลงตอนพืชอย่างรวดเร็วและมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำนั้น

2.3.3 โลหะหนัก สารกัมมันตภาพรังสี และสารพิษอื่นๆ อาจอยู่ในรูปของสารอินทรีย์ หรืออนินทรีย์ และสามารถสะสมอยู่ในวงจรอาหารเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต เช่น โปรท แคลเมียม โครเมียม ทองแดง เหล็ก สารฆ่าแมลง ปกติจะอยู่ในน้ำเสียที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชที่ปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากการเกษตร สำหรับในเขตชุมชนสารมลพิษนี้อาจมีที่มาจากอุตสาหกรรมในครัวเรือนบางประเภท เช่น ร้านชุบโลหะ อู่ซ่อมรถ และน้ำเสียจากโรงพยาบาล เป็นต้น

2.3.4 น้ำมัน และสารลอยน้ำต่าง ๆ มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ ชัดขวางการสังเคราะห์แสงและการถ่ายเทออกซิเจน ยับยั้งการย่อยสลายตามปกติของจุลินทรีย์ เป็นอันตรายต่อปลา เพราะไปอุดตันเหงือกหรือติดตามผิวหนังและขนของนกน้ำเป็นอุปสรรคในการดำรงชีวิต นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสภาพไม่น่าดู

2.3.5 ความร้อน โดยอุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมควรอยู่ประมาณ 25-35 องศาเซลเซียส (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) หากน้ำมีความร้อนสูงจะทำให้เกิดการแบ่งชั้นของลำน้ำ เร่งปฏิกิริยาย่อยสลายของจุลินทรีย์ และลดระดับการละลายของออกซิเจนในน้ำ อาจทำให้เกิดสภาพน้ำเน่าเหม็นขึ้นมาได้

2.3.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ประกอบด้วยปริมาณของแข็งแขวนลอย (TSS) และของแข็งละลายทั้งหมด (TDS) ทำให้น้ำมีความขุ่นสูง บดบังแสงอาทิตย์ เมื่อจมน้ำตู้กันลำน้ำทำ

ให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เกิดสภาพไร้ออกซิเจนที่ตื้นน้ำ มีผลกระทบต่อการค้ารังสีของสัตว์น้ำ

2.3.7 สี และความขุ่น สีของน้ำธรรมชาติเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือมักจะเกิดจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ ผลิตภัณฑ์ โรงฟอกหนัง และ โรงฆ่าสัตว์ ทำให้ไปขัดขวางกระบวนการสังเคราะห์แสงในลำน้ำ และลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

2.3.8 กรด และด่าง วัดโดยค่าพีเอช ซึ่งค่าพีเอชมีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ ค่าพีเอชของน้ำที่ต่ำมากหรือสูงมากเกินไปจะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ น้ำที่มีพีเอชต่ำจะเป็นน้ำที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้มีการละลายของโลหะหนักในน้ำได้มากขึ้น เป็นผลให้มีการสะสมโลหะหนักในห่วงโซ่อาหาร ส่วนน้ำที่มีพีเอชสูงจะเป็นน้ำที่มีความเป็นด่าง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ ในส่วนของการนำน้ำไปใช้ประโยชน์นั้นค่าพีเอชของน้ำทั้งที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (กรมควบคุมมลพิษ, 2537)

2.3.9 สารก่อให้เกิดฟอง หรือสารซักฟอก ได้แก่ ผงซักฟอก สบู่ เมื่ออยู่ผิวหน้าน้ำฟองจะกีดกันการกระจายของออกซิเจนในอากาศสู่น้ำและอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ

2.3.10 จุลินทรีย์ แบ่งตามการรับอิเล็กตรอนในขั้นสุดท้าย สามารถแบ่งออกได้เป็นสามชนิดคือ ชนิดใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) และกึ่งไม่ใช้ออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) ในการดำรงชีวิตย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย นอกจากนี้จุลินทรีย์บางชนิดเป็นจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่น โรคอหิวาตกโรค ไทฟอยด์ บิด พยาธิใบไม้จากเชื้อ *E. coli* ในน้ำเสีย (กรมควบคุมมลพิษ, 2537)

2.3.11 ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อมีปริมาณสูงจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตและเพิ่มปริมาณอย่างรวดเร็วของสาหร่าย (Algae Bloom) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ระดับออกซิเจนในน้ำลดต่ำลง อีกทั้งยังทำให้เกิดวัชพืชน้ำซึ่งเป็นปัญหาแก่การสัญจรทางน้ำ

2.3.12 กลิ่น เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนหรือกลิ่นอื่นๆจากโรงงานอุตสาหกรรมครัวเรือนต่างๆ เช่น โรงงานทำปลาปน โรงฆ่าสัตว์ โรงงานทำขมจีน เป็นต้น

## 2.4 สถานการณ์น้ำเสียชุมชนในประเทศไทย

ปัญหาน้ำเน่าเสียตามแหล่งน้ำและชุมชนต่างๆ ในทุกภาคของประเทศไทยมีผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของประชาชนและระบบนิเวศ สืบเนื่องมาจากการพัฒนาตามความเจริญของบ้านเมืองและการขยายตัวของเศรษฐกิจ มีการสร้างโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นจำนวนมากในเขตชุมชน โดยบางโรงงานอาจจะยังไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ และน้ำเสียบางส่วนก็เกิดจากการระบายทิ้งจากอาคารบ้านเรือนโดยไม่มีระบบบำบัดก่อน ซึ่งการใช้สารเคมีที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การทำครัว ล้างรถ ชำระล้างสิ่งสกปรกสิ่งปฏิกูลเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาน้ำเน่าเสียในปัจจุบันทั้งสิ้น

ข้อมูลจากสำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (2538) ได้แสดงปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือนอาคาร ว่าจะมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของปริมาณน้ำใช้ โดยที่ชุมชนในเขตเทศบาลนครใช้น้ำ 250 ลิตร/คน/วัน เทศบาลเมืองใช้น้ำ 200 ลิตร/คน/วัน เทศบาลตำบลใช้น้ำ 120 ลิตร/คน/วัน นอกเขตเทศบาล/ชุมชนในเขตชนบทใช้น้ำ 50 ลิตร/คน/วัน และการปกครองท้องถิ่นรูปแบบพิเศษ (กรุงเทพมหานครและพัทยา) ใช้น้ำ 400 ลิตร/คน/วัน ซึ่งอัตราการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคของประชากรแสดงตามตารางที่ 3 และอัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/ต่อคนต่อวัน) แบ่งตามภาคแสดงดังตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 3 อัตราการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคของประชากรแบ่งตามพื้นที่

พื้นที่	อัตราการใช้น้ำ(ลิตร/คน/วัน)
1. เทศบาลนคร	250
2. เทศบาลเมือง	200
3. เทศบาลตำบล	120
4. นอกเขตเทศบาล/ชุมชนในเขตชนบท	50
5. การปกครองท้องถิ่นรูปแบบพิเศษ (กรุงเทพมหานครและพัทยา)	400

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (2538)

ตารางที่ 4 อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/ต่อคนต่อวัน) แบ่งตามภาค

ภาค	อัตราการเกิดน้ำเสีย (ลิตร/ต่อคนต่อวัน)					
	2536	2540	2545	2550	2555	2560
กลาง	160-214	165-242	170-288	176-342	183-406	189-482
เหนือ	183	200	225	252	282	316
ตะวันออกเฉียงเหนือ	200-253	216-263	239-277	264-291	291-306	318-322
ใต้	171	195	204	226	249	275

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม (2538)

จากอัตราการใช้น้ำเพื่อการอุปโภค-บริโภคของประชากร สามารถนำมาประเมินปริมาณน้ำเสียทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร/วัน) จากจำนวนประชากรหรือพื้นที่ใช้สอยของอาคารแต่ละประเภทโดยใช้สูตรที่ (1) ดังนี้ (สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม, 2538)

$$\text{ปริมาณน้ำเสียทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร/วัน)} = \frac{\text{จำนวนประชากร (คน)} \times \text{อัตราการเกิดน้ำเสียต่อคน (ลิตรต่อคน)}}{1000} \quad (1)$$

จากสูตรที่ (1) ผู้วิจัยได้นำมาประเมินหาปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในหน่วยลูกบาศก์เมตร/วัน จากจำนวนประชากรไทยปี พ.ศ. 2556 ในหน่วย คน/ปี โดยใช้ข้อมูลสถิติจำนวนประชากรทั่วประเทศไทยจากกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย (2555) แสดงดังตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 5 จำนวนประชากรไทยปี พ.ศ. 2556 กับปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นทั้งหมด

ภาค	จำนวนประชากรไทย ปี พ.ศ. 2556 (คน/ปี)	ปริมาณน้ำเสียชุมชนทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร/วัน)
กรุงเทพมหานคร	7,791,000	1,558,200
กลาง (ไม่รวมกรุงเทพ)	17,511,000	3,502,200
เหนือ	11,588,000	2,317,600
ตะวันออกเฉียงเหนือ	19,093,000	3,818,600
ใต้	8,640,000	1,728,000
รวม	64,623,000	12,924,600

หมายเหตุ ข้อมูลจำนวนประชากรไทยปี พ.ศ. 2556 จากกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย (2555)

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำเสียชุมชนทั้งหมดในปี พ.ศ. 2556 เท่ากับ 12,924,600 ลูกบาศก์เมตร/วัน แต่จากสถิติจริงของกรมควบคุมมลพิษพบว่าในปีนี้มีน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 15.09 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือร้อยละ 8.4 ของปริมาณน้ำเสียทั่วประเทศ และมีความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ประมาณ 2,610 ตันบีโอดีต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 42.0 ของปริมาณความสกปรกทั้งประเทศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2555; กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548)

ในปัจจุบันที่รัฐบาลได้มีการลงทุนก่อสร้างและใช้งบประมาณในการบำบัดน้ำเสียของชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศในพื้นที่องค์กรปกครอง ซึ่งพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียแบบรวมศูนย์ทั่วประเทศโดยภาพรวมแล้วมีจำนวน 101 แห่ง ก่อสร้างแล้วเสร็จ 90 แห่ง ชะลอโครงการก่อสร้าง 1 แห่ง และกำลังก่อสร้างอีก 10 แห่ง สามารถบำบัดน้ำเสียที่ถูกส่งเข้าระบบได้รวมทั้งสิ้นประมาณ 3.1 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน หรือเพียง 14 % ของปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศทั้งหมด (องค์กรจัดการน้ำเสีย ฝ่ายพัฒนาองค์กร, 2556) โดยสถานภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนทั้งประเทศแสดงดังตารางที่ 6 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6 สถานภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชนทั้งประเทศปี  
พ.ศ. 2556

สถานภาพ	รายละเอียด
1. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบรวมศูนย์ทั่วประเทศ	1. 101 แห่ง (ก่อสร้างแล้วเสร็จ 90 แห่ง / ชะลอโครงการก่อสร้าง 1 แห่ง / กำลังก่อสร้างอีก 10 แห่ง)
2. ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่ถูกส่งเข้าระบบรวม	2. ประมาณ 3.1 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน หรือเพียง 14 % ของปริมาณน้ำเสียชุมชนที่เกิดขึ้น
3. ปริมาณน้ำเสียชุมชนที่ไม่สามารถบำบัดได้/ตกค้าง	3. ประมาณ 12 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน

ที่มา: สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ (2554)

จากตารางที่ 6 ปริมาณน้ำเสียถูกส่งเข้าระบบและได้รับการบำบัดรวมทั้งสิ้นประมาณ 3 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน ดังนั้นน้ำเสียส่วนหนึ่งประมาณ 12 ล้านลูกบาศก์เมตร/วัน ที่เกิดขึ้นและไม่ได้มีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจึงเป็นปัญหาและผลกระทบที่สมควรได้รับการแก้ไขต่อไป

## 2.5 ผลกระทบจากปัญหาน้ำเสีย

2.5.1 ผลกระทบต่อการประมง โดยน้ำเสียชุมชนจะมีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำน้อย ลดลง ทำให้สัตว์น้ำต่างๆ เช่น ปลา กุ้ง ตายหรือค่อยๆลดลงเนื่องจากไม่สามารถดำรงชีวิต และแพลงพันธ์ได้ตามธรรมชาติ ส่วนสารพิษบางชนิดเมื่อปนเปื้อนในแหล่งน้ำอาจทำให้ปลาตายทันที บางชนิดก็จะสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตทำให้สิ่งมีชีวิตอ่อนแอลงหรืออาจมีการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

2.5.2 ผลกระทบต่อการเกษตรกรรมเพาะปลูก โดยน้ำเสียที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการเกษตรส่วนใหญ่จะเป็นน้ำเสียที่มีความเป็นกรด-ด่างสูง น้ำที่มีปริมาณเกลืออนินทรีย์สูง หรือน้ำเสียที่มีสารพิษเจือปน เป็นต้น น้ำเสียเหล่านี้มักเกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดย

ไม่ได้มีการบำบัดที่เหมาะสมของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เกลืออนินทรีย์ในปริมาณมาก หรือใช้สารพิษต่างๆในกระบวนการผลิต ทำให้แหล่งน้ำมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตต่อพืช ทำให้ไม่สามารถนำน้ำในแหล่งน้ำมาใช้ทำการเกษตรได้

2.5.3 ผลกระทบต่อการสาธารณสุข น้ำเสียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน ทำให้เกิดโรคระบาดต่างๆ เช่น อหิวาตกโรค โรคบิด โรคท้องร่วง เป็นต้น ซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์บางชนิดที่อยู่ในน้ำเป็นตัวก่อโรค โดยจะพบจุลินทรีย์ก่อโรคต่อมนุษย์ในน้ำเสียอยู่ 4 ชนิด คือ แบคทีเรีย ไวรัส โปรโตซัว และพยาธิ ซึ่งส่วนมากจะมาจากอุจจาระของมนุษย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสีย ส่วนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษเจือปน เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนทั้งทางตรงและทางอ้อมได้ เช่น โรคมินามาตะ ซึ่งเกิดจากมนุษย์ได้รับสารปรอทจากการรับประทานปลาที่มีสารปรอทสะสมอยู่ในปริมาณมาก ส่วนการส่งกลิ่นเหม็นของน้ำที่เน่าเสียจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพจิตของประชาชน โดยก่อให้เกิดความเดือดร้อนรำคาญเป็นการบั่นทอนสุขภาพของประชาชนผู้อาศัยอยู่ริมแม่น้ำลำคลอง

2.5.4 ผลกระทบต่อการผลิตน้ำเพื่ออุปโภคและบริโภค โดยแหล่งน้ำสำหรับผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่ ก็คือน้ำในแม่น้ำลำคลองต่างๆ เมื่อแหล่งน้ำเกิดเน่าเสีย คุณภาพน้ำลดลง ก็ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้น้ำที่มีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำดื่มเพิ่มขึ้น

2.5.5 ผลกระทบต่อการคมนาคม เนื่องจากแหล่งน้ำธรรมชาติมีตะกอน และขยะมูลฝอยทับถมกันมากขึ้นทำให้แหล่งน้ำมีสภาพตื้นเขินส่งผลกระทบให้การคมนาคมทางน้ำไม่สะดวก และต้องเสี่ยงงบประมาณในการขุดลอกคลองสูง

2.5.6 ผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคม เกิดจากน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสีย ทำให้ความสวยงามตามธรรมชาติหมดไป แหล่งน้ำไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นที่พักผ่อนหย่อนใจ ไม่น่าท่องเที่ยว เป็นอันตรายต่อสุขภาพจิตและสุขภาพอนามัยของนักท่องเที่ยวและประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น ทำให้ประเทศสูญเสียรายได้ที่อาจได้จากการท่องเที่ยว และทำให้รัฐต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ซึ่งทั้งหมดจะส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจประเทศ เป็นต้น

### 3. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งการดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับทั้งสิ้น การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่นการเปลี่ยนอุณหภูมิหรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิมและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

ดังนั้นการดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ หรือกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน เป็นต้น

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และ โมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วย

จุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

### 3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับในกระบวนการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะ แทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

3.1.2 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรก ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

3.1.3 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ยึดติดที่ผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

### 3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

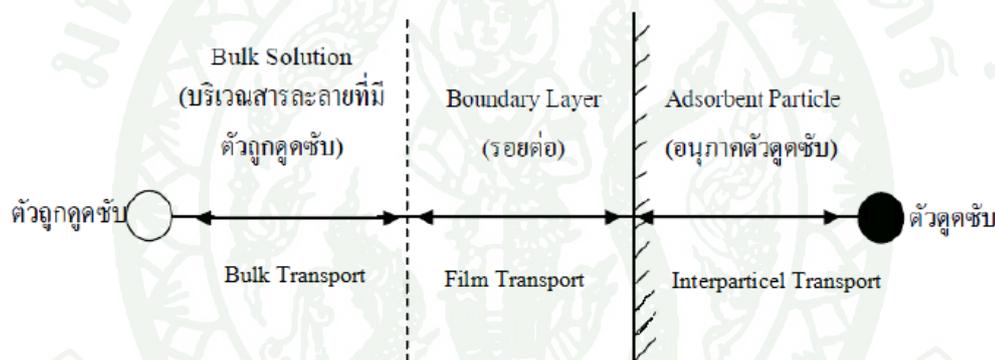
อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล โดยอัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ส่วนขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวดูดซับ นอกจากนี้ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังข้อ 3.2.1 ถึง 3.2.3 ดังนี้

3.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆหรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

3.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film/transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลว

บางๆแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน โดยที่การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือทั้งสองแบบ ซึ่งขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ แสดงดังภาพที่ 1 ต่อไปนี้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

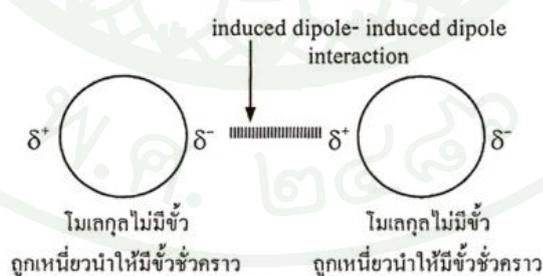
### 3.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้นอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ อธิบายดังข้อ 3.3.1 หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี อธิบายดังข้อ 3.3.2 หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

3.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) คือแรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึด

เหนี่ยวนำระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลมีขนาดเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แรงแวนเดอร์วาลส์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่าถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย โดยแรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภทดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่าทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induce dipole) ขึ้น โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราวแสดงดังภาพที่ 2



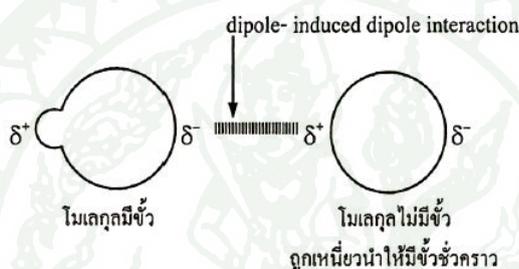
ภาพที่ 2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

จากภาพที่ 2 ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงให้มีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้น

ทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

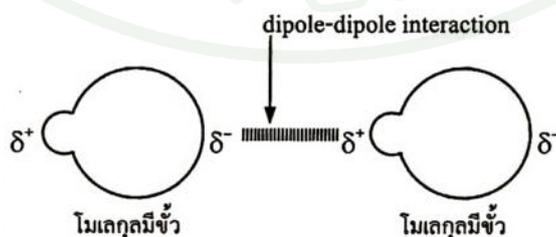
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction) โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราวแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว โดยด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole attraction) โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้วแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง (ความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนในพันธะเข้ามาหาตัวเองสูง) ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และ ไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน

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

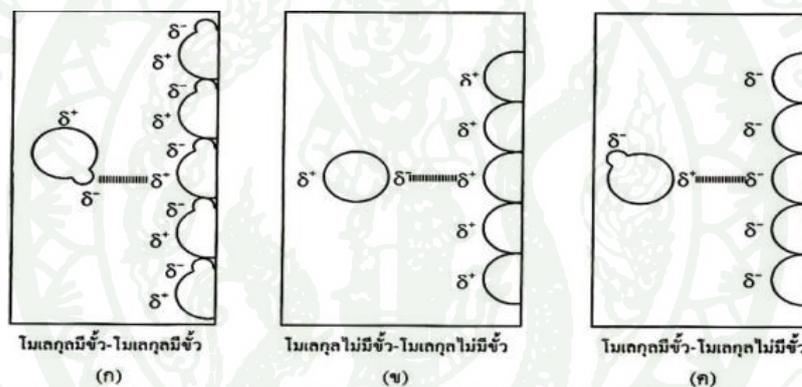
3.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ ที่เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และ โปรตอนกับโปรตอน) หรือกล่าวได้ว่า แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเพื่อให้อยู่เป็นโมเลกุล หรือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเพื่อให้อยู่กันเป็นกลุ่มก้อนนั่นเอง ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

### 3.4 รูปแบบของการดูดซับ

สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี อธิบายดังข้อ 3.4.1 และ 3.4.2 ต่อไปนี้

3.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der Waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล

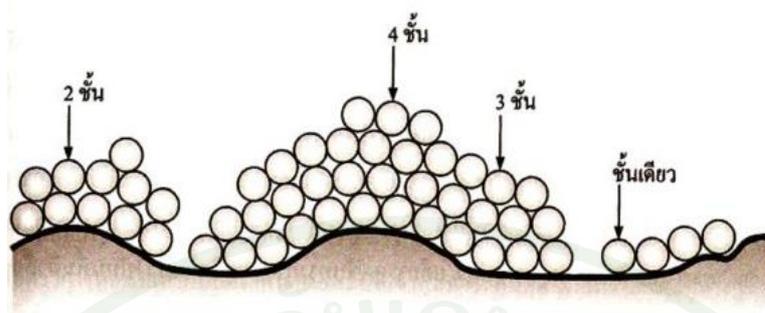
-ไดโพล และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านั้น และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับในระหว่างชั้นอาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง โดยการดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ซึ่งการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ แสดงดังภาพที่ 5 และการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้นแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากภาพที่ 5 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ ภาพ (ก) เป็นลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่ ภาพ (ข) เป็นลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่ และภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุลมีขั้วและ โมเลกุลตัวดูดซับเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว



ภาพที่ 6 การอัดตัวของตัวถุกคูดซับบนพื้นผิวตัวคูดซับบนแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

3.4.2 การอัดซับบางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมี การสร้างพันธะเคมีของตัวถุกคูดซับบนพื้นผิวของตัวคูดซับบน โดยการอัดซับบนมีการถ่ายโอน อิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรง ยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการอัดซับบนทางกายภาพ มีผลทำให้การอัดซับบน ทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การอัดซับบนทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการ ผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การอัดซับบนทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และ โมเลกุลตัวถุกคูดซับบนที่อยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การ อัดซับบนทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวคูดซับบน และจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถุกคูดซับบน ส่วนการอัดซับบนทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถุกคูดซับบน (Maron and Prutton, 1961)

### 3.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการอัดซับบน

3.5.1 ความดันป้อน อัตราเร็วในการอัดซับบนอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีความดันป้อนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวคูดซับบน จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลของตัวถุกคูดซับบนที่จะเข้าไปหาตัว คูดซับบน ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจึงเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการอัดซับบน ในตรงกันข้าม ถ้า ความดันป้อนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวคูดซับบนได้ รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วใน การอัดซับบนในกระบวนการ

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

3.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อนจากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง

3.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายซึ่งในที่นี้คือน้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

3.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

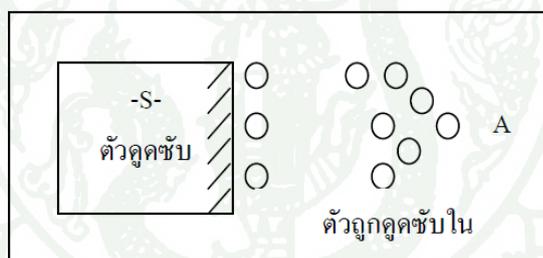
3.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

3.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่ง

เท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมพัทธ์เลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

### 3.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สภาวะสมดุลของการดูดซับจะได้ว่า จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ โดยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

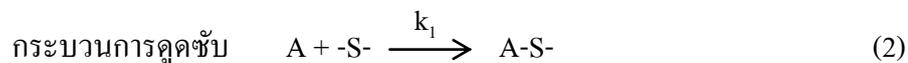
จากภาพที่ 7 กำหนดให้

A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

(1-q) เป็นสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$$r_1 = k_1 [C] (1 - q) \quad (3)$$



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วน โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2 (q)$$

ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$  ;  $k_1 [C] (1 - q) = k_2 (q)$

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

$$q = \frac{K [C]}{1 + K [C]} \quad (5)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล 
$$K = \frac{q}{C} \quad (6)$$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับจะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_i - C_e) \quad (7)$$

เมื่อ  $q$  เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม หรือ โมลต่อกรัม

$W$  เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัม หรือกิโลกรัม

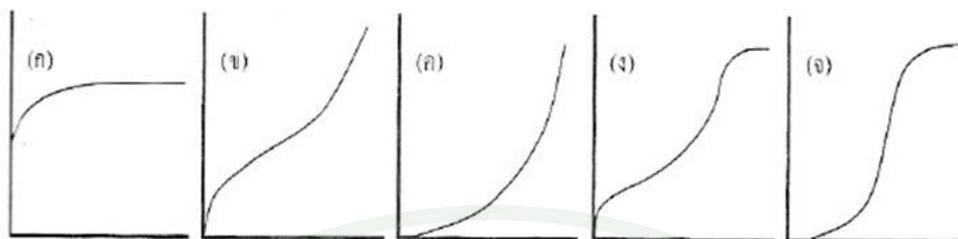
$V$  เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลิตร

$C_i$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้น โมลต่อลิตร

$C_e$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็น ความเข้มข้น โมลต่อลิตร

### 3.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 8 ภาพ (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบขั้นเดียว ส่วนภาพ (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายขั้น

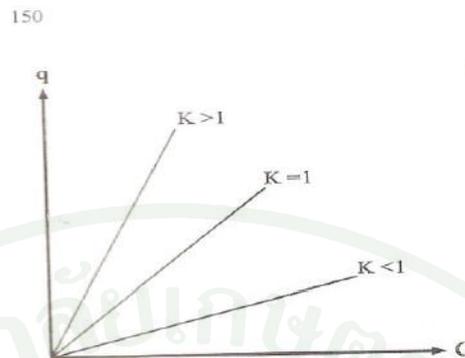
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กันดังข้อ 3.7.1 ถึง 3.7.4 ดังนี้

3.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า  $q$  และค่า  $C$

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

$$q = KC \quad (8)$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ( $q$ ) ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ( $C$ ) ที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $q$  และ  $C$  ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรงเมื่อ

$K > 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$  แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

$K = 1$  แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

3.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (freundlich adsorption isotherm) สมการใช้ในการอธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่า พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) คือพื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad (9)$$

$K$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ  $n$  ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไป  $1/n$  จะมามีค่ามากกว่าหนึ่ง และเมื่อจัดรูปสมการที่ (9) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้ดังสมการที่ (10) ดังนี้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (10)$$

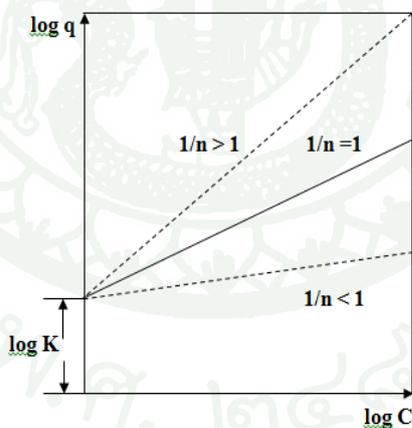
เมื่อ  $q$  คือปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$  คือ ความชันของกราฟ

$C$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $\frac{1}{n}$  และมีจุดตัดเท่ากับ  $\log K$  ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟความชันระหว่าง  $\log q$  และ  $\log C$

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

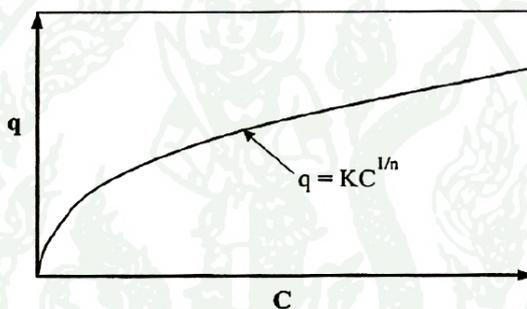
จากภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log C$  และ  $\log q$  สามารถพิจารณาได้ว่า

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

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

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

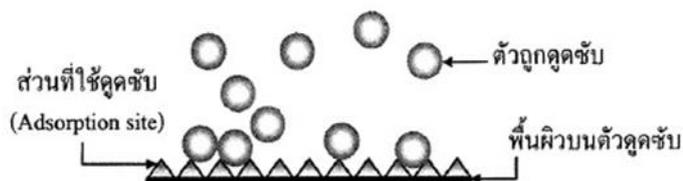
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (10) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้ โดยไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

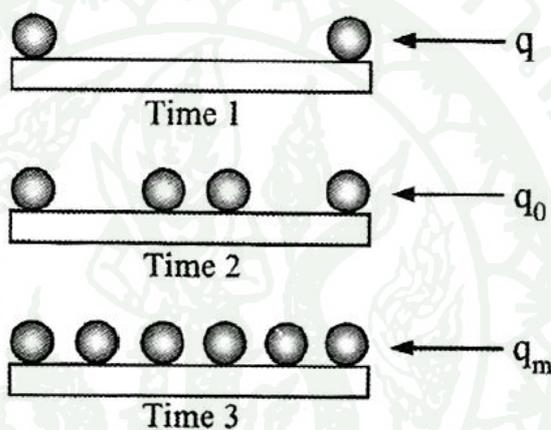
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

3.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ซึ่งตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) โดยแบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์แสดงดังภาพที่ 12 และการดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัวแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 12 แบบจำลองพื้นที่ผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 13 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

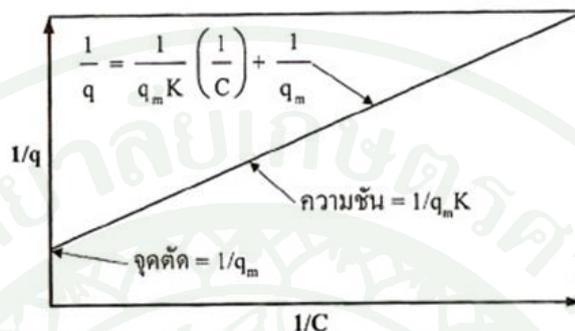
จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (2) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดคือเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ ถ้าจะใช้สมการที่ (2) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad (11)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (11) ให้อยู่ในรูปเส้นตรงจะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{Kq_m C} \quad (12)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C}$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{Kq_m}$  และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$  แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

3.7.4 สมการการดูดซับแบบเบท (Brunauer Emmett Teller หรือ BET adsorption isotherm) ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อว่า Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยสมการการดูดซับแบบเบท มีสมมติฐานตามดังที่ Brunauer *et al.* (1940) กล่าวไว้ดังนี้

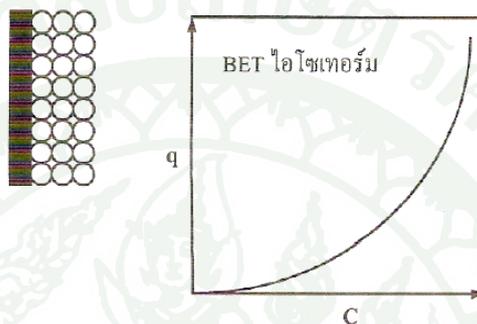
- (1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- (2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- (3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- (4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทซ์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Teller *et al.*, 1940) มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง  $q$  กับ  $C$  ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท ได้ดังภาพที่ 15 นี้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท

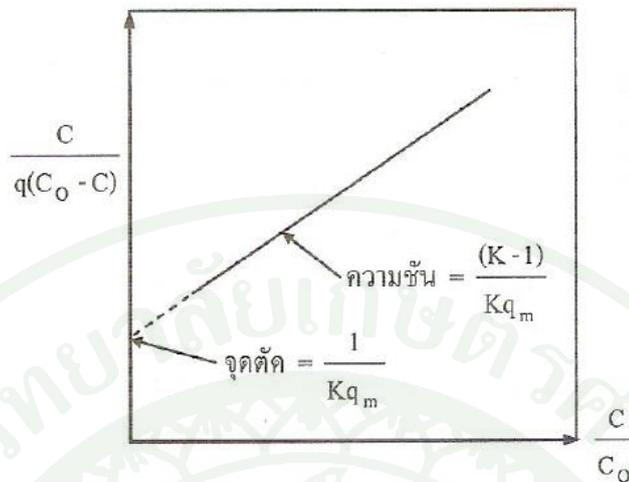
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (13) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

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

และมีจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ  $\frac{1}{Kq}$  แสดงดังภาพที่ 16 ดังนี้

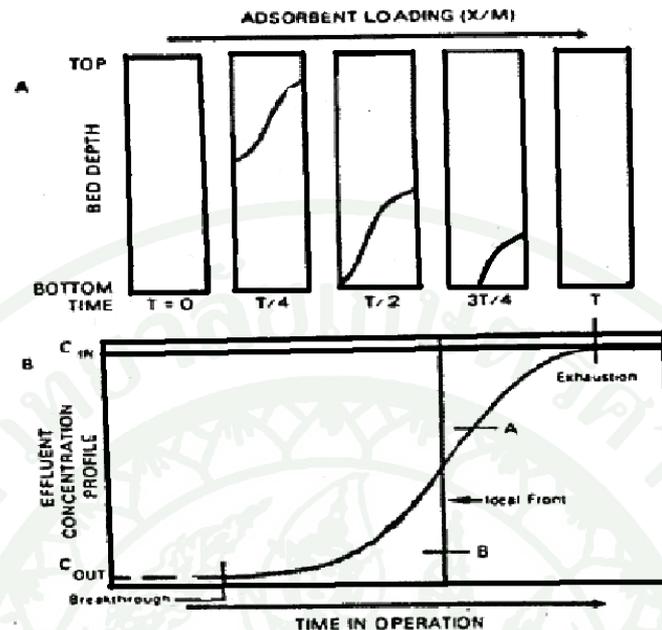


ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

### 3.8 ลักษณะของกราฟเบรคทรูจ (Breakthrough Curve) และการเคลื่อนย้ายมวลสาร สำหรับ Fixed-bed adsorption column

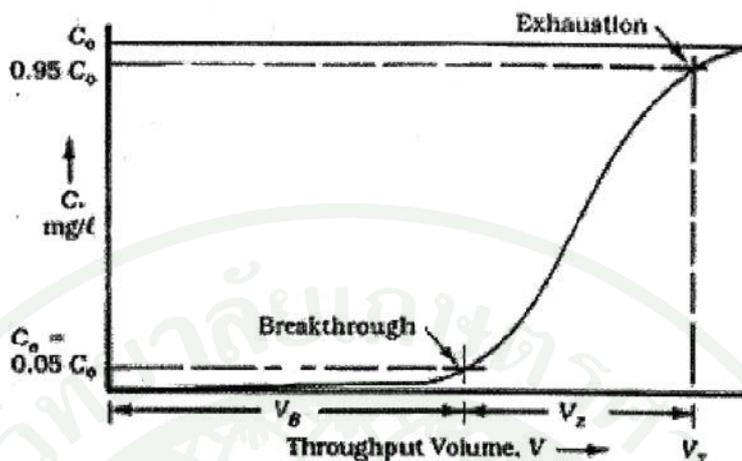
Fixed-bed Adsorption Column เป็นระบบการดูดซับที่ให้น้ำไหลผ่านชั้นดูดซับที่อยู่กับที่ซึ่งไม่มีการขึ้นลงในลักษณะเดียวกับการกรอง โดยลักษณะการดูดซับจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับจะเริ่มเคลื่อนที่ลงไปเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นสารดูดซับ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนของชั้นสารดูดซับ แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 Breakthrough Curve ของ Fixed-bed Adsorption Column

ที่มา: Barry and Thomas (199)

โดยทั่วไปกราฟเบรคทรูจมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) ณ จุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Breakthrough) หรือจุด  $C_B$  และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งตัวสูงชันคือ การดูดซับที่ค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำได้อีก ซึ่งนิยมนิยามเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve จนถึงจุด  $C_E$  ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) นิยมใช้กันที่ 95% ของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบ ในกรณีที่เส้นกราฟมีความลาดชันมากๆ แสดงว่าในการดูดซับจะมี Film Transfer Coefficient และ Internal Diffusion Coefficient สูง หรือ Freundlich Adsorption Isotherm มีลักษณะความลาดชันต่ำ ( $1/n$  มีค่าน้อย) เมื่อกรองน้ำที่มีความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น  $C_0$  ผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุสารดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายในของเหลวที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลาต่างๆ (ปริมาตรต่างๆ) คือ  $C_c$  ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นที่สนใจคือเบรคทรูจ และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นเท่ากับ  $0.95C_c$  หรือจุด  $C_E$  ซึ่งเป็นปริมาตรที่สารดูดซับหมดสภาพ (Richards and Reynolds, 1995) แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 รูปแบบของกราฟเบรคทรูจ์ในกระบวนการดูดซับ

ที่มา: Richards and Reynolds (1995)

จากภาพที่ 18 ถ้าคำนวณพื้นที่ภายใต้เส้น  $0.95C_0$  ลงมาจนถึงเส้น  $C_0$  จะได้ค่าปริมาตรสารในของเหลวทั้งหมดที่สะสมในคอลัมน์ และถ้านำปริมาณสารดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์มาหารจะได้ค่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุดูดซับที่สามารถดูดซับสารที่อยู่ในของเหลวนั้นๆ โดยความสามารถในการดูดซับเท่ากับผลรวมของพื้นที่ที่แบ่งเป็นส่วนเล็กๆ หารด้วยวัสดุดูดซับที่นำมาใช้เป็นสารดูดซับในคอลัมน์ ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้นั้นคือ

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

โดย  $C_0$  = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่จุดหมดสภาพ (95% ของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่อยู่ในของเหลวที่เข้าระบบ)

$C_{ci}$  = ความเข้มข้นของสารที่อยู่ในของเหลว (Solute) ที่ผ่านระบบ ณ ปริมาตรที่  $i$

$V_i$  = ปริมาตร ณ เวลา  $i$

## 4. เถ้าลอยลิกไนต์

### 4.1 สภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เป็นของเสียจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีของการเผาไหม้เปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุที่มีอยู่ให้เป็นแร่ธาตุในรูปของออกไซด์ของโลหะที่ซับซ้อนหลายชนิด โดยเถ้าลอยลิกไนต์จะมี 2 สภาพคือ เถ้าหนัก และเถ้าลอย อธิบายได้ดังนี้

4.1.1 เถ้าหนัก (bottom ash หรือ wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่จะปะทะกันกับผนังเตาและหลอมติดรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่เมื่อน้ำหนักรวมกันมากเข้าจนเกาะติดผนังไม่ได้ก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

4.1.2 เถ้าลอย (fly ash, pulverized fuel หรือ dry ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า (electrostatic precipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บขี้เถ้า ปริมาณของเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เหลือจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะมีปริมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักถ่านหินที่เผา (วิจิตรอัจฉรา, 2536)

### 4.2 คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์พบว่าจะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของถ่านหินที่นำมาใช้ โดยส่วนใหญ่เถ้าลอยที่มาจากถ่านหินลิกไนต์ประกอบด้วย ซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) อะลูมินัมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 40.89 14.54 และ 13.33 โดยน้ำหนักตามลำดับ รวมถึงองค์ประกอบอื่นๆแสดงตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์

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

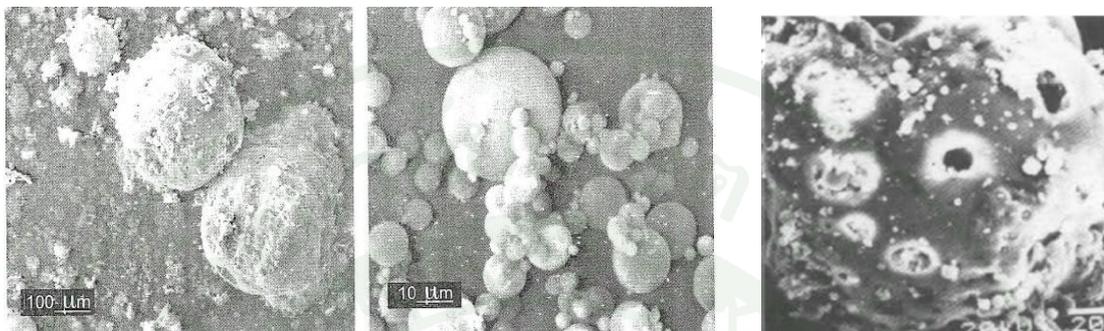
หมายเหตุ LOI (Loss On Ignition) คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาหรือคาร์บอนที่มีในเถ้าลอย

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2549)

#### 4.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

โครงสร้างทางกายภาพของเถ้าถ่านหินที่บดละเอียดผ่านการเผาไหม้ ถ่านหินจะสันดาป และหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เถ้าถ่านหินจะเริ่มเย็นลง หลังออกจากเตาเผา ผลจากการที่หลอมละลายหลังจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้เถ้าลอยที่ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นทรงกลม และอยู่ในสถานะแก้ว เถ้าลอยส่วนหนึ่งเกิดจากการประทะกันของเถ้าถ่านหินขนาดเล็ก ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ขนาดยังคงไม่ใหญ่มากนักจึงสามารถลอยตามอากาศร้อนไปได้ โดยเถ้าลอยขนาดเล็กจะผ่านการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่า และจะมีทรงกลมและผิวเรียบกว่า ส่วนเถ้าลอยขนาดใหญ่จะมี

รูปร่างที่ไม่แน่นอน ผิวขรุขระและมีรูพรุนเล็กๆที่ผิว เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง เมื่อเปรียบเทียบรูปร่าง และลักษณะผิวของถ้ำลอยขนาดเล็กกับถ้ำลอยขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 19



(ก.)

(ข.)

ภาพที่ 19 เปรียบเทียบรูปร่างและลักษณะผิวของถ้ำลอยขนาดเล็ก (ก.) กับถ้ำลอยขนาดใหญ่ (ข.)

ที่มา: ธีรวัฒน์ (2554)

นอกจากนี้ความละเอียดและรูปร่างของถ้ำถ้ำหิน ยังขึ้นอยู่กับกระบวนการบดถ้ำหินที่จะนำไปเผา ชนิดของเครื่องบด ชนิดของเตาเผา อุณหภูมิการเผา และสภาพแวดล้อม (วรวิฑูรี, 2553) กล่าวคือ ถ้ำบดถ้ำหินละเอียดมากขึ้นและเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ในเตาเผาจะทำให้ได้ถ้ำถ้ำหินที่มีความละเอียดสูงกว่าเมื่อใช้ถ้ำหินที่บดหยาบกว่าหรือเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะมีถ้ำหินปนอยู่จำนวนมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ้ำหินที่บดละเอียดจะมีขนาดใหญ่กว่าถ้ำถ้ำหินมาก ดังนั้นความละเอียดของถ้ำถ้ำหินจึงขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน

โครงสร้างทางกายภาพของถ้ำลอยยังประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีโพรงข้างในที่เรียกว่า ซีโนสเฟีย (Cenosphere) ซึ่งเกิดจากการที่ก๊าซจากการเผาไหม้ของถ้ำหินถูกกักไว้ภายในถ้ำลอย และยังมีถ้ำลอยกลวงที่มีอนุภาคถ้ำถ้ำหินเล็กๆอยู่ภายในเรียกว่า พลีโรสเฟีย (Plerosphere) ถ้ำลอยกลวงมีตั้งแต่ขนาดเล็กไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายร้อยไมครอน ความกลวงทำให้ความถ่วงจำเพาะของถ้ำถ้ำหินต่ำกว่าปกติ (ปกติความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.2-2.8) ตัวอย่างเช่นความถ่วงจำเพาะของถ้ำถ้ำหินที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปางอยู่ที่ 2.0-2.2 โดยที่องค์ประกอบหลักของถ้ำลอย

กลวง คือ ออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เนื่องจากเถ้าลอยกลวงเป็นเถ้าลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติด้านการทนไฟและมีน้ำหนักเบา จึงได้มีการศึกษาเพื่อนำเถ้าลอยกลวงมาใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตน้ำหนักเบาและคอนกรีตที่มีคุณสมบัติด้านการทนไฟและการเก็บเสียง ด้วยเหตุนี้ ASTM C618 จึงแบ่งเถ้าลอยออกเป็น 2 ประเภท คือ เถ้าลอย Class C และเถ้าลอย Class F โดยที่เถ้าลอย Class C มีปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กน้อยกว่าร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยที่ได้ได้จากการเผาถ่านหินประเภท ชัมบิทูมินัส หรือ ลิกไนต์ ส่วนเถ้าลอย Class F มีปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็กมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยที่ได้ได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซด์หรือบิทูมินัส การแบ่งประเภทของเถ้าลอย Class C และเถ้าลอย Class F แสดงดังภาพที่ 20 ต่อไปนี้



(ก.)

(ข.)

ภาพที่ 20 การแบ่งประเภทของเถ้าลอย Class C (ก.) และเถ้าลอย Class F (ข.)

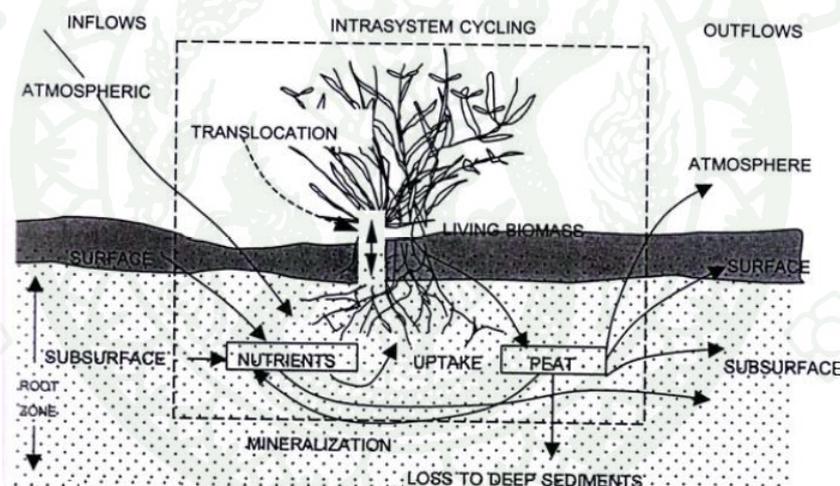
ที่มา: ชีรวัดน์ (2554)

## 5. เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางธรรมชาติโดยใช้พืชบำบัด

การแก้ไขปัญหาหน้า้เสียโดยใช้เทคโนโลยีพืชบำบัด (Phytoremediation) เป็นการใช้ความสามารถในการดูดซับและการสังเคราะห์แสงของพืชร่วมกับจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมอื่นๆ เพื่อบำบัดสารมลพิษทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ตะกอนดิน อากาศหรือในสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เพื่อลดอันตรายของสารมลพิษที่มีต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางชีวภาพพึ่งพาสีงที่มีอยู่แล้วในระบบธรรมชาติจึงเป็นการบำบัดที่มีค่า

ดำเนินการบำรุงรักษาต่ำ สามารถบำบัดได้ในพื้นที่ปนเปื้อน (in situ) และเป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการบำบัดโดยวิธีทางฟิสิกส์และเคมีที่มีการลงทุนก่อสร้างหรือมีค่าบำรุงรักษาระบบสูง ใช้สารเคมีราคาแพง เป็นต้น

การใช้พืชบำบัดน้ำเสียก่อให้เกิดความสมดุลของมวลภายในระบบ โดยมีการหมุนเวียนของธาตุอาหาร และสารเคมีต่างๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในแปลงพืชนั้น เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การตกตะกอน การกรอง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน กระบวนการดูดซึมธาตุอาหาร กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน เป็นต้น กระบวนการเหล่านี้จะช่วยในการเปลี่ยนรูปหรือบำบัดสารที่ปนเปื้อนในน้ำเสียที่อาจเป็นสารมลพิษหรือสารที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 21 ดังนี้



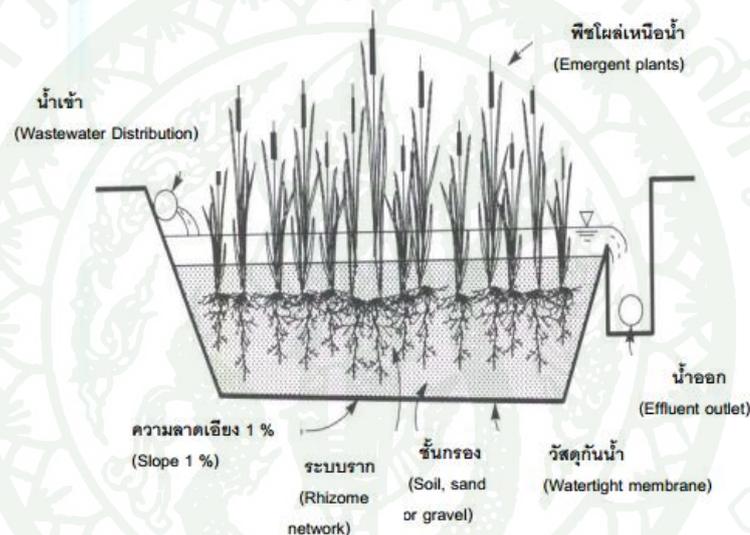
ภาพที่ 21 การหมุนเวียน สะสม และการเปลี่ยนรูปของธาตุอาหารในแปลงพืชบำบัด

ที่มา: Massechelyn and Patrick (1994)

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางธรรมชาติโดยใช้พืชบำบัดในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ ซึ่งเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เพื่อบำบัดน้ำเสีย มีหลักการเบื้องต้นเหมือนกับพื้นที่ชุ่มน้ำธรรมชาติ คือมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาอาศัยพืชน้ำ จุลินทรีย์ ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย โดยพืชและดินช่วยดูดซับมลสาร จุลินทรีย์ที่อยู่ในดินจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เปลี่ยนให้เป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นธาตุอาหารของพืชแล้วดูดธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต ทำ



ความลึกประมาณ 0.3 เมตร พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในรูปแบบนี้อาศัยการทำงานของพืชในการบำบัดน้ำเสียเป็นหลัก ซึ่งจะปล่อยให้ น้ำเสียไหลเข้าระบบอย่างช้าๆ ผ่านก้านต้นพืช และรากพืช เกิดการไหลของน้ำแบบไหลตามกันอย่างช้าๆ (Plug-Flow) น้ำเสียจะไหลตามแนวนอนขนานกับพื้นดินซึ่งมีการบดอัดดินให้แน่นหรือปูด้วยวัสดุกันซึม โดยพืชน้ำจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของแร่ธาตุ เป็นที่ยึดเกาะของพวกจุลินทรีย์ เกิดการตกตะกอนโดยพืช และการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน ทำให้ค่าบีโอดีลดลง (สุวศา, 2546) ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวแสดงในภาพที่ 22

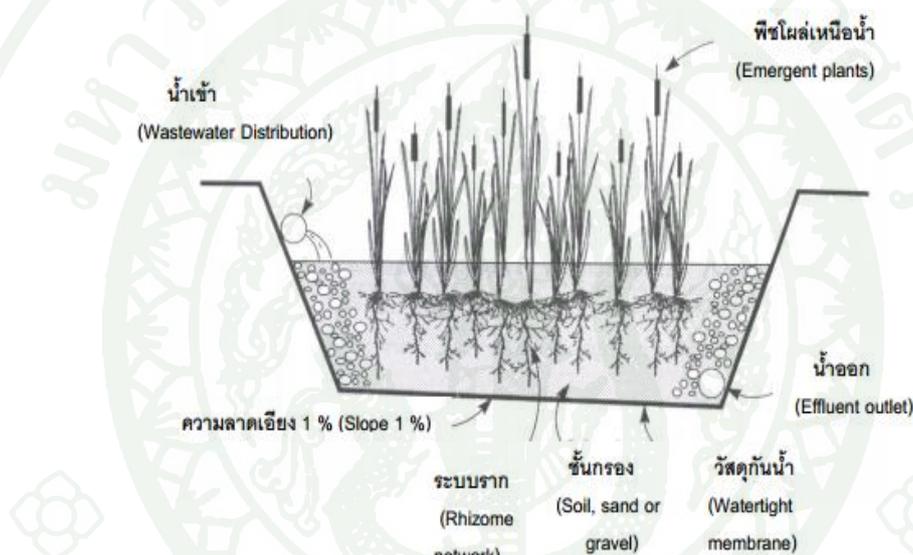


ภาพที่ 22 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว

ที่มา: สุวศา (2548)

5.1.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง (Subsurface Flow Constructed Wetland; SF) เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยผ่านลงไปชั้นดักกลางที่มีพืชน้ำขึ้นอยู่ ดักกลางที่ใช้เป็นพวกหินบด กรวด หรือดินชนิดต่างๆ ซึ่งดักกลางอาจมีเพียงชนิดใดชนิดหนึ่งหรือใช้รวมกันได้ (ลักษณะ, 2539) ความหนาชั้นดักกลางประมาณ 0.6 – 0.7 เมตร ด้านล่างอัดด้วยดินเหนียวหรือวัสดุกันซึม เพื่อรักษาระดับน้ำซึ่งจะต่ำกว่าผิวดักกลางเล็กน้อย (สุวศา, 2546) โดยที่ทางน้ำเข้าจะไหลผ่านข้างใต้ชั้นดักกลางในแนวนอนหรือแนวตั้งได้ และทางน้ำออกอยู่ลึกจากผิวดักกลางประมาณ 0.3 – 0.6 เมตร (ระดับน้ำอยู่เท่ากันหรือต่ำกว่าผิวดิน) พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ระบบนี้ น้ำเสียที่ผ่านเข้าระบบจะถูกบำบัดระหว่างสัมผัสพื้นผิวดักกลางและรากพืชซึ่งมีจุลินทรีย์เกาะอยู่ โดยสารแขวนลอย

หรือสารอินทรีย์จะตกตะกอนภายในตัวกลาง ส่วนสารที่ละลายได้จะถูกดูดซับที่ผิวของตัวกลาง และย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่ใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ธาตุอาหารในน้ำเสียจะลดลงเนื่องจากกลไกการดูดซึมของพืช พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางสามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง และชนิดของน้ำเสีย (วัชรพงษ์, 2554) ระบบนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีภาระสารอินทรีย์ปานกลาง ที่มีความเข้มข้นของบีโอดีอยู่ในช่วง 30 – 175 มก./ลิตร (United States Environmental Protection Agency, 2000) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลางแสดงดังในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวตัวกลาง

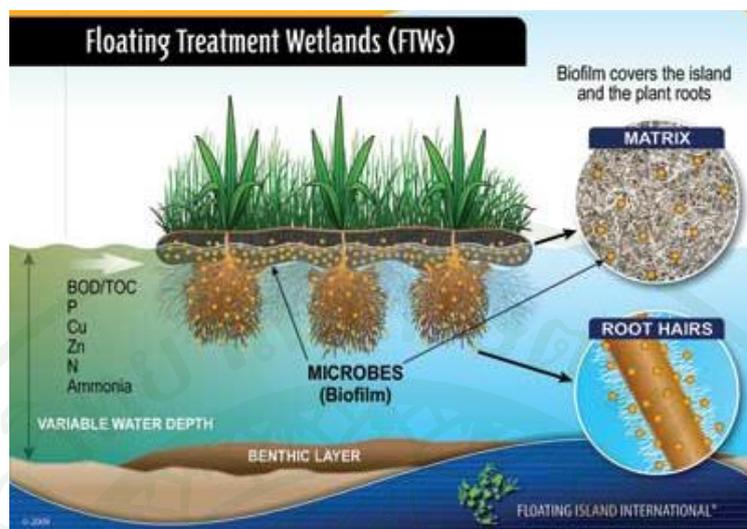
ที่มา: สุชาติ (2548)

## 5.2 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบพืชลอยน้ำ (Floating Plant Constructed Wetland)

พืชลอยน้ำ (Floating Plant) เป็นพืชที่เจริญเติบโตได้โดยลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ รากจะอยู่ใต้น้ำ ส่วนของลำต้น ใบ และดอก อยู่เหนือน้ำหรือผิวน้ำ สามารถลอยไปมาได้ หากพืชเหล่านี้อยู่บริเวณน้ำตื้นรากของพืชชนิดนี้อาจยึดอยู่กับพื้นดินใต้น้ำได้ ซึ่งพืชบำบัดน้ำเสียจำพวกนี้ได้แก่ ผักตบไทย ผักตบชวา จอกหูหนู แหนกระจับ ผักบู่ เป็นต้น โดยคุณลักษณะเด่นของพืชลอยน้ำที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียคือ พืชเจริญเติบโตและลอยอยู่ที่ระดับน้ำ มีระบบรากห้อยยาวลอยอยู่ได้

ระดับน้ำ มีท่อนเพื่อพองลำต้นให้ลอยน้ำได้ จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ที่ราก (Rhizoplane) ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์

ในการบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยใช้พืชลอยน้ำ เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างพืชลอยน้ำ สาหร่าย จุลินทรีย์ สายลม และแสงแดด การดำรงชีวิตในลักษณะที่พึ่งพาอาศัยกันและกันนี้เรียกว่า Symbiosis (วิมลพรรณ, 2542) ภายในบ่อดินขนาดใหญ่ความลึกของบ่ออยู่ในระดับที่แสงแดดสามารถส่องได้อย่างทั่วถึง เป็นบ่อที่เกือบเหมือนกับบึงประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว โดยทั่วไปมีความลึก 0.5–2 เมตร ใช้ระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบบ่อฝั่ (Oxidation ponds) หรือบ่อกึ่งไร้อากาศ (Facultative Oxidation ponds) เป็นระบบบ่อบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีววิทยาอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจำแนกได้เป็น 3 ประเภทคือ ส่วนบนของบ่อเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ใช้อากาศ (Aerobic Bacteria) ส่วนกลางของบ่อเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กึ่งไร้อากาศ (Facultative Bacteria) และส่วนล่างของบ่อเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Bacteria) ในระบบพืชลอยน้ำมีหน้าที่เป็นตัวกรองน้ำเสียที่ไหลผ่าน จุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่รากมีความสามารถในการดึงแก๊สออกซิเจนหุ้มราก ออกซิเจนที่ถูกดึงให้หุ้มห่อรอบรากพืชน้ำนี้สร้าง rhizosphere มีหน้าที่ดูดน้ำและอาหาร (โสมนัส และ ศุวศา, 2545) ระบบรากที่มีจำนวนมากจะช่วยกรองสารอินทรีย์ที่ละเอียด จุลินทรีย์ที่อาศัยเกาะอยู่ที่รากจะช่วยดูดสารอินทรีย์ไว้ด้วยอีกทางหนึ่ง สารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการการเมแทบอลิซึม ทำให้ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก รวมถึงสารมลพิษอื่นๆ ในน้ำเสียถูกกำจัดไปโดยวิธีการทางชีวภาพที่ธรรมชาติสามารถช่วยบำบัดธรรมชาติเองได้ (กลุ่มศึกษาและสนับสนุนองค์การปกครองส่วนท้องถิ่น สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) โดยภาพของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์โดยใช้พืชลอยน้ำ แสดงดังภาพที่ 24 ต่อไปนี้



ภาพที่ 24 พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบพืชลอยน้ำ

ที่มา: Mark (2014)

### 5.3 กลไก และประสิทธิภาพในการบำบัดของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ในระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มลสารต่างๆ จะถูกบำบัดด้วยกระบวนการที่ซับซ้อนมากมาย ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตกตะกอน การดูดซับโดยอนุภาคของดิน การสะสมในพืช และการเปลี่ยนรูปโดยจุลินทรีย์ เป็นต้น

#### 5.3.1 การกำจัดสารอินทรีย์

ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ จุลินทรีย์จะมีหน้าที่สำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทั้งที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ และเกาะกันอยู่ในรูปของตะกอน โดยสารอินทรีย์ที่ตกตะกอนได้จะจมสู่พื้นบ่อเกิดการย่อยสลายแล้วซึมลงดิน ส่วนสารละลายอินทรีย์จะถูกบำบัดโดยจุลินทรีย์ทั้งที่ใช้ ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจนที่เกาะติดอยู่กับพืชและที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ส่วนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศจะเกิดขึ้นในช่วงที่ออกซิเจนขาดแคลนหรือเกิดในชั้นตะกอนที่ไม่มีออกซิเจน สารที่ถูกย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นปุ๋ยสำหรับพืชดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งการกำจัดสารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวและพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน โดยจะขึ้นอยู่กับความนิ่งของน้ำ

อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ และแหล่งออกซิเจนที่ใช้ในปฏิบัติการบำบัดสำหรับกรณีที่เป็นพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางจะขึ้นอยู่กับปริมาณตะกอนที่สะสมอยู่ในชั้นกรอง และอัตราการซึมของน้ำผ่านชั้นกรอง โดยออกซิเจนสามารถถ่ายเทผ่านได้ง่าย (ศุวศา, 2546)

### 5.3.2 การกำจัดของแข็งแขวนลอย

โดยทั่วไปพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำหลายวัน การลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีผลมาจากกระบวนการที่ซับซ้อนหลายกระบวนการรวมถึงการเคลื่อนย้ายของของแข็งโดยสิ่งมีชีวิตในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ด้วย โดยเฉพาะเมื่อน้ำเสียที่ผ่านพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีความเร็วของน้ำต่ำ มีพืชปกคลุม มีดินที่เหมาะสมจะช่วยในการกรองและการตกตะกอน การกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นกระบวนการที่ทำให้คุณภาพน้ำดีขึ้น และ Kadlec and Knight (1999) กล่าวว่า ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้ำนาน การไหลของน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ค่อนข้างช้า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทางกายภาพของของแข็งแขวนลอย นอกจากนี้ความหนาแน่นของพืชจะเพิ่มการจมตัวของของแข็งแขวนลอยโดยการตกตะกอน เนื่องจากพืชจะจับของแข็งแขวนลอยไว้ในชั้นดักกลางที่มีการสะสมของซากพืชและซากสัตว์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดของแข็งแขวนลอยของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิว ส่วนพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถกรองของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดเล็กผ่านชั้นของดักกลาง ซึ่งช่วยป้องกันการปนออกมานอกกระบวนการของแข็งแขวนลอย

### 5.3.3 การกำจัดไนโตรเจน

การกำจัดไนโตรเจนของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีหลายกลไก คือ การนำไปใช้โดยพืช การดูดซับแอมโมเนียไนโตรเจนในดิน การระเหยในรูปของแอมโมเนีย กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน ซึ่งการบำบัดจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของไนโตรเจนที่เข้าสู่ระบบ เช่น แอมโมเนียจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนเตรทโดยไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่มีออกซิเจน และไนเตรทจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจนโดยดีไนตริฟายอิงแบคทีเรียในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจน โดยออกซิเจนที่ใช้ในกระบวนการไนตริฟิเคชันมาจากการถ่ายเทจากบรรยากาศลงสู่ผิวน้ำ และที่ซึมผ่านจากรากพืช (กลอยกาญจน์, 2544; วีระ, 2545) โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีการเปลี่ยนรูปของ

ไนโตรเจนซึ่งจะเกิดในชั้นออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของตัวกลางหรือผิวหน้าของรากฝอย (Boyd, 1970) และส่วนของพืชที่จมอยู่ใต้ตัวกลางนั้น สารอินทรีย์ในไนโตรเจนจะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ของชั้นตัวกลาง โดยที่ชั้นของการออกซิไดซ์และส่วนที่อยู่ใต้ตัวกลางของพืชเป็นตำแหน่งสำคัญสำหรับไนตริฟิเคชันที่แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรีย และเปลี่ยนเป็นไนเตรทในที่สุดโดยแบคทีเรียที่ระดับพีเอชสูง แอมโมเนียจะอยู่ในรูปก๊าซแอมโมเนียและสูญหายไปในบรรยากาศโดยกระบวนการระเหย ไนเตรทในชั้นรีดิวซ์จะลดลงโดยผ่านกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน การกรองและบางส่วนถูกพืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป (วิทิต, 2545)

#### 5.3.4 การกำจัดฟอสฟอรัส

การกำจัดฟอสฟอรัสของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ คือ การตกตะกอนผลึก การดูดซับโดยตัวกลาง และการดูดซึมโดยพืช (วีระ, 2545) เมื่อตัวกลางดูดซับฟอสฟอรัสไว้พืชจะดูดซึมผ่านทางราก และนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ต่อไป ถ้าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มีระยะเวลาเก็บกักน้ำที่นานและชั้นตัวกลางเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด กลไกหลักที่เกิดขึ้น คือ การดูดติดผิวแล้วตกตะกอนเนื่องจากในกรณีดังกล่าวฟอสฟอรัสจะมีเวลาสัมผัสและดูดซับเข้าไปในตัวกลางได้มากขึ้น โดยกลไกการบำบัดที่สำคัญของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ที่กล่าวมาสามารถแสดงดังตารางที่ 8 ดังนี้

ตารางที่ 8 กลไกการกำจัดมลสารต่างๆในน้ำเสียของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ส่วนประกอบ	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	
	แบบไหลผ่านพื้นผิว	แบบไหลใต้ผิวดิน
1. สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีววิทยา	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนรูปทางชีววิทยาโดยสถานะแอโรบิก แฟคัลเททีฟ และแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนพืช และตะกอนที่ทับถมบนพื้นผิว</li> <li>- กระบวนการดูดติดผิว</li> <li>- การกรอง และตกตะกอน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเปลี่ยนรูปทางชีววิทยาโดยสถานะแอโรบิก แฟคัลเททีฟ และแอนแอโรบิก แบคทีเรียที่อาศัยอยู่บนพืช และตะกอนที่ทับถมบนพื้นผิว</li> <li>- กระบวนการดูดติดผิว</li> <li>- การกรอง และตกตะกอน</li> </ul>

## ตารางที่ 8 (ต่อ)

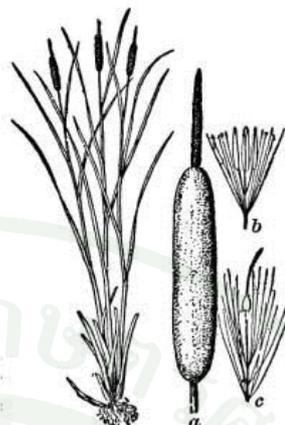
ส่วนประกอบ	พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	
	แบบไหลผ่านพื้นผิว	แบบไหลใต้ผิวดักกลาง
2. ของแข็งแขวนลอย	- การตกตะกอน - การกรอง	- การกรอง
3. ไนโตรเจน	- ไนตริฟิเคชัน/ ดีไนตริฟิเคชัน - การดูดซึมโดยพืช - การระเหยเป็นไอ	- ไนตริฟิเคชัน/ ดีไนตริฟิเคชัน - การดูดซับโดยตัวกลาง - การดูดซึมโดยพืช
4. ฟอสฟอรัส	- การตกตะกอน - การดูดซึมโดยพืช	- การกรอง - การดูดซับโดยตัวกลาง - การดูดซึมโดยพืช
5. สารอินทรีย์ปริมาณน้อย	- การดูดซับ - การย่อยสลายทางชีววิทยา	- การดูดซับ - การย่อยสลายทางชีววิทยา

ที่มา: Ron and George (1998)

## 6. พืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

### 6.1 ต้นธูปฤาษี

ต้นธูปฤาษีมีชื่อเรียกสามัญคือ Narrow-leaved cattail, Lesser reedmace, Bulrush, Cattail, Flag, Reedmace tule, Elephant-Grass และ Indian Leedmace โดยมีชื่อท้องถิ่นคือ ธูปฤาษี (กรุงเทพฯ), กกช้าง (ภาคกลาง), หญ้าสลาบลวง (ภาคเหนือ), เพ็ญ, หญ้าเพ็ญ, ปรีอ, หญ้าปรีอ และ หญ้ากกช้าง (ดวงพร และ รังสิต, 2544) ซึ่งต้นธูปฤาษีแสดงดังภาพที่ 25 ดังนี้



Cat-tail (*Typha latifolia*).  
*a*, the spike, with male flowers above and female ones below; *b*, a male flower; *c*, a female flower.

### ภาพที่ 25 ต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.)

**ที่มา:** สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2552)

ในอดีตต้นธูปฤาษีถือเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่ทำให้ความเสียหายต่อสภาวะแวดล้อม และการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลง ทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็นเป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำและการพักผ่อนหย่อนใจ การควบคุมและกำจัดวัชพืชชนิดนี้ทำได้หลายวิธี เช่น ตัด เผา ควบคุม และใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามการควบคุม และกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำให้ต้นธูปฤาษีหมดไปจากพื้นที่ได้ เนื่องจากกำจัดได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือน้ำเท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการนำธูปฤาษีมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้แก่ ใช้เป็นอาหารสัตว์ ทำเครื่องจักรสาน ใช้เป็นเชื้อเพลิงและปุ๋ยหมัก รวมถึงการนำธูปฤาษีมาบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการทางธรรมชาติ เป็นต้น

#### 6.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของธูปฤาษีมีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้

Division: Magnoliophyta

Class: Liliopsida

Subclass: Commelinidae

Order: Typhales

Family: Typhaceae

Genus: *Typha*

Species: *angustifolia*

พืชในสกุล *Typha* ที่มีอยู่ทั่วโลกประมาณ 15 ชนิด (สุรชัย, 2538) ได้แก่ *Typha angustifolia*, *Typha angustata*, *Typha anstralis*, *Typha capensis*, *Typha crorientalis*, *Typha davidians*, *Typha domingensis*, *Typha elephantine*, *Typha glauca*, *Typha javanica*, *Typha latifolia*, *Typha laxmannii*, *Typha minima*, *Typha muelleri* และ *Typha orientalis*

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ รูปถ่ายเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี ขึ้นในที่ลุ่มมีน้ำขัง เจริญตั้งตรงเป็นกอสูงประมาณ 1-2 เมตร มีลำต้นใต้ดินเรียกว่า เหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ ใบเป็นใบเดี่ยวแบนเรียบเรียวยาวแหลม ความกว้างของใบประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ยาวมากกว่า 1 เมตร กลางใบมีลักษณะเซลล์ที่มีความยืดหยุ่นเหมือนฟองน้ำ โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกัน กาบใบด้านในมีเมือกเหนียว ดอกออกเป็นช่อแบบสไปค์ (spike) ช่อดอกกลมคล้ายรูป ดอกตัวผู้กับดอกตัวเมีย จะแยกกันอยู่กันคนละส่วนในช่อดอกเดียวกัน คือส่วนที่เป็นดอกตัวผู้อยู่ด้านบนของช่อดอก ดอกย่อยอยู่กันหลวมๆ รอบก้านช่อดอกมีความยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่างเป็นดอกตัวเมีย ดอกย่อยเรียงตัวอัดกันแน่น ความยาวช่อดอก 7-28 เซนติเมตร เมล็ดขนาดเล็กกว้าง 0.2-0.3 มิลลิเมตร ยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร เมล็ดมีขนสั้นละเอียดสีขาวคล้ายไหม (silky) ปกคลุม ปลายทั้งสองด้านเรียวยาว โดยปลายด้านหนึ่งมีหางหรือเส้นยาวยื่นออกมาจากเมล็ด มีลักษณะเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยหนู (สุรชัย, 2538; ดวงพร และ รังสิต, 2554)

### 6.1.2 นิเวศวิทยาและการแพร่กระจาย

ธูปฤาษีจัดเป็นวัชพืชในกลุ่มวัชพืชชายดิ่ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา สามารถแพร่กระจายทั่วไปได้ในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และยังพบได้ในอเมริกาเหนือและชายฝั่งแปซิฟิก สำหรับประเทศไทยนั้นพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น ในบริเวณหนองน้ำ บึง นาข้าว ร่องน้ำข้างถนน และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ต้นธูปฤาษีที่อยู่ในเขตที่ลุ่มจะมีการเจริญเติบโตได้ตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์โดยเหง้าและเมล็ด ออกดอกตั้งแต่เดือนสิงหาคมเป็นต้นไป ช่อดอกมีลักษณะคล้ายก้านธูปขนาดใหญ่สีน้ำตาล มีเมล็ดประมาณ 20,000-700,000 เมล็ด (Grace and Harrison, 1986) เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตกเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนุนและปลิวกระจายทั่วไปในสภาพที่มีแสงจัด เมล็ดสามารถงอกและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นยังสามารถเจริญเติบโตในสภาพดินและน้ำที่มีความเค็มสูงได้ (Wilcox, 1986)

### 6.2 หญ้าแฝก

หญ้าแฝก (Vetiver Grass; ชื่อวิทยาศาสตร์: *Vetiveria zizanioides*) เป็นพืชตระกูลหญ้า เช่นเดียวกับอ้อยหรือตะไคร้ มีใบเลี้ยงเดี่ยวอายุยืน สามารถปรับตัวได้เข้ากับสภาวะแวดล้อมได้ดี มีความทนทานต่อโรคพืช ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติในเขตร้อน กระจายทั่วไปในประเทศไทย ศูนย์กลางของการกระจายพันธุ์ของแฝก สันนิษฐานว่าอยู่บริเวณทางตอนกลางและตอนใต้ของประเทศอินเดีย และได้แพร่กระจายลงมาบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะในประเทศแถบเส้นศูนย์สูตรของทวีปเอเชีย หญ้าแฝกสามารถขึ้นได้ในดินเกือบทุกชนิดตั้งแต่พื้นที่ลุ่มจนถึงพื้นที่ดอน ลักษณะกอหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางกอประมาณ 50-90 เซนติเมตร มีรากส่วนใหญ่เป็นระบบรากฝอยสานกันแน่นยังตรงลึกแนวตั้งลงในดินไม่แผ่ขนาน มีทั้งรากแกนรากแขนง (ดวงพร และ รังสิต, 2544) หญ้าแฝกที่มีอายุประมาณ 18 เดือน รากจะเจริญเติบโตเต็มที่ เมื่อรากแก่ผนังด้านนอกจะแข็ง มีลักษณะอวบน้ำจะตายและจะถูกแทนที่ด้วยเซลล์ชั้นที่อยู่ถัดไปทำให้รากหนาขึ้น มีความแข็งแรง ดูดซับน้ำและความชื้น โดยเฉพาะป้องกันส่วนลำเลียงน้ำและอาหารที่อยู่ภายในได้ดีขึ้น

ในสภาพธรรมชาติหญ้าแฝกมีถิ่นกำเนิดตามพื้นที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ทางน้ำธรรมชาติริมหนอง บึง ในป่าเขา เมื่อนำพันธุ์ที่ได้คัดเลือกแล้วไปปลูกในพื้นที่ต่างๆทั่วโลก พบว่าขึ้นได้ดีเกือบทุกสภาพพื้นที่ โดยหญ้าแฝกสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพภูมิประเทศเป็นที่ราบใกล้เคียงระดับน้ำทะเลถึงพื้นที่ภูเขาสูงถึง 2,600 เมตร จากระดับน้ำทะเล พื้นดินเปรี้ยว (pH 4.5) ดินด่าง (pH

10.5) ดินเค็ม (20 มิลลิโม่) ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ พื้นที่มีปริมาณฝนน้อย 200 มิลลิเมตรต่อปี หรือมีฝนตกชุก 3,900 - 5,000 มิลลิเมตรต่อปี มีสภาพอากาศหนาวเย็น- 9 องศาเซลเซียส ถึงอากาศร้อนจัด 45 องศาเซลเซียส (วิฑูร และ อาทิตย์, 2536)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหญ้าแฝกมีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้

Division: Magnoliophyta

Class: Liliopsida

Subclass: Commelinids

Order: Poales

Family: Poaceae

Genus: *Chrysopogon*

Species: *C. zizanioides*

หญ้าแฝกมีอยู่ในโลกประมาณ 12 ชนิด แต่ในประเทศไทยพบเพียง 2 ชนิด คือ หญ้าแฝกหอม หรือเรียกว่าแฝกลุ่ม หรือแฝกทองขาว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria zizanioides* L. Nash. และหญ้าแฝกดอน หรือแฝกพื้นบ้าน มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vetiveria nemoralis* A. Camus (วีระชัย, 2536) แสดงดังภาพที่ 26



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 26 หญ้าแฝกหอม (ก.) และหญ้าแฝกตอน (ข.)

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2552)

### 6.2.1 แหล่งพันธุ์หญ้าแฝกหอม หรือหญ้าแฝกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* L. Nash.)

หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝกลุ่ม มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนกลางของทวีปเอเชีย สันนิษฐานว่าอยู่ในประเทศอินเดีย เป็นพืชที่มีความสามารถในการปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมที่จะขึ้นอยู่ในพื้นที่นั้นๆ ได้ดี ทำให้น้ำไปปลูกและขยายพันธุ์ได้ทั่วไป หญ้าแฝกหอม ลักษณะกอเป็นพุ่ม ใบยาวตั้งตรงขึ้นสูง สูงประมาณ 150-200 เซนติเมตร มีการแตกแขนงของลำต้น ใบยาว 45-100 เซนติเมตร กว้าง 0.6-1.2 เซนติเมตร ใบมีสีเขียวเข้ม หลังใบโค้ง ปลายใบแบน เนื้อใบค่อนข้างเนียน มีไขเคลือบมากทำให้ดูมัน ท้องใบออกสีขาวซีดกว่าด้านหลังใบ และเมื่อนำใบส่องดูกับแดดจะเห็นรอยกั้นขวางในเนื้อใบ (septum) ค่อนข้างชัดเจน โดยเฉพาะพื้นใบบริเวณส่วนโคนและกลางใบ เส้นกลางใบ ฝังอยู่ในตัวแผ่นใบ ช่อดอกสูง 150-250 เซนติเมตร ส่วนใหญ่มีสีอมม่วง ดอกย่อยส่วนใหญ่ไม่มีรยางค์แข็ง ขนาดเมล็ดโตกว่าหญ้าแฝกคอนเล็กน้อย รากมีความหอมเย็น มีน้ำมันหอมระเหยเฉลี่ย 1.4-1.6 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง โดยทั่วไปรากจะหยั่งลึกได้ประมาณ ตั้งแต่ 100-300 เซนติเมตร โดยลักษณะของหญ้าแฝกลุ่มแหล่งพันธุ์ศรีลังกา แหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และแหล่งพันธุ์สงขลา (วีระชัย, 2536) มีดังต่อไปนี้

1) หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์ศรีลังกา เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศหนาวเย็น หญ้าแฝกอายุประมาณ 6 เดือนครึ่ง จะมีความสูงเฉลี่ย 139.8 เซนติเมตร โดยใน 1 กอ มีจำนวนต้นเฉลี่ย 50 ต้น ขนาดรอบกอเฉลี่ย 67.2 เซนติเมตร รากลึกเฉลี่ย 36 เซนติเมตร ใบสีเขียวเข้ม ยาวเฉลี่ย 90 เซนติเมตร อายุการออกดอกเฉลี่ย 76 วัน ช่อดอกยาว 31-34 เซนติเมตร ดอกสีม่วงเข้ม

2) หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี หญ้าแฝกอายุประมาณ 6 เดือนจะแตกกอประมาณ 30 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 108 เซนติเมตร แตกกอหลวม หน่อกลมอวบ ยึดปล้องเร็ว ทรงพุ่มกางมาก ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบขาว ดอกสีม่วงแดง

3) หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สงขลา 3 หญ้าแฝกอายุประมาณ 6 เดือน จะแตกกอประมาณ 35 ต้นต่อกอ เส้นผ่านศูนย์กลางกอ 13 เซนติเมตร สูง 112 เซนติเมตร แตกกอหลวม หน่อกลมอวบ ยึดปล้องเร็ว ใบสีเขียวอ่อน ท้องใบสีขาว ดอกสีม่วงแดง

### 6.2.2 แหล่งพันธุ์หญ้าแฝกคอน หรือแฝกพื้นบ้าน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus)

หญ้าแฝกคอนหรือแฝกพื้นบ้านนั้นมีการกระจายพันธุ์อยู่ในวงแคบๆ ตามธรรมชาติเฉพาะในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ ประเทศไทย ลาว เขมร เวียดนาม และมาเลเซีย เท่านั้น หญ้าแฝกคอนจะพบได้ทั่วไปในที่ค่อนข้างแล้ง หรือที่ดินระบายน้ำได้ดีในทุกภาคของประเทศไทยโดยเฉพาะในป่าเต็งรัง แต่จะมีน้อยในภาคใต้ สามารถขึ้นได้ดีทั้งในที่แดดปานกลาง ยอดกอส่วนปลายจะแผ่โค้งลงคล้ายกอดตะไคร้ไม่ตั้งมากเหมือนหญ้าแฝกหอม ลักษณะกอเป็นพุ่ม ใบยาว สูง 100-150 เซนติเมตร ปกติไม่มีการแตกตะเกียง และแขนงลำต้น ใบยาว 35-80 เซนติเมตร กว้าง 0.4-0.8 เซนติเมตร สีเขียวชืด หลังใบพับเป็นสันแข็งสามเหลี่ยม ท้องใบสีเขียวกับด้านหลังใบ แต่ชัดเจนว่าแผ่นใบ เมื่อส่องกับแดดไม่เห็นรอยกั้นในเนื้อใบ เนื้อใบหยาบ สากคาย มีไขเคลือบน้อย ทำให้ดูร่วนไม่เหนียวมัน ช่อดอกสูง 100-150 เซนติเมตร มีหลายสีตั้งแต่สีขาว ครีมน้ำตาล ดอกย่อยมีรยางค์แข็ง เมล็ดมีขนาดเล็กกว่าหญ้าแฝกหอม รากไม่มีความหอม สันกว่าหญ้าแฝกคอน โดยทั่วไปจะหยั่งลึก ประมาณ 80-100 เซนติเมตร (กรมพัฒนาที่ดิน, 2536)

## 7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กนกพร (2549) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแผ่นลอนน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชนใช้การปล่อยน้ำเสียแบบต่อเนื่อง โดยทดลองกับน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นบีโอดี ทีเคเอ็น และฟอสฟอรัสทั้งหมดร้อยละ 90.12-94.88, 41.025-52.806 และ 5.892-6.657 mg/l ตามลำดับ พบว่าโดยเมื่อใช้ระยะเวลาพักเก็บ 7 วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุด โดยชุดทดลองที่ได้รับน้ำเสียความเข้มข้นสูงมีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี ทีเคเอ็น ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โทฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 90.54-91.46, 61.01-62.48, 17.78-35.87, และ 15.40-23.46ตามลำดับ

ดรรรชนี (2545) ใช้ถ้ำล่อยลิกไนต์ในการปรับปรุงดินกระจายตัว โดยเก็บดินกระจายตัว 3 ตัวอย่างจาก 3 โครงการชลประทานแล้วผสมให้ดินมีปริมาณถ้ำล่อยลิกไนต์ 0%, 5% 10%, 15% และ 20% โดยน้ำหนักของดิน จากนั้นวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี จากการทดลองพบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของถ้ำล่อยลิกไนต์มีค่าเท่ากับ 5% ถึง 10% โดยน้ำหนักของดินถ้ำล่อยลิกไนต์ จึงสามารถใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ดินได้

ทศรัตน์ (2555) ได้นำถ้ำล่อยลิกไนต์และถ้ำล่อยปาล์มน้ำมันมาเป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัส ในน้ำเสียชุมชนจากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจาก

พระราชดำริ เพชรบุรี โดยใช้ถ้ำลอยหินปูนและถ้ำลอยปล้ำมน้ำตามสภาพที่เหมาะสม สามารถบำบัดได้ร้อยละ 94.47 และ 76.64 ตามลำดับ โดยถ้ำลอยหินปูนมีประสิทธิภาพการบำบัด ฟอสฟอรัสได้ดีกว่าประมาณ 25 เท่า

สมบุญ และ ปิยะวรรณ (2546) ศึกษาประสิทธิภาพของหญ้าแฝกในการบำบัดน้ำทิ้งจากชุมชน กรมชลประทาน โดยใช้หญ้าแฝก 4 แหล่งพันธุ์ ได้แก่ แหล่งพันธุ์อินโดนีเซีย มอนโตสุราษฎร์ธานี และสงขลา 3 พบว่า หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อินโดนีเซียมีการเจริญเติบโตส่วนต้น ราก น้ำหนักมวลชีวภาพสูงสุด และมีการดูดซับธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โปแทสเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ในส่วนต้นสูง และดูดซับเหล็กในส่วนรากสูงสุด นอกจากนั้นหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์อินโดนีเซียยังสามารถช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายน้ำได้สูงสุด โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ 58.33 เปอร์เซ็นต์ มีประสิทธิภาพในการลดค่าไนโตรเจน 77.89 เปอร์เซ็นต์ และไนโตรที่ 99.97 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าแหล่งพันธุ์อื่น ส่วนหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี มีประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีได้สูงสุด 62.80 เปอร์เซ็นต์ และไนเตรต 77.55 เปอร์เซ็นต์ และหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์มอนโตมีประสิทธิภาพในการลดค่าฟอสฟอรัสทั้งหมดและโปแทสเซียมได้สูงสุด เท่ากับ 46.18 และ 71.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

มนต์ชัย (2548) ปลูกหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานี และสงขลา 3 ด้วยเทคนิคแทนลอยน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่มีค่าความเข้มข้นต่างกัน คือ ความเข้มข้นสูง (ค่าบีโอดีอยู่ระหว่าง 61.13 – 115.50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และความเข้มข้นต่ำ (ค่าบีโอดีอยู่ระหว่าง 36.00 – 51.00 มิลลิกรัมต่อลิตร) พบว่าที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำเสีย 7 วัน หญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ความเข้มข้นสูง ได้ดีกว่าหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สงขลา 3 และหญ้าแฝกแหล่งพันธุ์สุราษฎร์ธานีสามารถบำบัดน้ำเสียได้ดี คือ บีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัสทั้งหมด และออร์โธฟอสเฟต เท่ากับ 91.46, 62.48, 35.87 และ 23.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ลัทธิภม และ จินดาวัลย์ (2554) ศึกษาประสิทธิภาพของรูปถ้ำและกอกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านลำต้น โดยใช้ น้ำเสียของชุมชนบ้านเว้า คลองบ้านนา จังหวัดนครนายกในการทดลอง พบว่าบ่อทดลองที่มีการปลูกพืชรูปถ้ำและกอกกลมนั้น มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ดีกว่าบ่อควบคุมที่ไม่ได้ปลูกพืชทั้ง 2 ชนิด และพบว่าระยะเวลาที่พืชชลศาสตร์ 9 วัน มีค่าประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด กล่าวคือประสิทธิภาพการบำบัด บีโอดี ของแข็งละลาย ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าเท่ากับร้อยละ 84.88,

91.24, 67.88, 68.86 ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.12 อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในทุกหน่วยการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

สุรัสวดี (2545) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและซีโอดีในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยวิธีหมุนเวียนน้ำเสีย ชังน้ำ 5 วัน สลับแห้ง 2 วัน ในระยะทางการบำบัด 20, 40, 60, 80 และ 100 เมตร ใช้พืชหกชนิดคือ กกกลม หญ้าแฝกพันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา หญ้าคาล่า หญ้าโคสกรอส และหญ้าสตาร์ ผลการศึกษาพบว่าระยะทางการบำบัดน้ำเสียที่ 80 เมตร ร่วมกับกกกลมเหมาะสมที่สุดกับระบบหมุนเวียนน้ำเสียและสามารถบำบัดค่าบีโอดีได้ดีที่สุด

อาภรณ์ (2539) บำบัดบีโอดีและซีโอดีในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยใช้ดินในสภาพน้ำ ชังสลับแห้งร่วมกับพืชที่ระยะเวลาท่วมขัง 3, 5 และ 7 วัน สลับแห้ง 3 วัน โดยใช้พืช 2 ชนิดคือ กกกลมและธูปฤาษี ผลการศึกษาพบว่าช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดบีโอดีและซีโอดีคือระยะเวลาชังน้ำ 5 วัน สลับแห้ง 3 วัน และกกกลมเป็นพืชที่เหมาะสมที่สุด

Boyd (1970) ศึกษาเรื่อง Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted waters พบว่าธูปฤาษีเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการกำจัดสารแขวนลอยและบำบัดน้ำเสียชุมชนเพราะรากของธูปฤาษีมีความสามารถในการบำบัด บีโอดี ของแข็งละลาย ในโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด ค่าเท่ากับร้อยละ 84.88, 91.24, 67.88 และ 68.86 ตามลำดับ

Konduru and Viraraghavan (1997) ได้พบว่าจืด้าลอยมีส่วนช่วยในการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เป็นการบำบัดเบื้องต้นก่อนบำบัดด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการบำบัดจะขึ้นกับปริมาณของจืด้าลอยและระยะเวลาสัมผัส โดยค่าพีเอชไม่มีผลต่อการบำบัด

Maschinski *et al.* (1999) ใช้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลาง เพื่อบำบัดน้ำเสีย ชั้นที่ 2 จากโรงบำบัดน้ำเสียของรัฐแอริโซนาในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์มาต่ออนุกรมกัน 3 บ่อ มีขนาด 5.4 เมตร × 12.2 เมตร พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถกำจัดไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเฉลี่ยร้อยละ 84 และ 73 ตามลำดับ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในโตรเจน และเปลี่ยนแอมโมเนียไปเป็นไนเตรทแล้วซึมลงสู่ผิวดักกลาง ซึ่งผิวดักกลางของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดักกลางสามารถดูดซับธาตุอาหารต่างๆ ได้มาก จากนั้นพืชสามารถดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไปหรือเปลี่ยนไนเตรทเป็นรูปอื่น

Rani and Dahiya (2006) พบว่าเกลือจากเตาเผาอิฐ และถ่านกัมมันต์มีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนเพื่อลดค่าสีและซีโอดีได้ ในการทดลองค่าซีโอดีจากน้ำเสียชุมชนที่มีค่าเริ่มต้น 1080 มิลลิกรัมต่อลิตร เกลือจากเตาเผาอิฐ และถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดซีโอดีได้ 87.84% และ 99.35% โดยปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมของถ่านเตาเผาอิฐ และเกลือถ่านกัมมันต์คือ 60 และ 45 กรัมต่อลิตรตามลำดับ

Yang *et al.* (2007) ศึกษาประสิทธิภาพของพืชที่ใช้บำบัดน้ำเสียชุมชนในพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พบว่าจากการใช้ต้นพุทธรักษา หญ้าเนเปียร์และหญ้าแอมสามารถบำบัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถบำบัดค่า ซีโอดี บีโอดี ในโตรเจนรวม เหล็กได้โดยประมาณ 80% และบำบัดฟอสฟอรัสรวม 90% ซึ่งฤดูกาลยังมีผลต่อการบำบัดโดยหญ้าเนเปียร์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงสุดในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกันยายน ส่วนพุทธรักษาบำบัดได้ดีสุดช่วงพฤศจิกายนถึงธันวาคม

Zeynep (2006) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากมหาวิทยาลัยคิวโรวา เมืองอาดานา ประเทศตุรกี โดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมรูปแบบการไหลต่อเนื่องใน pilot-scale ใช้ต้นธูปฤาษี ต้นกก และต้นไทรสในการทดลอง พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด ของแข็งละลายทั้งหมด ซีโอดี และ บีโอดี เท่ากับ  $89.0 \pm 10.6\%$ ,  $76.7 \pm 8.3\%$  และ  $68.8 \pm 5.9\%$  ตามลำดับ รวมถึงยังมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด fecal coliform เท่ากับ  $95.4 \pm 8.3\%$  ผลที่ได้นี้สามารถบ่งบอกได้ว่าพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมนั้นมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดน้ำเสียในท้องถิ่นที่มีสภาพภูมิอากาศแห้งแล้งได้ดีอีกด้วย

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย เครื่องวัดค่าดีโอ (DO meter) เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) เครื่องวัดความขุ่น (Turbidity meter) และเครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Conductometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion block) พร้อมหลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ทำด้วยแก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate)
- 1.3 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.4 ชุดวิเคราะห์ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)
- 1.5 ตู้อบ
- 1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501
- 1.7 ตู้อบความชื้น
- 1.8 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.9 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.10 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman
- 1.11 กระบะพลาสติกกรุปสี่เหลี่ยม ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร สำหรับการทดลองหน่วยย่อยขนาดเล็ก

### 2. สารเคมี

- 2.1 โซเดียมเอไซด์ (Sodium azide;  $\text{NaN}_3$ )
- 2.2 โซเดียมไอโอไดด์ (Sodium iodide;  $\text{NaI}$ )
- 2.3 แมงกานีสซัลเฟต (Manganese sulfate;  $\text{MnSO}_4$ )
- 2.4 โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตาไฮเดรต (Sodium thiosulfate pentahydrate;  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )

## 2.5 แป้งมัน

2.6 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate;  $K_2Cr_2O_7$ )2.7 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate;  $HgSO_4$ )2.8 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Silver sulfate;  $Ag_2SO_4$ )2.9 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid;  $H_2SO_4$ )2.10 1,10-ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต (1,10-phenanthroline monohydrate;  $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$ )2.11 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต (Ferrous sulfate heptahydrate;  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ )2.12 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (Ferrous ammonium sulfate hexahydrate (FAS);  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ )2.13 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate;  $K_2SO_4$ )2.14 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate;  $CuSO_4$ )

2.15 สารละลายฟีนอล์ฟธาไลน์อินดิเคเตอร์

2.16 เมทิลเรด และเมทิลีนบลู อินดิเคเตอร์ (Methyl red และ Methylene blue indicator)

2.17 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol;  $C_2H_5OH$ )2.18 กรดบอริก (Boric acid;  $H_3BO_3$ )2.19 สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate;  $Na_2S_2O_3$ )2.20 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide;  $NaOH$ )2.21 ไดโพแทสเซียมฟอสเฟต แอนไฮดรัส (Dipotassium phosphate anhydrous;  $KH_2PO_4$ )2.22 สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate;  $(NH_4)_2MnO_4$ )2.23 สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียม ตาร์เตรต (Antimony potassium tartrate;  $K_2Sb_2(C_4H_4O_6)_2$ )2.24 กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid;  $C_6H_8O_6$ )

## 3. วัสดุปลูก

วัสดุปลูก ประกอบด้วย กรวด ทรายหยาบ ทรายละเอียด และดินนา

#### 4. ถ้ำลอยลิกไนต์

ถ้ำลอยลิกไนต์ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ เอสซีจี เปเปอร์ จังหวัดราชบุรี ซึ่งเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ 100 เปอร์เซ็นต์

#### 5. พืชที่ใช้ปลูก

ได้แก่ ต้นธูปฤๅษี (*Typha angustifolia* L.) และ หญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*)

#### 6. น้ำเสีย

น้ำเสียชุมชนจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย ของระบบบำบัดน้ำเสยรวมแบบ Activated Sludge มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์บางเขน ซึ่งน้ำเสียเกิดจากกิจกรรมของนักศึกษาและบุคลากรที่อยู่ในมหาวิทยาลัย ที่มาจากการใช้สารเคมีในชีวิตประจำวันได้แก่ น้ำเสียจากหอพัก น้ำเสียจากการประกอบอาหารของโรงอาหาร น้ำทิ้งสุขา น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกต่างๆ น้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ และน้ำทิ้งจากอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้น

## วิธีการ

### 1. การเตรียมสารละลาย

1.1 การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen; DO)

1.1.1 สารละลาย alkaline-iodide azide ( $\text{NaI} + \text{NaOH} + \text{NaN}_3$ ) โดยละลายโซเดียม-ไอโอดด์ 10 กรัมในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร และละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม ผสมกับโซเดียมไอโอไดด์ 135 กรัมในน้ำกลั่น เจือจางให้ได้ 950 มิลลิลิตร และทิ้งให้เย็น จากนั้นค่อยๆ เติมสารละลายโซเดียมไอโอดด์ ที่เตรียมไว้ลงไปผสมอย่างช้าๆ ทำให้มีฤทธิ์เป็นกรด และเจือจางจนมีปริมาตร 1 ลิตร ต้องเก็บไว้ในขวดสีชา ก่อนใช้งานควรตรวจสอบด้วยการหยดน้ำแฉียง สารละลายต้องไม่มีสี

1.1.2 สารละลายแมงกานีสซัลเฟต โดยละลาย แมงกานีส ซัลเฟต โมโนไฮเดรต 364 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางจนมีปริมาตร 1 ลิตร

1.1.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไโครซัลเฟต 0.025 นอร์มัล โดยละลายโซเดียม-ไโครซัลเฟตเพนตาไฮเดรต 6.025 กรัม ในน้ำกลั่น เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม แล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตร 1 ลิตร

1.1.4 น้ำแฉียง ละลายแฉียงมัน 2 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ต้มจนเป็นเนื้อเดียวกัน เติมกรดซาลิไซลิก 0.2 กรัม เพื่อกันบูด

1.2 การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand; COD)

1.2.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

อบโพแทสเซียมไดโครเมต ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งอย่างละเอียด 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติม

กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร เติมเมอร์คิวริกซัลเฟต 33.3 กรัม คนให้ละลายตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร

#### 1.2.2 กรดซัลฟิวริกรีเอเจนต์

ซังซัลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆจนซัลเวอร์ซัลเฟตละลายหมด

#### 1.2.3 สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

ละลาย 1,10-ฟีแนนโทรีนโมโนไฮเดรต 1.485 กรัม และไอร์ออน (II) ซัลเฟต-เฮปต้าไฮเดรต 0.695 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร

#### 1.2.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล

ซังเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต 39.2 กรัม เติมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งให้เย็นแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 1 ลิตร สารละลายนี้ต้องเปรียบเทียบกับมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้งที่น่าไปใช้

1.3 การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen; TKN)

1.3.1 น้ำย่อยสลาย (digestion mixture) เตรียมโดยละลายโพแทสเซียมซัลเฟต 134 กรัม และ คอปเปอร์ซัลเฟต 7.3 กรัม ในน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 134 กรัม ทำให้เย็น เติมน้ำกลั่นจนครบ 1 ลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการตกผลึก

1.3.2 Mixed Indicator Solution เตรียมเมทิลเรด 0.2% (โดยละลาย เมทิลเรด 100 มิลลิกรัมในเอทิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร) และเตรียม เมทิลีนบลู 0.2% (โดยละลาย เมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมในเอทิลแอลกอฮอล์ 25 มิลลิลิตร) เทสารละลายทั้งสองชนิดผสมกันเก็บในขวดแก้ว

1.3.3 Indicator Boric Acid Solution เตรียมโดยละลายกรดบอริก 20 กรัมในน้ำกลั่น เติม Mixed Indicator Solution 10 มิลลิลิตร (จากข้อ 1.3.2) แล้วเจือจางเป็น 1 ลิตรเก็บในขวดแก้ว

1.3.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไทโอซัลเฟต เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และโซเดียมไทโอซัลเฟต 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 1 ลิตร

#### 1.4 การเตรียมสารละลายสำหรับวิเคราะห์ปริมาณออร์โธฟอสเฟต (orthophosphate)

##### 1.4.1 Stock Phosphate Standard (1.00 ml = 0.1 mg as $\text{PO}_4^{3-}$ -P, 100.0 ppm)

ละลายไดโพแทสเซียมฟอสเฟต แอนไฮดรัส 0.1098 กรัม ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง ในน้ำกลั่นแล้วเจือจางเป็น 250 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร เก็บสารละลายในขวดแก้วและเตรียมใหม่ก่อนใช้ทุกครั้ง

1.4.2 Working standard phosphate solution (1.00 ml = 0.01 mg as  $\text{PO}_4^{3-}$ -P, 10.0 ppm) ปิเปตสารละลายในข้อ 1.4.1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตรแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น

##### 1.4.3 Reagent A

1) เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มัล โดยการละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 138.9 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น เจือจางเป็น 1 ลิตร

2) เตรียมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต โดยละลาย แอมโมเนียมโมลิบเดต 12 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 250 มิลลิลิตร

3) เตรียมสารละลายแอนติโมนี โพแทสเซียม คาร์เตรต โดยละลายแอนติโมนี-โพแทสเซียม คาร์เตรต 0.298 กรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร

4) นำสารละลายในข้อ 1) ถึง 3) ผสมกันและปรับปริมาตรเป็น 2 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

1.4.4 Reagent B เตรียมโดยละลาย กรดแอสคอร์บิก 1.056 กรัม ด้วย reagent A 200 มิลลิลิตร

## 2. การเตรียมกราฟมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต

2.1 ปิเปต Working standard phosphate solution ปริมาตร 0.5, 1.5, 2.5, 5, 7.5 และ 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แต่ละขวด เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด ปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตเข้มข้น 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 ppm ตามลำดับ

2.2 ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 2.1 แต่ละความเข้มข้น 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับ ปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แต่ละขวดเติม Reagent B 8 มิลลิลิตร เขย่าและเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึง ขีดบอกริมาตร ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที เกิดสารสีน้ำเงิน

2.3 นำสารละลายมาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร เทียบกับสารละลาย แบลงค์ ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2.4 พล็อตกราฟมาตรฐานหาความสัมพันธ์โดยให้ค่าดูดกลืนแสงเป็นแกนตั้ง และความ เข้มข้นของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตเป็นแกนนอน

## 3. การเตรียมกราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์

3.1 ปิเปตสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 และ 20.0 มิลลิกรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แต่ละขวด แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ความ เข้มข้น 10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0 และ 100.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3.2 นำสารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์จากข้อ 3.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความ ยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วเขียนกราฟมาตรฐาน ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ (แกนนอน)

#### 4. การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเสียชุมชน

พารามิเตอร์ในน้ำเสียที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ สีของน้ำ (Color) ความขุ่น (Turbidity) การนำไฟฟ้า (Conductivity) ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) พีเอช (pH) ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) บีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) และ ออร์โธโรฟอสเฟต ตามวิธีที่กำหนดไว้ใน Standard Method for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WEF, 1995)

#### 5. การเตรียมตัวดูดซับ

นำถ้ำลอยลิกไนต์ มาล้างด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดคราบไขมันและความเค็ม วัดค่าพีเอชของน้ำล้างถ้ำลอยให้ได้ประมาณ 7-8 หลังจากนั้นนำถ้ำลอยลิกไนต์ที่ล้างแล้วไปตากแดดให้แห้ง แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น ทิ้งถ้ำลอยให้เย็นในตู้ดูดความชื้นเพื่อเก็บไว้ใช้ในการวิจัยต่อไป

#### 6. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของถ้ำลอยลิกไนต์โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์ (batch method)

##### 6.1 ศึกษาปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

ชั่งถ้ำลอยลิกไนต์ปริมาณตั้งแต่ 1 ถึง 15 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แต่ละใบ เติมน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ 60 นาที หลังจากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเมมเบรนของ Whatman ขนาด 0.45 ไมครอน นำไปวัดสีของน้ำ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เทียบกับกราฟมาตรฐานแพลทินัมโคบอลต์ที่เตรียมขึ้น และวิเคราะห์หาซีโอดีด้วยวิธี Closed-Reflux คำนวณประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี

## 6.2 ศึกษาระยะเวลาการบำบัด

ศึกษาระยะเวลาการบำบัดเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์บำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตรต่อปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในข้อที่ 6.1 การทดลองแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง (1,2,3,4,5 และ 6 ชั่วโมง) และระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน (1,2,3,4,5,6 และ 7 วัน) ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 6.1

## 6.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนข้อ 6.1 แต่ใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาข้อ 6.2 แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์ม และสมการการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

## 6.4 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม

ในการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร แปรผันตามอัตราส่วนถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นอัตราส่วน 1:10,1:20,1:30,1:40 และ 1:50 ทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 6.1

## 7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนของชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (continuous flow)

### 7.1 การบรรจุชั้นวัสดุการปลูก

ทำการบรรจุชั้นวัสดุการปลูก คือ กรวด ทราบหยาบ ทราบละเอียด และดินผสมถ้ำลอยลิกไนต์ลงในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร และสูง 40 เซนติเมตร ใช้อัตราส่วนของชั้นวัสดุปลูกแต่ละชั้นจำลองจากระบบบำบัดแบบธรรมชาติ คือ บรรจุชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทราบหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2.8 เซนติเมตร และถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน 16.5 เซนติเมตร โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ในข้อ 6.4

## 7.2 การจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติในคอลัมน์แก้ว

ทำการบำบัดน้ำเสียโดยแข่งขันน้ำเสียระยะเวลาเป็นวันและชั่วโมงตามที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบแบตช์ และปล่อยผ่าน เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสและสถานะในการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุด โดยการปล่อยน้ำเสียแบบปล่อยผ่าน คือทดลองปล่อยน้ำเสีย 2,000 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่องเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 30 นาที ส่วนการบำบัดน้ำเสียแบบขังเป็นชั่วโมง และขังเป็นวันทำการทดลองโดยแข่งขันน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ปล่อยขังทิ้งไว้ตามระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง (4 ชั่วโมง) และระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน (4 วันปล่อยแห้ง 2 วัน) ตามผลจากการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ในข้อที่ 6.2 นำมาหาประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี โดยทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือมีค่าซีโอดีเกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2539)

## 7.3 ชุดควบคุม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1 ถึง 7.2 แต่ในการบรรจุชั้นวัสดุปลูกในคอลัมน์แก้วชั้นบนสุดจะใช้ดินเพียงอย่างเดียวไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ เพื่อเป็นชุดควบคุมผลการทดลองของวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

## 8. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

### 8.1 การบรรจุชั้นวัสดุปลูก

การทดลองด้วยระบบบำบัดแบบธรรมชาติ (พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม) ทำการทดลองจำลองในกระเพาะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยม ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร บรรจุชั้นวัสดุปลูกที่ทำหน้าที่เป็นชั้นกรองมลสาร คือ กรวด 7 เซนติเมตร ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นบนสุดเป็นเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์ในข้อ 6.4 คือ 1:20 สูง 30 เซนติเมตร

## 8.2 การจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติในกระเบะพลาสติก

ปลูกธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) และหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) ชนิดละ กระเบะ ทิ้งระยะเวลาให้พืชเจริญเติบโตแข็งแรงรากยึดดินแผ่ขยายกว้าง แล้วจึงเติมน้ำเสีย 200 ลิตร ลงไปบำบัดโดยใช้ระยะเวลาบำบัดที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากวิธีแบบไหลต่อเนื่อง คือแช่ขังเป็น ระยะเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากกระเบะนำมาหาประสิทธิภาพในการ บำบัด สีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ใน โตรเจนทั้งหมด และ ออร์โธฟอสเฟต ทำการทดลองจน ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือมีสภาวะคงที่

## 8.3 ชุดควบคุม

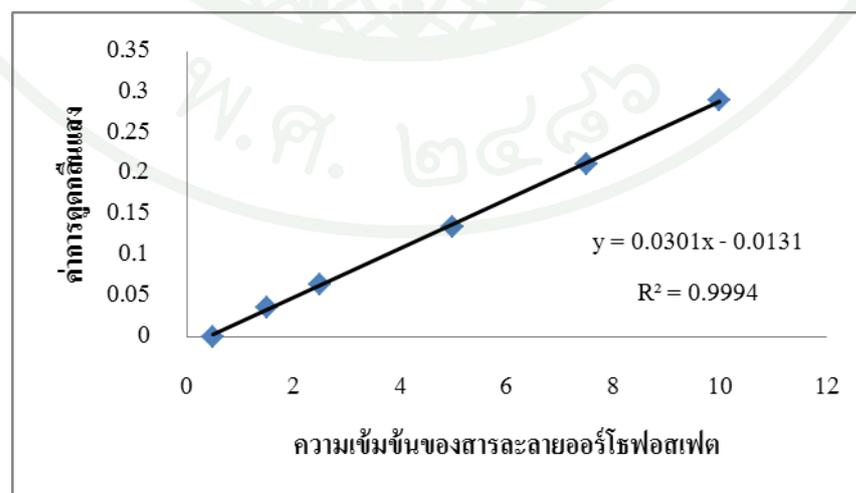
ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 8.1 โดยปลูกหญ้าแฝกแต่วัสดุปลูกที่เป็นชั้นดินบนสุด จะไม่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์เพื่อใช้เป็นชุดควบคุมผลการทดลอง

## ผลและวิจารณ์

การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ได้อธิบายผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาปริมาณของตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ระยะเวลาสัมผัสในการบำบัด อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้ไปใช้ในการทดลองในลำดับถัดไป ในส่วนที่สองเป็นการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องโดยใช้ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกลงในคอลัมน์แก้ว และส่วนที่สามเป็นการทดลองการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติเพื่อประยุกต์ใช้งานจริง โดยนำถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูก และปลูกพืชคือ กล้วยและหญ้าแฝก ผลการทดลองที่ได้ อธิบายดังนี้

### 1. กราฟมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )

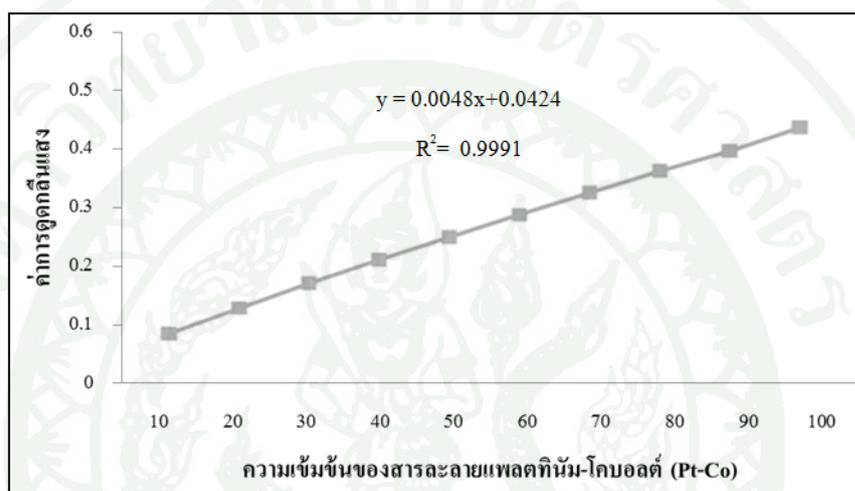
กราฟมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตที่เตรียมได้จากการทดลองในข้อ 2 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 27 มีสมการถดถอยเชิงเส้นคือ  $y = 0.0301x - 0.0131$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9994



ภาพที่ 27 กราฟมาตรฐานออร์โธฟอสเฟต

## 2. กราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ที่เตรียมได้จากการทดลองในข้อ 3 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง ดังภาพที่ 28 มีสมการถดถอยเชิงเส้นคือ  $y = 0.0048x + 0.0424$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9991



ภาพที่ 28 กราฟมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์

## 3. ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียเบื้องต้นของน้ำเสียชุมชนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

น้ำเสียชุมชนในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เกิดจากกิจกรรมของนักศึกษาและบุคลากรที่อยู่ในมหาวิทยาลัย องค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในน้ำเสียชุมชนส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่มาจากการใช้สารเคมีในชีวิตประจำวัน ได้แก่ น้ำเสียจากห้องพัก น้ำเสียจากการประกอบอาหารของโรงอาหาร น้ำทิ้งสุขา น้ำชำระล้างสิ่งสกปรกต่างๆ น้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ และน้ำทิ้งจากอาคารประเภทต่างๆ เป็นต้น ซึ่งจะถูกรวบรวมไปตามท่อระบายน้ำ ไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของมหาวิทยาลัย ผ่านบ่อดักขยะเพื่อคัดเศษขยะที่ปะปนมากับน้ำเสีย แล้วจึงไหลเข้าบ่อสูบลift ซึ่งเป็นบ่อสำหรับเก็บรวบรวมและพักน้ำเสียเพื่อเตรียมทำการสูบน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดแบบ Activated Sludge

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียชุมชนในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ก่อนบำบัด เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของประกาศกระทรวง

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) พบว่าค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐาน แสดงตามตารางที่ 9 ดังนี้

**ตารางที่ 9** ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ-เคมี ของน้ำเสียชุมชนจากบ่อบรรวมของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้ (± S.D.)	ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้ง จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
พีเอช	7.1 ± 0.12	5.5-9.0
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	2.85 ± 0.05	-
ของแข็งละลายทั้งหมด (mg/L)	936 ± 2.08	*ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (%)	0.4 ± 0.06	-
ความขุ่น (NTU)	41 ± 0.58	-
สี (Pt-Co Unit)	36.000 ± 0.01	ไม่พึงเป็นที่รังเกียจ
ซีโอดี (mg/L)	352 ± 1.15	*ไม่เกิน 120
บีโอดี (mg/L)	128 ± 3.51	ไม่เกิน 20
อุณหภูมิ (C°)	28.0 ± 0.01	*ไม่เกิน 40
ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	42.56 ± 0.56	ไม่เกิน 20
ออร์โธฟอสเฟต (mg/L)	13.57 ± 0.45	ฟอสฟอรัสทั้งหมด ≤ 2

หมายเหตุ เปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

#### 4. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

ถ้ำลอยลิกไนต์เป็นถ้ำลอยที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ในขั้นตอนการผลิต โดยถ้ำที่ได้จากการเผาถ่านหินในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจะถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดสู่ปล่องควันและถูกจับไว้ที่เครื่องตกตะกอนโดยใช้ไฟฟ้า (electrostatic precipitator) แล้วถูกรวบรวมไว้ที่เก็บขี้ถ้ำ กลายเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตที่ต้องนำไปกำจัด แต่เนื่องด้วยคุณสมบัติทรงกลมขนาดเล็กของถ้ำลอยลิกไนต์มีอนุภาครูพรุนและพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงจึง

สามารถช่วยในการดูดซับมลสารในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้ถ้ำลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษ บริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) โดยใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถ้ำลอยลิกไนต์ที่ผ่านกระบวนการล้างกำจัดสิ่งปนเปื้อนและอบไล่ความชื้นที่เตรียมได้สำหรับเป็นตัวดูดซับมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 29

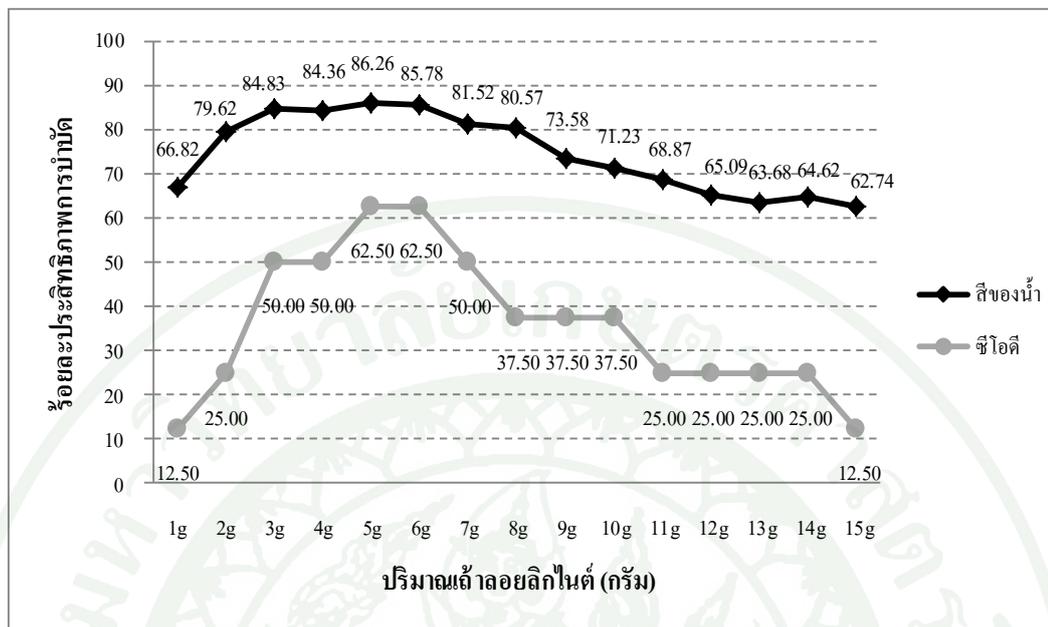


ภาพที่ 29 ตัวดูดซับถ้ำลอยลิกไนต์

## 5. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของถ้ำลอยลิกไนต์โดยวิธีการทดลองแบบแบตช์

### 5.1 ผลการศึกษาปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

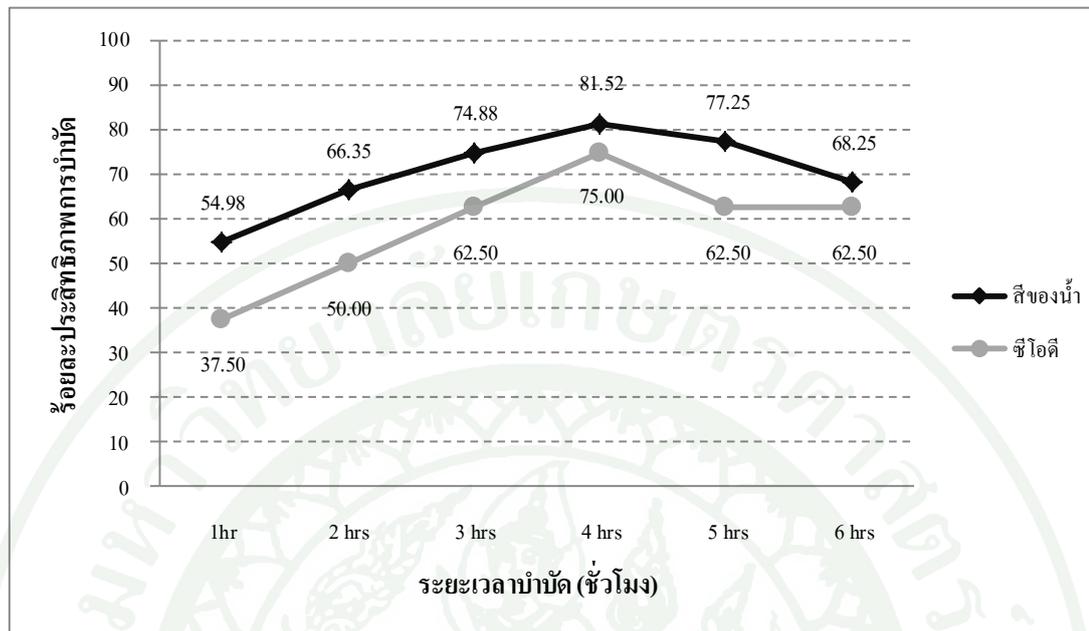
การศึกษ ปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมจากการแปรผันปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ตั้งแต่ 1 จนถึง 15 กรัม ต่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่าการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตามปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์ที่เพิ่มขึ้น และเริ่มมีแนวโน้มคงที่จนลดต่ำลง อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณถ้ำลอยลิกไนต์เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับมลสารต่างๆในน้ำเสีย แต่ปริมาณมลสารในน้ำเสียที่ถ้ำลอยลิกไนต์ดูดซับในแต่ละการทดลองมีปริมาณคงที่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเรื่อยๆจึงไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นและอาจเกิดการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ร้อยละการดูดซับมีแนวโน้มลดลง (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) ซึ่งจากการทดลองถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัมให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงที่สุด คือร้อยละ 86.26 และ 62.50 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30



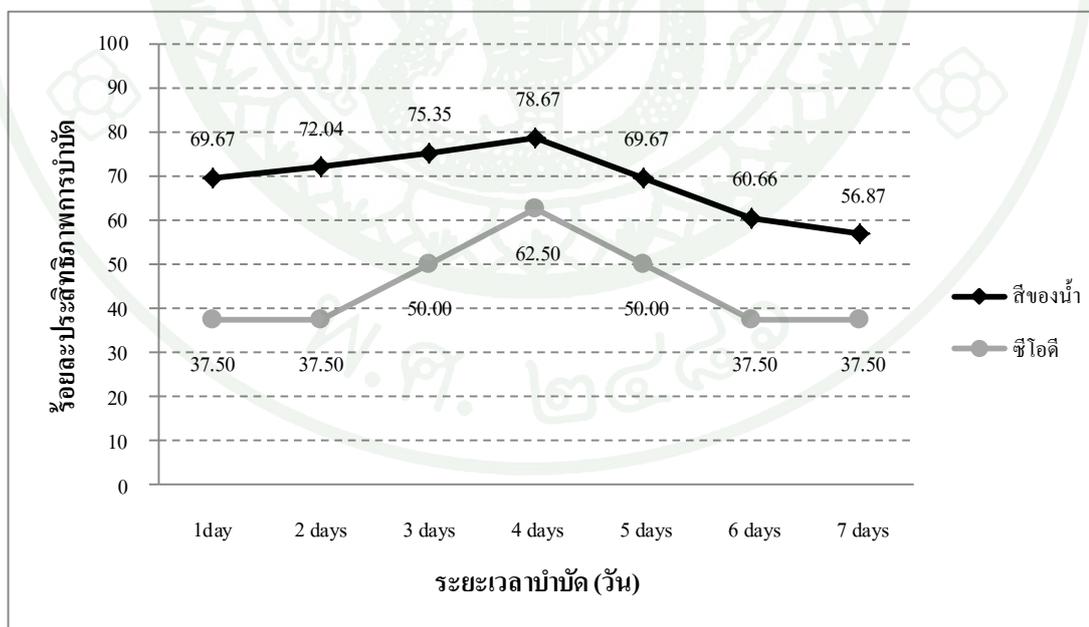
ภาพที่ 30 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับปริมาณแฉ่ำลอยลิกไนต์

## 5.2 ผลการศึกษาระยะเวลาการบำบัด

จากการศึกษาระยะเวลาสัมผัสในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่เหมาะสมของแฉ่ำลอยลิกไนต์ พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัสแบบชั่วโมง ในชั่วโมงที่ 1 ถึง 4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยชั่วโมงที่ 4 มีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงที่สุดคือ ร้อยละ 81.52 และ 75.00 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะมีสภาวะคงที่ ส่วนระยะเวลาการสัมผัส 1-7 วัน พบว่าในวันที่ 4 ให้ร้อยละการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงที่สุดคือ 78.67 และ 62.50 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แสดงดังภาพที่ 31 และ ภาพที่ 32 เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสมากขึ้น ทำให้มลสารมีโอกาสสัมผัสหรือถูกดูดซับด้วยแฉ่ำลอยลิกไนต์ได้มากขึ้น แต่พื้นที่ของตัวดูดซับหรือแฉ่ำลอยลิกไนต์มีปริมาณจำกัด เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับหรือมลสารจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับคงที่ และอาจมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการคายซับ แล้วก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของตัวมลสารเลย



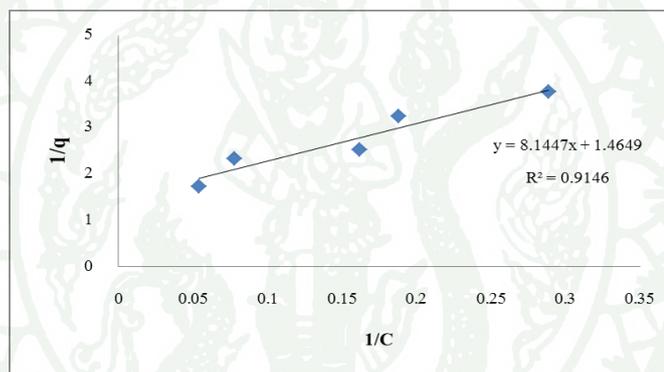
ภาพที่ 31 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง



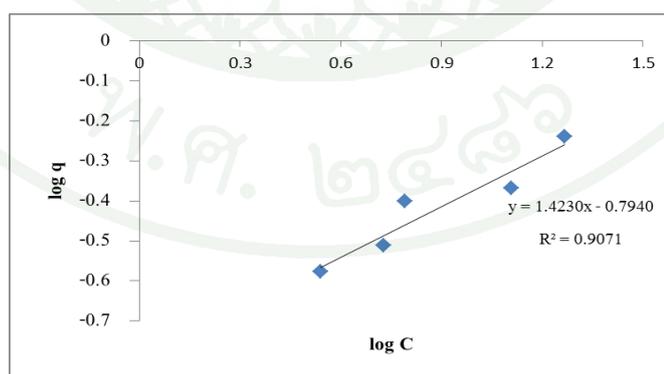
ภาพที่ 32 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีกับระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน

### 5.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับตามวิธีการทดลองดังข้อ 7.3 โดยแปรผันปริมาณแก๊สออกซิเจนไนต์ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมง ต่อสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีค่าความเข้มข้นสีของน้ำเริ่มต้น ( $C_0$ ) เท่ากับ 30 Pt-Co Unit แล้วนำค่าความเข้มข้นสีเริ่มต้นของน้ำเสียไปคำนวณหาค่า  $C$  (ความเข้มข้นของสีที่ผ่านการดูดซับแล้วจากตัวดูดซับ),  $q$  (ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ),  $1/q$ ,  $1/C$ ,  $\log q$  และ  $\log C$  เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และฟรุนดิช (Freundlich Isotherm) แสดงดังในภาพที่ 33 ดังนี้



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 33 ไอโซเทอร์มการดูดซับด้วยแก๊สออกซิเจนไนต์ของแลงเมียร์ (ก.) และฟรุนดิช (ข.)

จากภาพที่ 33 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) ของไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.9146 และไอโซเทอร์มของฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.9071 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากลไกการดูดซับสอดคล้องกับทั้งสมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยจากภาพที่ 33 (ก.) กลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (homogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับที่เหมือนกัน ซึ่งการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มี การเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้นจนอิ่มตัว (Johnson, 1989) ส่วนภาพที่ 33 (ข.) กลไกการดูดซับของฟรุนดลิช คือการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Buckley, 1992) และตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวหลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเกิดการซ้อนทับกันได้ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) แต่จากสมการไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช เส้นกราฟตัดแกน y ที่จุด  $\log q$  มีค่าติดลบ (-) ทำให้เส้นกราฟตัดแกน x ที่จุด  $\log C$  มีค่ามากกว่าศูนย์ นั่นหมายถึง C ซึ่งเป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายมีค่าน้อยนั่นเอง ประกอบกับ ณ จุดนี้  $\log q$  มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง q ซึ่งคือปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับมีค่ามาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า C ที่มีค่าน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นได้มาก ประกอบกับการทดลองมีการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่ปริมาณตัวถูกดูดซับคงที่ จึงส่งผลให้ C มีค่าน้อย และ q มีค่ามากขึ้นเอง

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

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

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

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

$$\frac{1}{q} = 8.1447 \left( \frac{1}{C} \right) + 1.4649$$

เขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  และ  $1/C$  จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ 8.1447 และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ 1.4849

$$\frac{1}{K q_m} = 8.1447$$

$$\frac{1}{q_m} = 1.4649$$

$$\text{จึงได้ } K = 0.1800$$

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

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

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

$$\log q = -0.7940 + 1.4230 \log C$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.4230 และมีจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ -0.7940 นั่นคือ

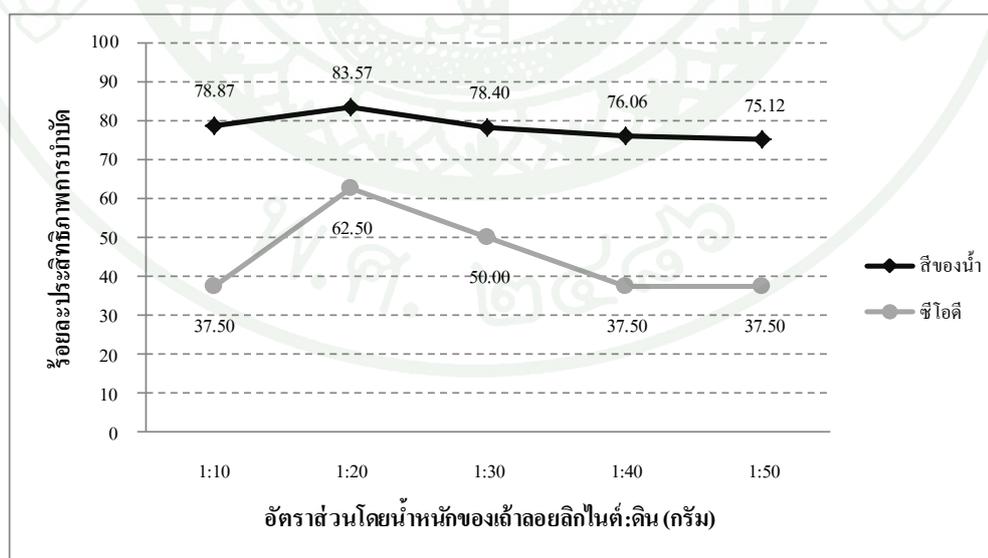
$$\log K = -0.7940 \quad \text{และ} \quad 1/n = 1.4230$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } n = 0.7030$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรูนดิช (Freundlich Constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ ดังนั้นไอโซเทอร์มการดูดซับพบว่า ค่า  $1/n$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์ได้มากหรือกล่าวได้ว่าปริมาณพื้นที่ผิวของเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณมากในการดูดซับแบบวิวิธพันธ์ และประกอบด้วยเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุน การดูดซับจึงเกิดในรูพรุนได้ด้วย (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

#### 5.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม

ในการศึกษาอัตราส่วน โดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสม โดยใช้น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร แปรผันอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่อัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40 และ 1:50 เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ตามระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองข้อที่ 5.2 คือที่ 4 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยลิกไนต์ต่อดินที่อัตราส่วน 1:20 มีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดีสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 83.57 และ 62.50 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 34 ซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละการบำบัดสูงกว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เพียงอย่างเดียว แสดงว่าดินมีส่วนช่วยในการบำบัดด้วย

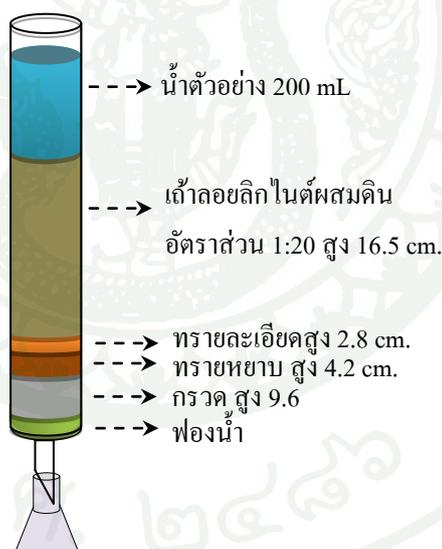


ภาพที่ 34 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดี ของเถ้าลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนต่างๆ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่อัตราส่วน 1:20 เพื่อความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชในชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องและการทดลองแบบจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

#### 6. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

การทดลองแบบการไหลต่อเนื่องเป็นการจำลองการบำบัดน้ำเสียในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยในการทดลองจะใช้คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร บรรจุชั้นกรวด 9.6 เซนติเมตร ทรายหยาบ 4.2 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2.8 เซนติเมตร และชั้นบนสุดเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดิน 16.50 เซนติเมตร ที่อัตราส่วน 1:20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์ แสดงดังภาพที่ 35

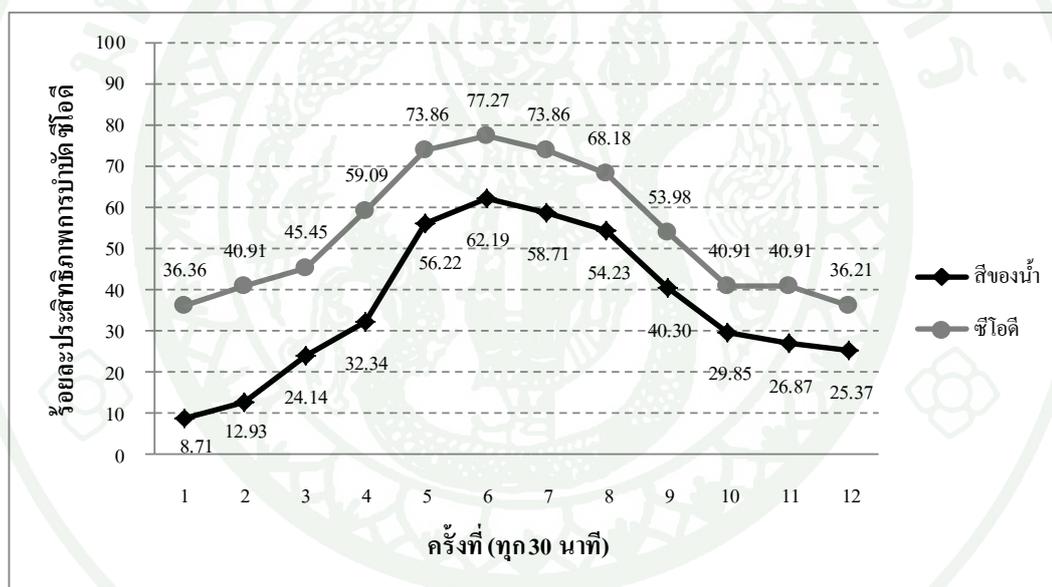


ภาพที่ 35 คอลัมน์บรรจุวัสดุเพาะปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียของชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องที่ได้เป็นไปตามข้อ 6.1 ถึง 6.3 ดังนี้

6.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของชั้นวัสดุปลูกที่มีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง แบบการปล่อยผ่าน

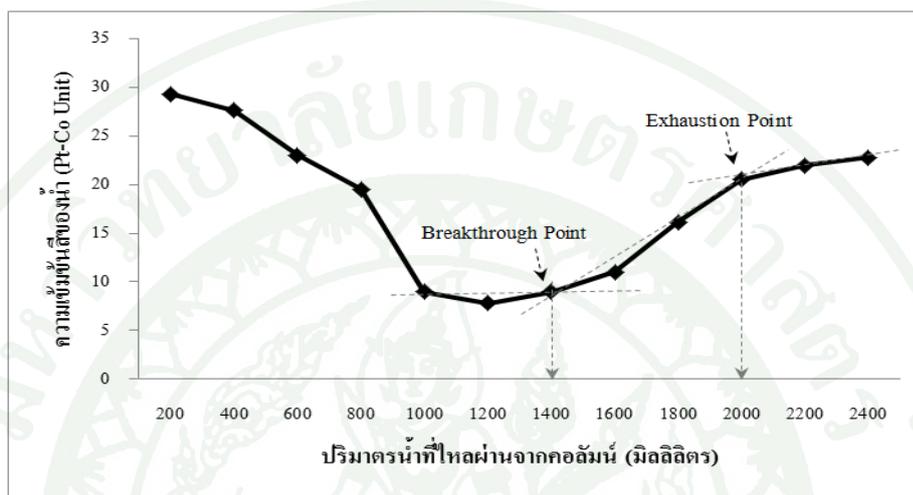
จากวิธีการทดลองในข้อ 7.2 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่องโดยการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ เมื่อทำการปล่อยน้ำเสียแบบปล่อยผ่าน คือทดลองปล่อยน้ำเสีย 2,400 มิลลิลิตร อย่างต่อเนื่อง เก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 30 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และสามารถบำบัดสีและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 62.19 และ 77.27 ตามลำดับจากการปล่อยผ่านในครั้งที่ 6 หรือในนาทีที่ 180 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของเถ้าลอยลิกไนต์เริ่มลดลงเรื่อยๆ แสดงดังภาพที่ 36



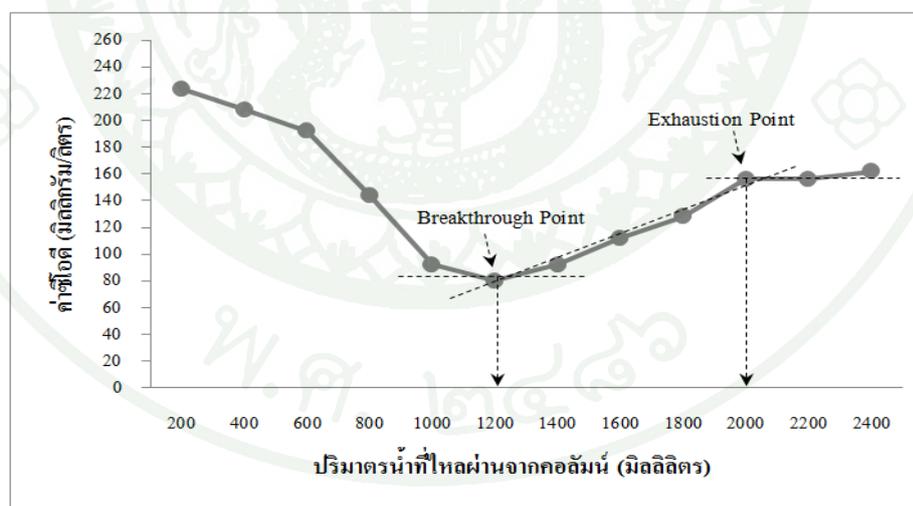
ภาพที่ 36 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์แบบปล่อยผ่านทุก 30 นาที

จากการทดลองเมื่อคำนวณปริมาณความเข้มข้นสีของน้ำ และซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังปล่อยออกจากคอลัมน์ทุกๆ 200 มิลลิลิตร ในการทดลองแบบการปล่อยผ่าน และสร้างกราฟเบรคทูล์ พบว่าเนื่องจากค่าสีของน้ำ และซีโอดีในน้ำเสียเริ่มต้นมีค่าต่ำ จึงทำให้ในช่วงแรกสามารถบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีได้สูง กราฟจึงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจากนั้นจึงเป็นไปตามทฤษฎีของกราฟเบรคทูล์ โดยจุดเบรคทูล์สีของน้ำ และซีโอดีอยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 1,400 มิลลิลิตร และ 1,200 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีความเข้มข้นสีของน้ำ และซีโอดีที่เหลือ

เท่ากับ 8.458 Pt-Co Unit และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนจุดหมดสภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอคืออยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 2,000 มิลลิตร มีความเข้มข้นสีของน้ำ และซีไอที่เหลือเท่ากับ 20.542 Pt-Co Unit และ 156 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 37



(ก.)

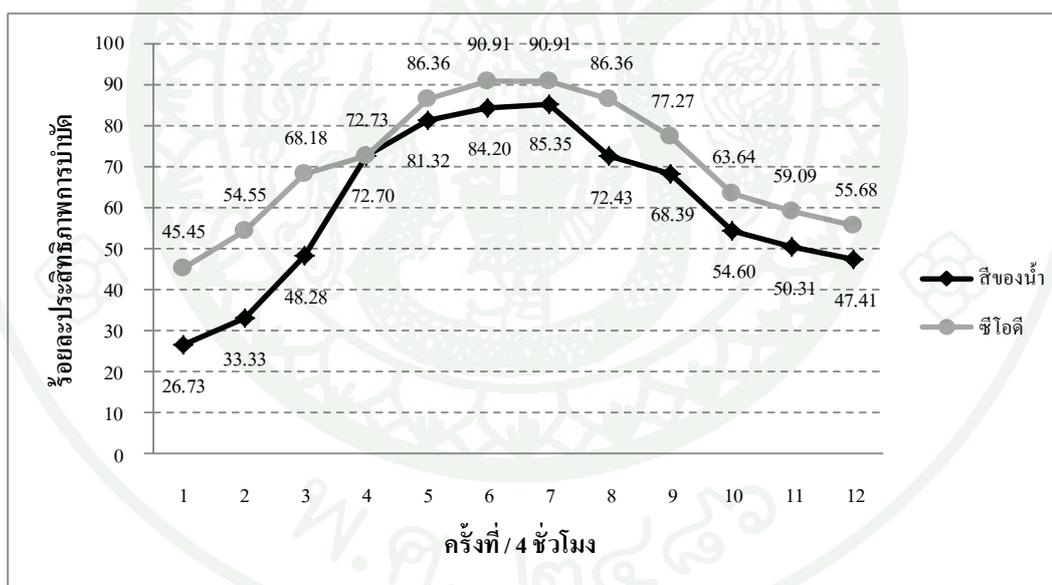


(ข.)

ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีไอ (ข.) ที่เหลือกับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แบบปล่อยผ่าน

## 6.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสเป็นชั่วโมง

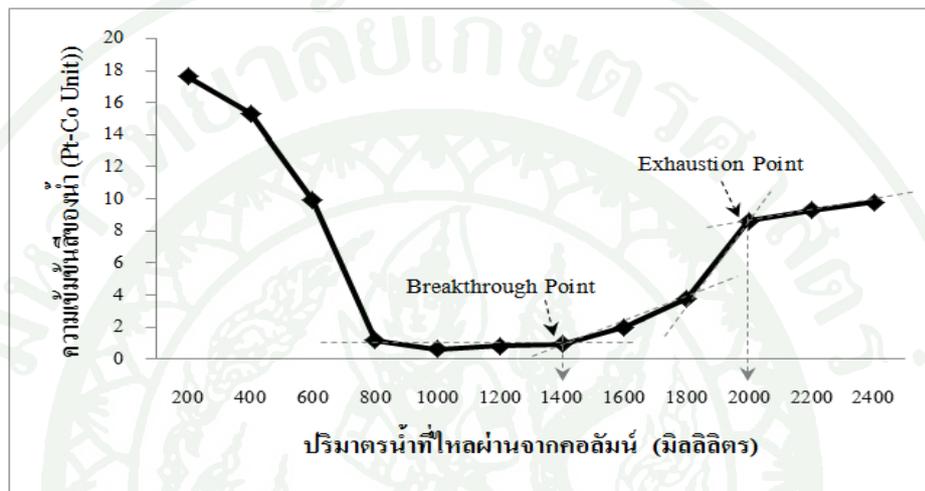
จากวิธีการทดลองในข้อ 7.2 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่องโดยการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ ที่ระยะเวลาสัมผัสแบบเป็นชั่วโมง คือทำการปล่อยน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร แข่งขันทิ้งไว้เป็นระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง (จากผลการทดลองแบบแบตช์) แล้วเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ พบว่าการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์ใน 4 ชั่วโมงแรกจนถึงชั่วโมงที่ 28 มีแนวโน้มประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีเพิ่มขึ้นเพราะพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับมลสารต่างๆยังมีมาก โดยการบำบัดครั้งที่ 7 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดี สูงสุดร้อยละ 85.35 และ 90.91 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์เริ่มลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 38 และให้ผลการบำบัดที่ดีกว่าแบบปล่อยผ่าน



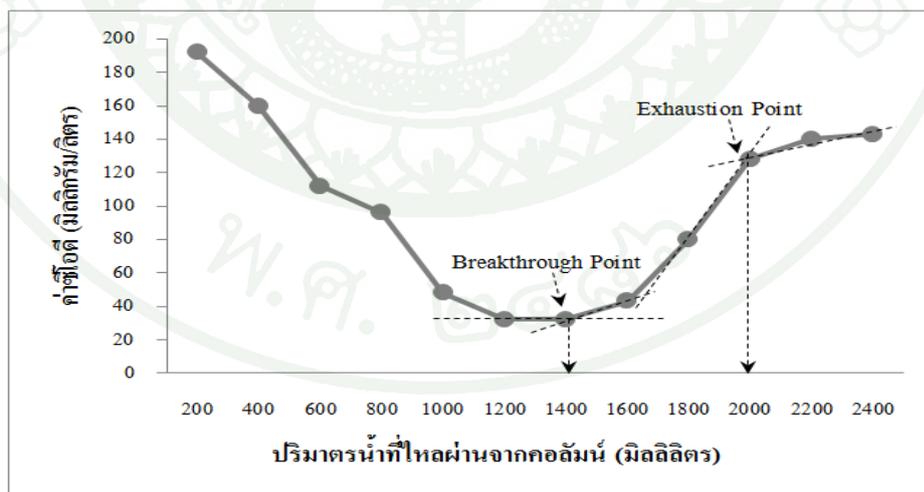
ภาพที่ 38 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง

เมื่อกำหนดปริมาณความเข้มข้นสีของน้ำ และซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังการแข่งขันเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 200 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ์ พบว่าในช่วงแรกกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังที่อธิบายไปในข้อ 6.1 โดยจุดเบรคทรูจ์สีของน้ำ และซีโอดีอยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 1,400 มิลลิลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสีของ

น้ำ และซีโอดีที่เหลือเท่ากับ 0.750 Pt-Co Unit และ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนจุดหมดสภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอดีอยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 2,000 มิลลิตร มีความเข้มข้นสีของน้ำ และซีโอดีที่เหลือเท่ากับ 8.125 Pt-Co Unit และ 128 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 39



(ก.)

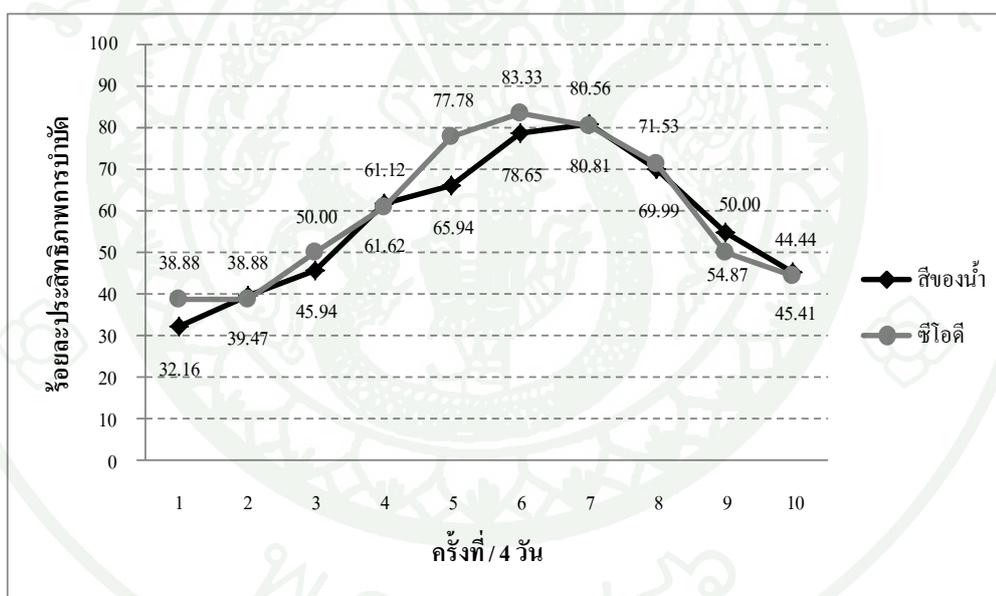


(ข.)

ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีโอดี (ข.) ที่เหลือกับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง

### 6.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของชั้นวัสดุปลูกที่มีถ้ำลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องที่ระยะเวลาสัมผัสเป็นวัน

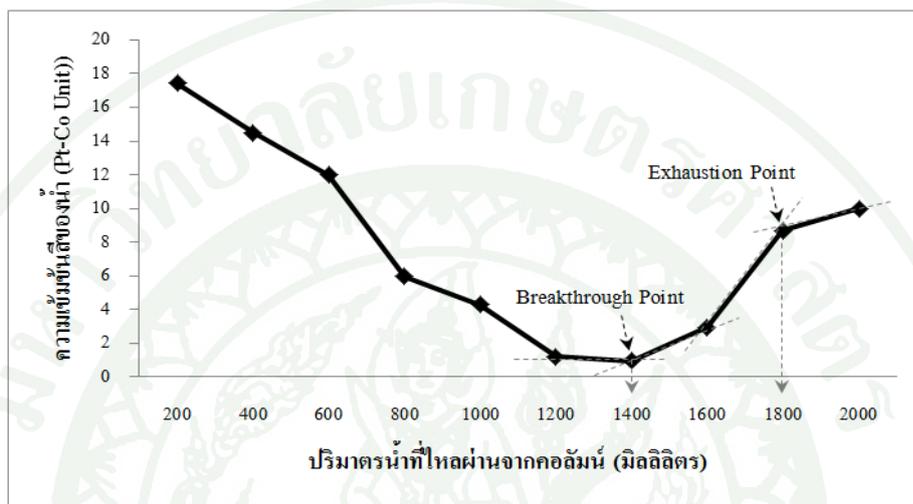
จากวิธีการทดลอง 7.2 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ ที่ระยะเวลาสัมผัสแบบเป็นวัน คือทำการบำบัดน้ำเสียโดยปล่อยน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร แข่งทั้งไว้เป็นระยะเวลาสัมผัส 4 วัน และปล่อยให้แห้ง 2 วัน เพื่อให้ออกซิเจนจากอากาศแทรกซึมลงสู่ดินและเป็นการให้จุลินทรีย์ผู้ย่อยสลายพักตัวปรับสภาพเตรียมพร้อมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่อไป แล้วจึงเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ ผลพบว่าในวันที่ 28 (สัปดาห์ที่ 7) สามารถบำบัดสีของน้ำและซีไอดีได้สูงสุดที่ร้อยละ 80.81 และ 83.33 ตามลำดับ และประสิทธิภาพเริ่มลดลงเรื่อยๆในสัปดาห์ถัดไป แสดงดังภาพที่ 40



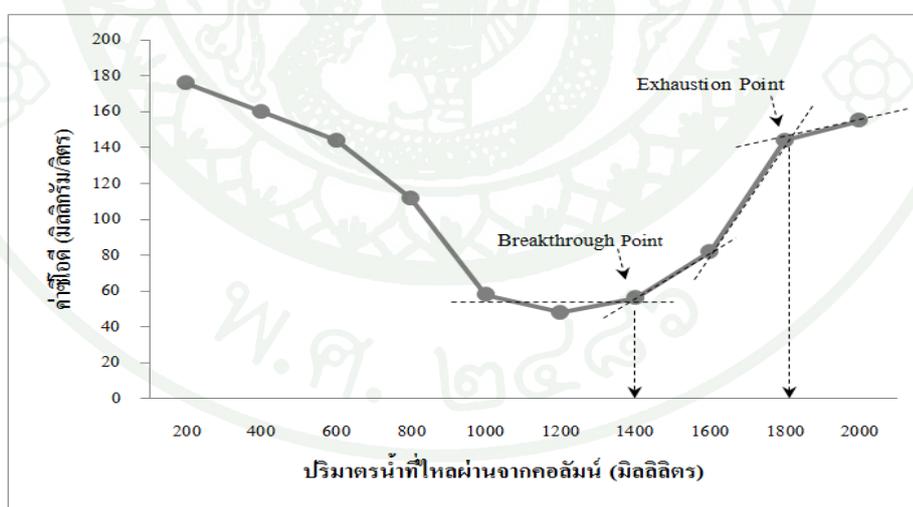
ภาพที่ 40 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำและซีไอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน

เมื่อคำนวณปริมาณความเข้มข้นสีของน้ำ และซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังการแข่งเป็นระยะเวลา 4 วัน แล้วเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ทุกๆ 200 มิลลิลิตร และสร้างกราฟเบรคทรูจ พบว่าในช่วงแรกกราฟมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังที่อธิบายไปในข้อ 6.1 โดยจุดเบรคทรูจสีของน้ำ และซีไอดีอยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 1,400 มิลลิลิตร ซึ่งมีความเข้มข้นสีของน้ำ และซีไอดีที่เหลือเท่ากับ 0.958 Pt-Co Unit และ 56 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนจุดหมด

สภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอคืออยู่ที่ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ 1,800 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นสีของน้ำ และซีไอที่เหลือเท่ากับ 11.167 Pt-Co Unit และ 144 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 41



(ก.)

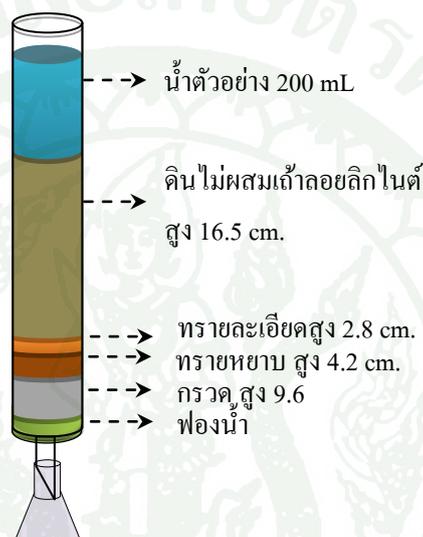


(ข.)

ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสีของน้ำ (ก.) และซีไอดี (ข.) ที่เหลือกับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน

#### 6.4 ชุดควบคุม

จากวิธีการทดลองที่ 7.3 การทดลองในชุดควบคุมแบบการไหลต่อเนื่อง การบรรจุชั้นวัสดุ การปลูกจะเหมือนกับชุดตัวอย่าง แต่ส่วนของชั้นดินบนสุดจะไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ แสดงดังภาพที่ 42

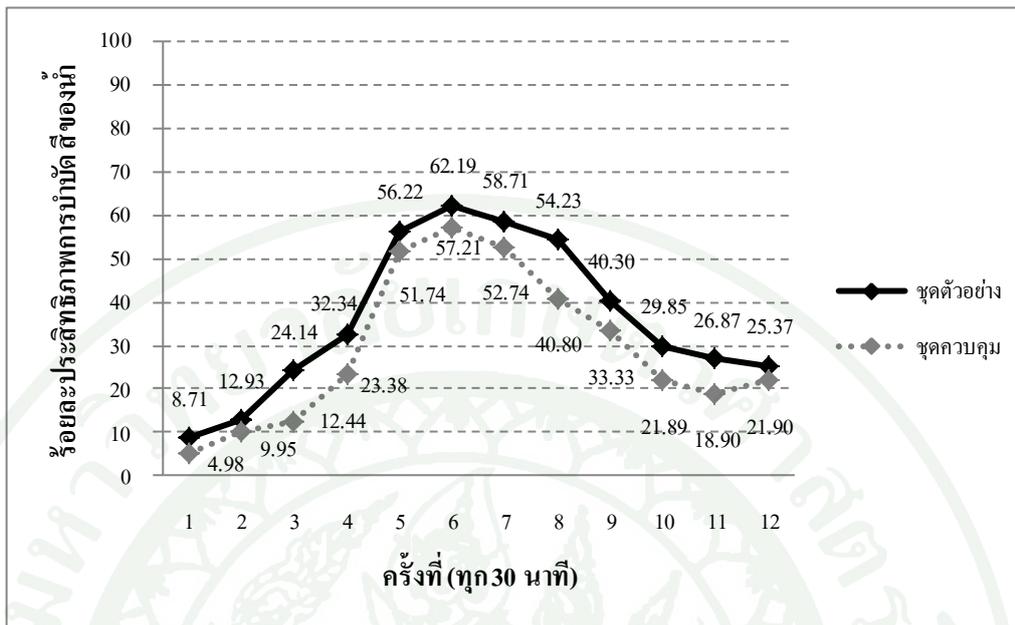


ภาพที่ 42 คอลัมน์แก้วชุดควบคุมในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

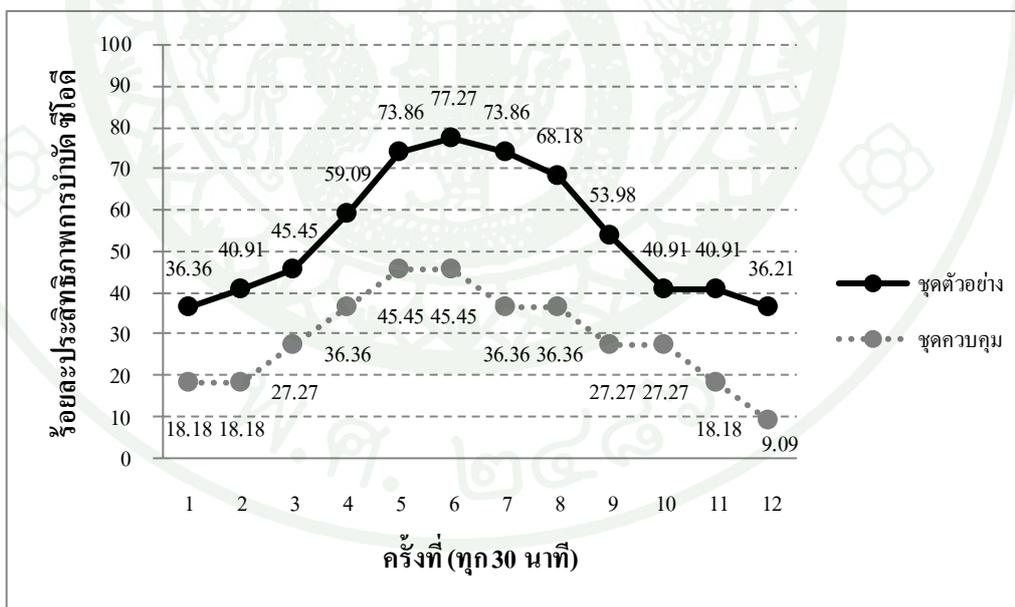
จากการทดลองเมื่อนำร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีที่สูงที่สุดในชุดควบคุมที่ระยะเวลาบำบัดต่างกัน แสดงผลดังตารางที่ 10 และการเปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีของชุดตัวอย่าง และชุดควบคุมแสดงดังภาพที่ 43 ถึง 45 ดังนี้

ตารางที่ 10 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีไอดีของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลาบำบัดต่างกันของชุดควบคุมในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

วิธีการบำบัด	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด	
	สีของน้ำ	ซีไอดี
1. ปล่อยผ่าน	57.21	45.45
2. แข็ง 4 ชั่วโมง	66.09	72.73
3. แข็ง 4 วัน แห้ง 2 วัน	64.86	55.56

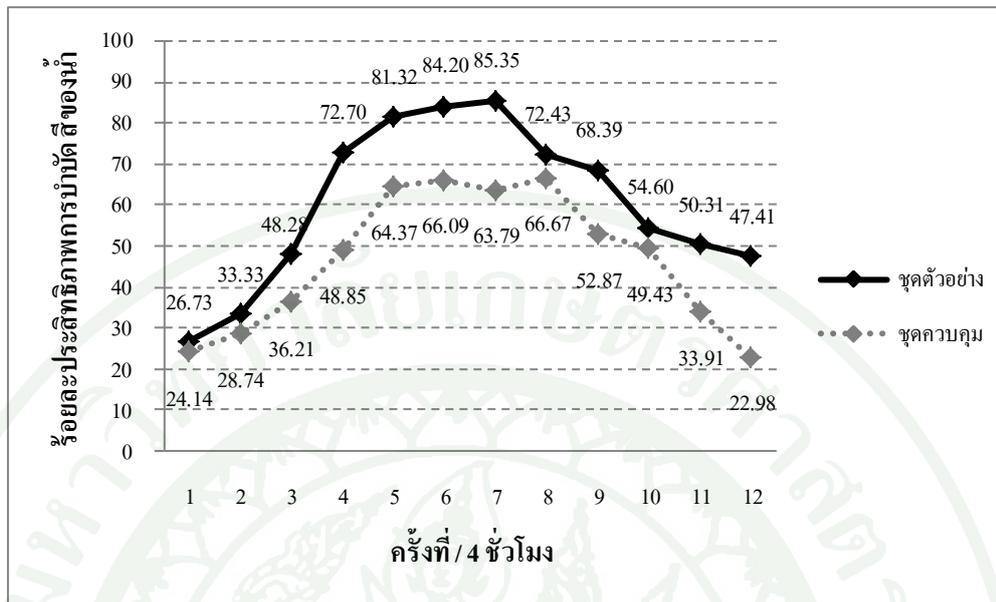


(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 43 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และสีโอดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ปล่อยผ่าน)

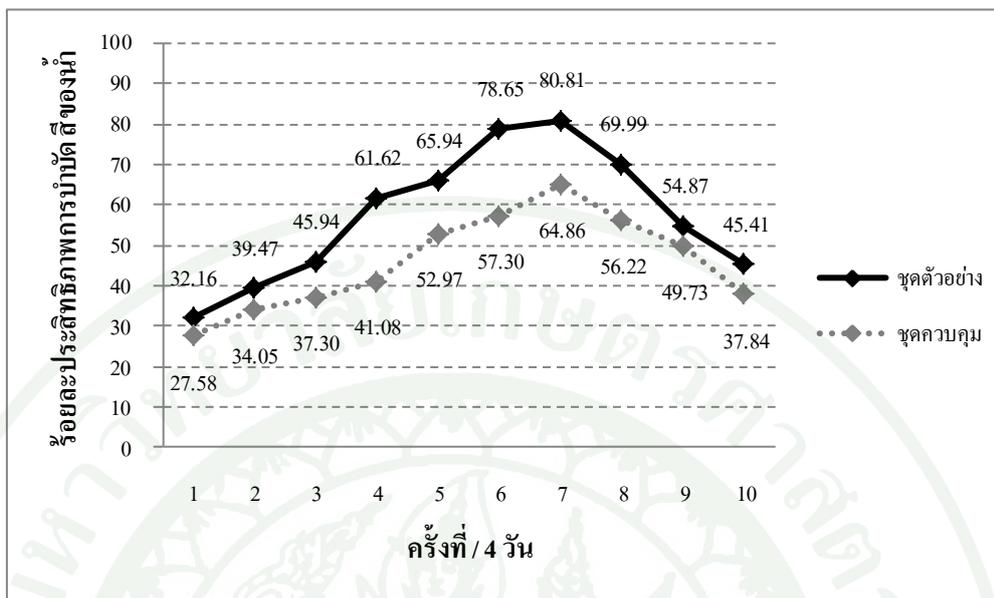


(ก.)

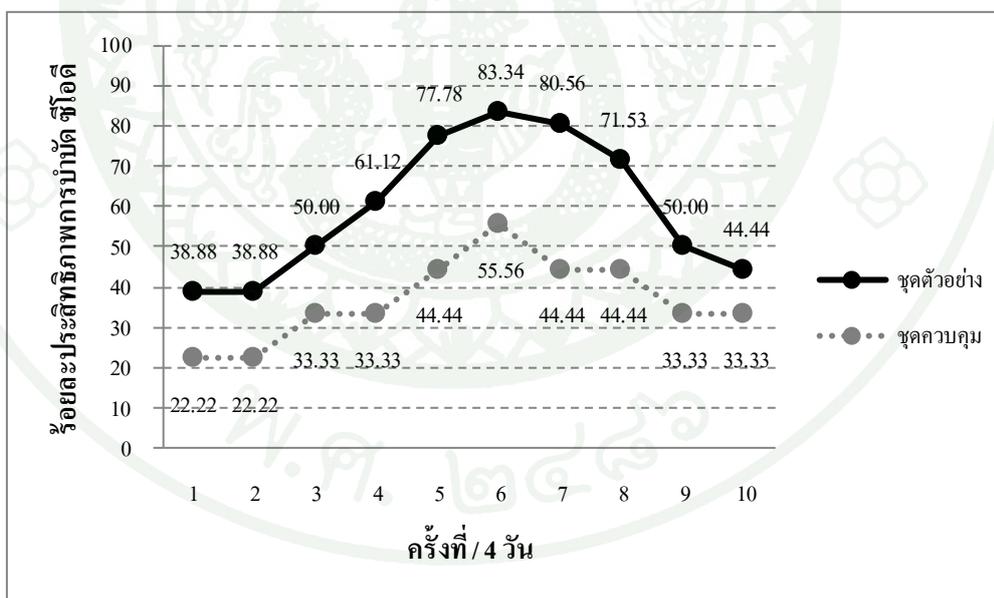


(ข.)

ภาพที่ 44 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และสีไออดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ระยะเวลาสัมผัสที่ 4 ชั่วโมง)



(ก.)



(ข.)

ภาพที่ 45 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ (ก.) และชีโอดี (ข.) กับระยะเวลาการบำบัดน้ำเสียในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (ระยะเวลาสัมผัสที่ 4 วัน)

นอกจากนี้เมื่อนำผลการทดลองของชุดควบคุมมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ และซีโอติกับชุดตัวอย่างในการทดลองแบบไหลต่อเนื่องที่ระยะเวลาบำบัดต่างๆกันยังแสดงให้เห็นว่าทุกวิธีการบำบัดของชุดควบคุมที่ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอติต่ำกว่าชุดตัวอย่างที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูก ดังตารางที่ 11 และ ตารางที่ 12

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ ของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลาบำบัดต่างๆกันโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

วิธีการบำบัด	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด		
	ชุดตัวอย่าง	ชุดควบคุม (ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์)	ค่าความแตกต่าง
1. ปล่อยผ่าน	62.19	57.21	4.98
2. แห่ขัง 4 ชั่วโมง	85.35	66.09	19.26
3. แห่ขัง 4 วัน แห้ง 2 วัน	80.81	64.86	15.95

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอติ ของชั้นวัสดุปลูกด้วยระยะเวลาบำบัดต่างๆกันโดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

วิธีการบำบัด	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด		
	ชุดตัวอย่าง	ชุดควบคุม (ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์)	ค่าความแตกต่าง
1. ปล่อยผ่าน	77.27	45.45	31.82
2. แห่ขัง 4 ชั่วโมง	90.91	72.73	18.18
3. แห่ขัง 4 วัน แห้ง 2 วัน	83.33	55.56	27.22

จากตารางที่ 11 และ 12 แสดงให้เห็นว่า เมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมกับดินในชั้นวัสดุปลูกในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและบำบัดมลสารได้มากกว่าการใช้ดินเพียงอย่างเดียว โดยที่ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์

## 7. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแบบจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

การทดลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติ (พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม) โดยจำลองในกระเบะพลาสติก รูปสี่เหลี่ยม ขนาด 51 x 51 x 54 เซนติเมตร บรรจุกววด 7 เซนติเมตร ทราซหยาบ 3 เซนติเมตร ทราซละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นบนสุดเป็นถ้ำลอยลิกไนต์ผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากการทดลองแบบเบตซ์คือ 1:20 สูง 30 เซนติเมตร ปลูกหญ้าแฝก (*Vetiveria zizanioides*) และธูปฤาษี (*Typha angustifolia* L.) ชนิดละกระเบะ แสดงตามภาพที่ 46 และ ภาพที่ 47 ดังนี้



ภาพที่ 46 กระเบะบรรจุชั้นวัสดุปลูกตามแบบพื้นที่เพาะปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ



(ก.)



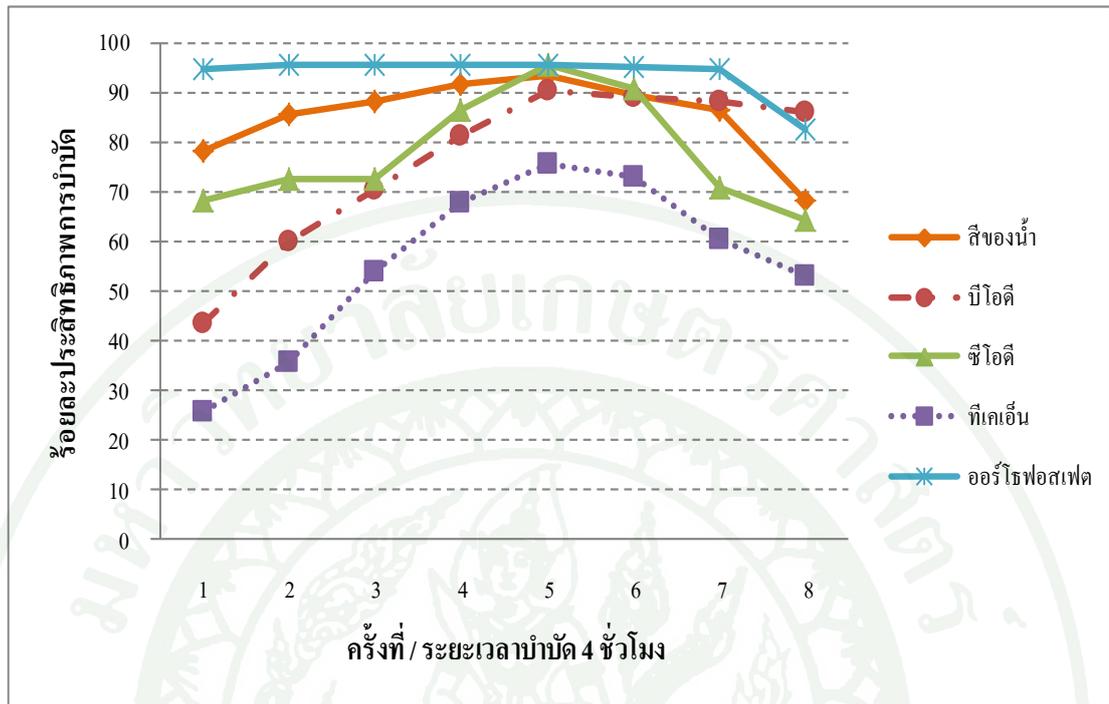
(ข.)

ภาพที่ 47 กระเบะจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติเพาะปลูกหญ้าแฝก (ก.) และ ต้นธูปฤาษี (ข.)

ระบบบำบัดแบบธรรมชาติ (พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม) เป็นการเลียนแบบลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยใช้พืชในการบำบัด ที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางธรรมชาติ อาศัยตัวกลางที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ ดิน พืช และจุลินทรีย์ทำหน้าที่ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกัน โดยมีการสะสม การเปลี่ยนรูปและการหมุนเวียนธาตุอาหารและสารต่างๆอย่างสมดุลที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การตกตะกอน การกรอง การดูดซึมธาตุอาหาร เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะทำให้สารมลพิษที่อยู่ในน้ำเสียเปลี่ยนรูปหรือมีความเป็นพิษลดลงทำการทดลองโดยเติมน้ำเสีย 200 ลิตร แข่งขันเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาบำบัดที่ดีที่สุดที่ได้จากวิธีการแบบแบคทีเรียและวิธีการแบบไหลต่อเนื่อง แล้วเก็บน้ำที่ไหลผ่านออกจากกระบวนการมาหาประสิทธิภาพในการบำบัด สีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และ ออร์โธฟอสเฟตทำการทดลองจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงประมาณครึ่งหนึ่งหรือมีสภาวะคงที่ ซึ่งผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติแสดงดังข้อที่ 7.1 ถึง 7.3 ดังต่อไปนี้

#### 7.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝก

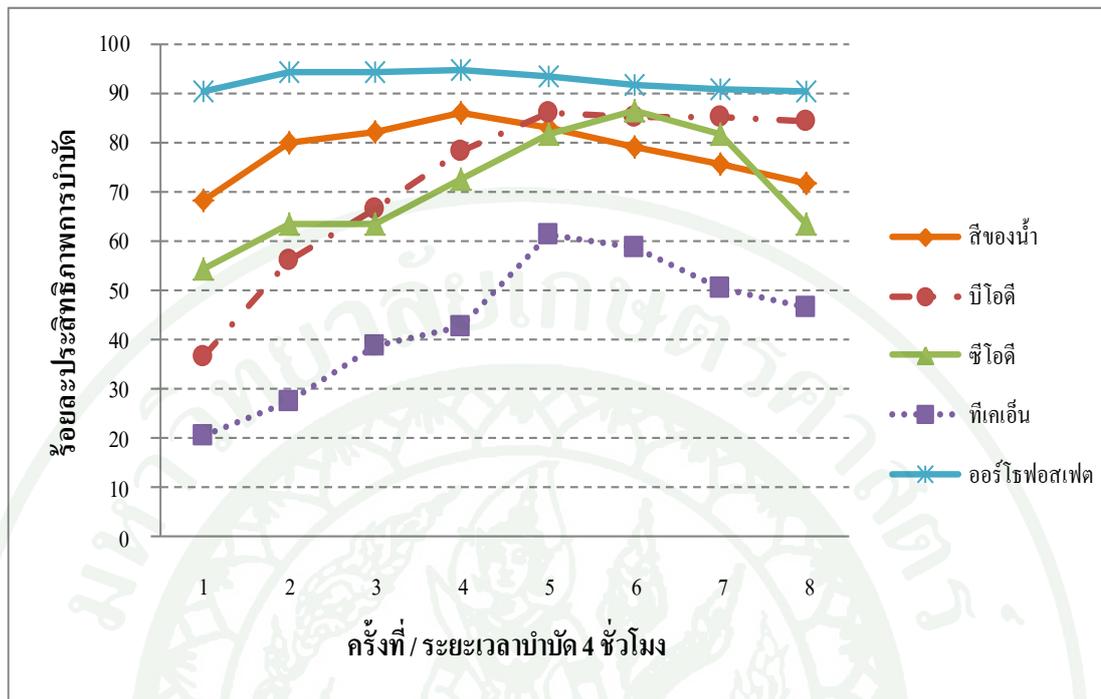
ผลจากการทดลองการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝกดังภาพที่ 47 (ก.) พบว่า ในครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆในน้ำเสียดำ อาจเป็นเพราะน้ำเสียชะสารปนเปื้อนในวัสดุปลูกออกมาด้วย หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยในครั้งที่ 5 มีประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โธฟอสเฟตสูงสุดร้อยละ 93.42, 90.63, 95.45, 75.66 และ 95.80 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์เริ่มลดลงเรื่อยๆอย่างเห็นได้ชัดในครั้งที่ 8 เนื่องจากความเสื่อมสภาพของชั้นกรองและตัวดูดซับ (Konduru and Viraraghavan, 1997; นิพนธ์ และ คณิตา, 2550) แสดงดังภาพที่ 48 ดังนี้



ภาพที่ 48 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ กับครั้งที่การบำบัดต่อระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมงของการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยการปลูกหญ้าแฝก

## 7.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝก

ผลจากการทดลองการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝกดังภาพที่ 47 (ข.) พบว่าในครั้งที่ 4 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ และออร์โทฟอสเฟตสูงสุดร้อยละ 86.05 และ 94.84 ตามลำดับ ส่วนในครั้งที่ 5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดบีโอดี และทีเคเอ็น สูงที่สุดร้อยละ 85.94 และ 61.18 ตามลำดับ รวมถึงในครั้งที่ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงที่สุดร้อยละ 86.36 หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับของแอมโมเนียไนโตรเจนเริ่มลดลงเรื่อยๆ แสดงดังภาพที่ 49 ดังนี้



ภาพที่ 49 ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆ กับครั้งที่การบำบัดต่อระยะเวลาบำบัด 4 ชั่วโมงของการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยการปลูกต้นธูปฤาษี

### 7.3 ผลการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝกเปรียบเทียบกับต้นธูปฤาษี

จากผลการทดลอง พบว่าชุดตัวอย่างที่ปลูกหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าสีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โทฟอสเฟต ในน้ำเสียได้ดีกว่าชุดตัวอย่างที่ปลูกธูปฤาษี เท่ากับร้อยละ 7.37, 4.69, 9.09, 14.48 และ 0.96 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 13 ทั้งนี้เป็นเพราะหญ้าแฝกมีระบบรากยาวเป็นฝอยสานกันแน่นหยั่งตรงลึกลงไปในแนวตั้ง และมีความเป็นระเบียบไม่แผ่ขนาน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมลสารได้มาก (สุรชัย, 2538; ดวงพร และ รังสิต, 2544; สุชาดา, 2548) ต่างจากรากของต้นธูปฤาษีที่รากจะมีขนาดสั้นกว่า และแผ่กระจายไม่เป็นระเบียบ (สุรชัย, 2538) ด้วยเหตุนี้ทำให้รากของหญ้าแฝกสามารถสัมผัสและดูดซับมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ดีกว่าธูปฤาษี

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆโดยปลูกหญ้าแฝก และต้นหญ้าในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

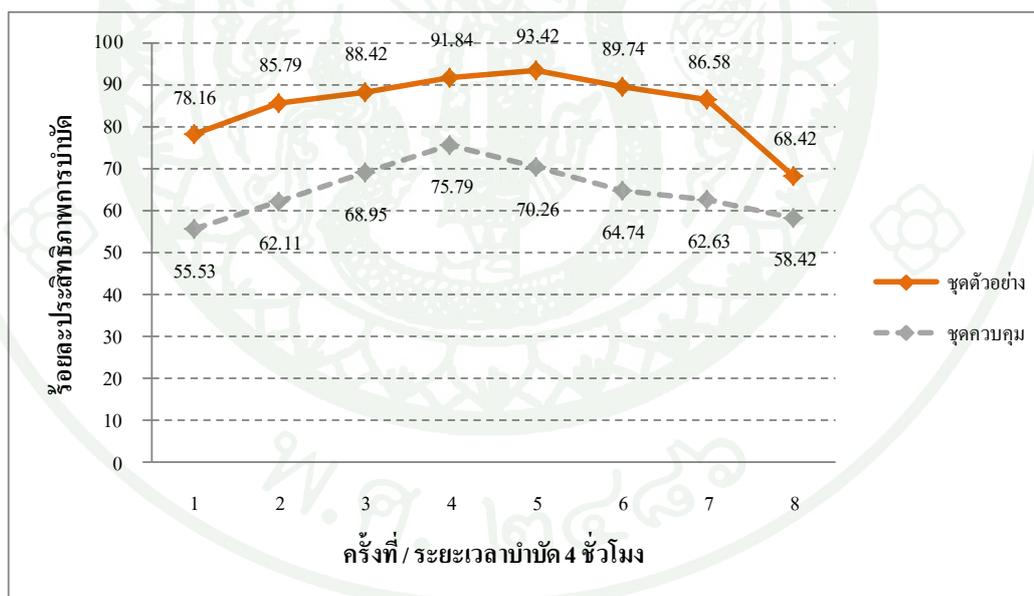
พารามิเตอร์	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด		
	ชุดตัวอย่างปลูกหญ้าแฝก	ชุดตัวอย่างปลูกต้นหญ้า	ค่าความแตกต่าง
สีของน้ำ	93.42	86.50	7.37
บีโอดี	90.63	85.94	4.69
ซีโอดี	95.45	86.36	9.09
ทีเคเอ็น	75.66	61.18	14.48
ออร์โธฟอสเฟต	95.80	94.84	0.96

#### 7.4 ชุดควบคุม

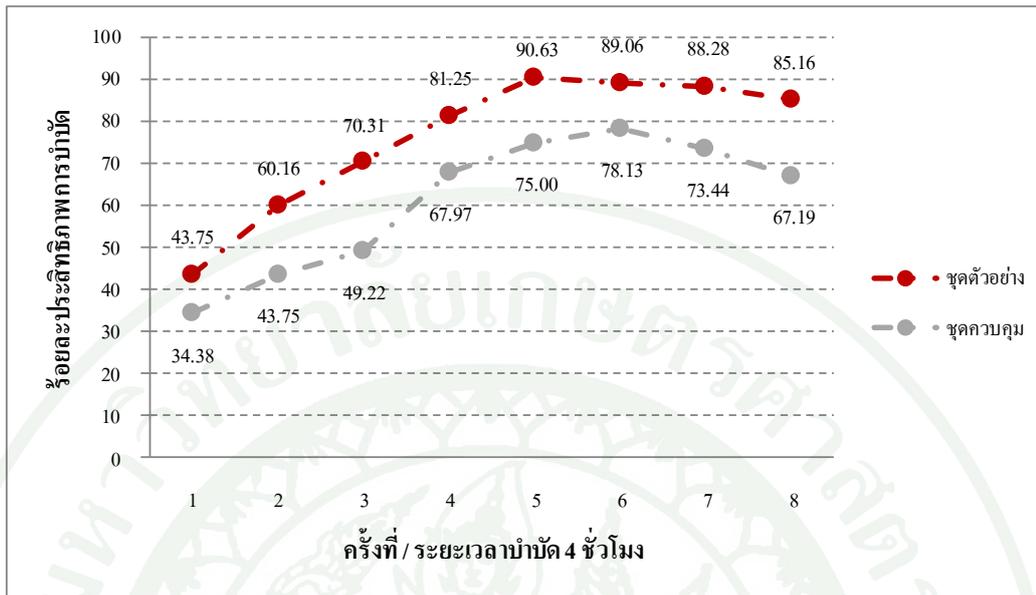
ชุดควบคุมทำการบรรจุชั้นวัสดุเหมือนชุดทดลองแต่ส่วนของชั้นดินบนสุดจะไม่ผสม ถ้ำล่อยลิกไนต์ และปลูกหญ้าแฝก ผลการทดลองพบว่า ชุดควบคุมมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โธฟอสเฟตได้ดีที่สุดได้เท่ากับร้อยละ 75.79, 78.13, 68.18, 53.29 และ 91.67 ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวอย่างที่ปลูกหญ้าแฝกกับชุดควบคุม พบว่าชุดตัวอย่างมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โธฟอสเฟตได้ดีกว่าชุดควบคุมที่ชั้นดินไม่ผสมถ้ำล่อยลิกไนต์ร้อยละ 17.63, 12.50, 27.27, 22.37 และ 4.13 ตามลำดับ เนื่องจากถ้ำล่อยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดีในการดูดซับมลสารต่างๆที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในน้ำเสียชุมชน เมื่อนำถ้ำล่อยลิกไนต์มาผสมในดินชั้นวัสดุปลูกร่วมกับพืช ทำให้อุณหภูมิเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารต่างๆในระบบบำบัดแบบธรรมชาติได้ดียิ่งขึ้น โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในน้ำเสียชุมชนของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม แสดงดังตารางที่ 14 และ ภาพที่ 50 ถึง 54

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยปลูกหญ้าแฝกเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

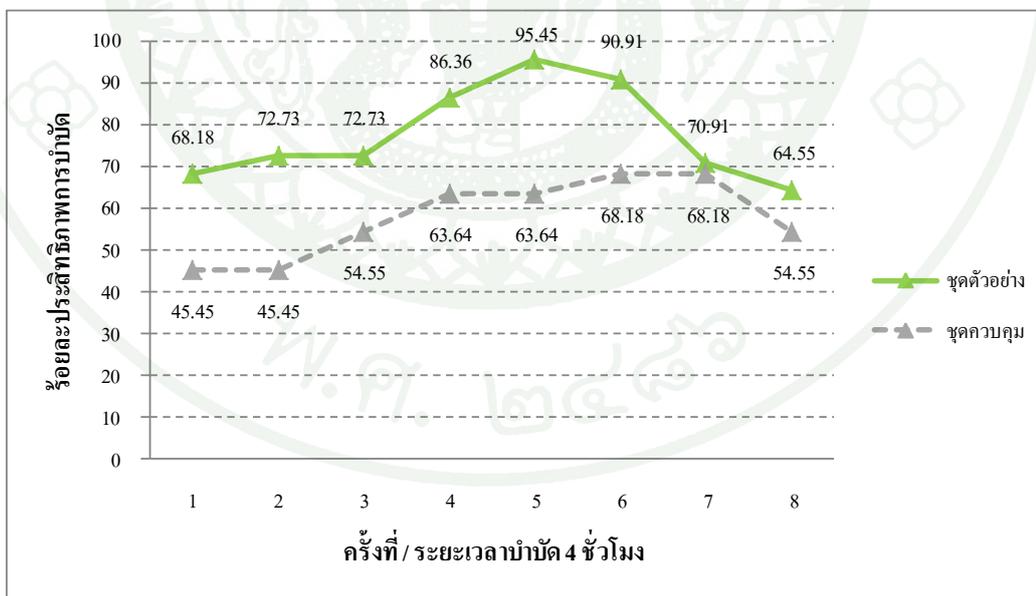
พารามิเตอร์	ร้อยละประสิทธิภาพการบำบัด		
	ชุดตัวอย่าง	ชุดควบคุม (ไม่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์)	ค่าความแตกต่าง
สีของน้ำ	93.42	75.79	17.63
บีโอดี	90.63	78.13	12.50
ซีโอดี	95.45	68.18	27.27
ทีเคเอ็น	75.66	53.29	22.37
ออร์โทฟอสเฟต	95.80	91.67	4.13



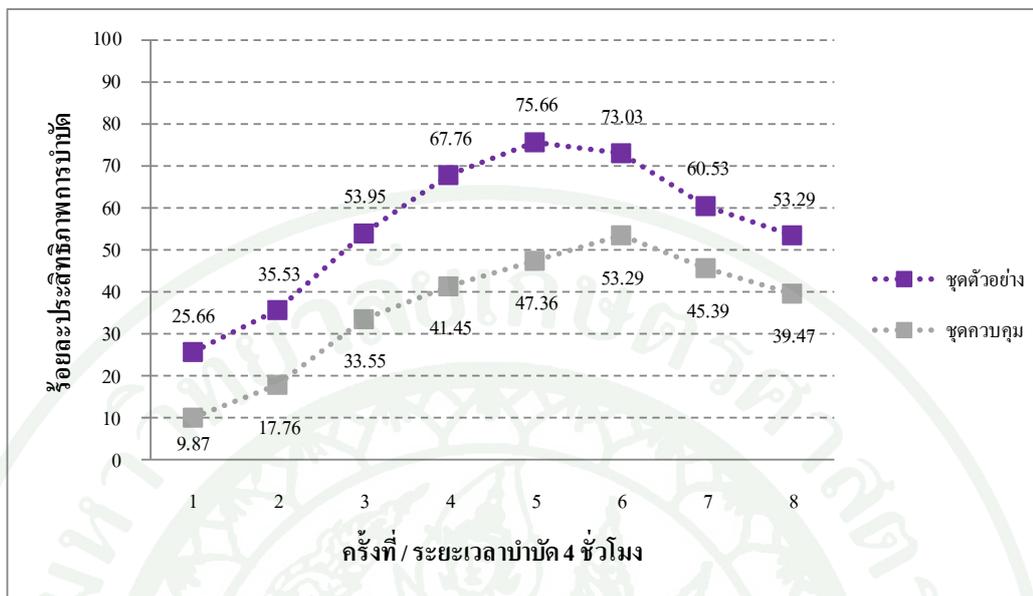
ภาพที่ 50 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำ จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม



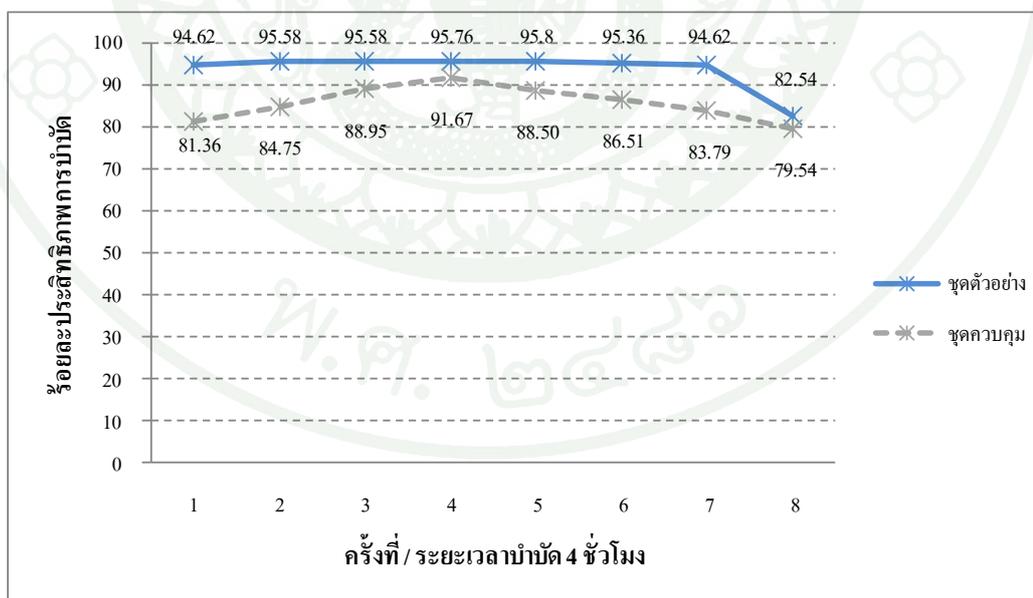
ภาพที่ 51 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าบีโอดี (BOD) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม



ภาพที่ 52 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (COD) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม



ภาพที่ 53 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม



ภาพที่ 54 เปรียบเทียบร้อยละประสิทธิภาพการบำบัดค่าออร์โธฟอสเฟต จากการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติของชุดตัวอย่างกับชุดควบคุม

## 8. ผลการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเสียชุมชนเริ่มต้นและคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแบบธรรมชาติ

เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพน้ำเสียชุมชนเริ่มต้นและคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแบบธรรมชาติกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2537) พบว่า ค่าสีของน้ำ พีเอช บีโอดี ไนโตรเจนทั้งหมด และฟอสฟอรัสทั้งหมด มีค่าลดลงและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และซีโอดี ไม่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน จึงได้เลือกใช้เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2539) เพื่อใช้เปรียบเทียบ พบว่าซีโอดีมีค่าลดลงและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดหลังผ่านการบำบัดมีค่าสูงกว่าน้ำเสียเริ่มต้นแต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อาจเป็นเพราะการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์ผสมกับชั้นวัสดุปลูกมีส่วนทำให้ค่าของแข็งละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังตารางที่ 15 ดังนี้

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ-เคมี ของน้ำเสียชุมชนเริ่มต้นและคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแบบธรรมชาติ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำเสียเริ่มต้น	คุณภาพน้ำที่ผ่านระบบบำบัดแบบธรรมชาติ		ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน
		ห้วยแฝก	รูปถ้ำยี่	
พีเอช	7.1	7.8	7.6	5.5-9.0
ค่าการนำไฟฟ้า (mS/cm)	2.85	3.64	3.81	-
ของแข็งละลายทั้งหมด(mg/L)	936	1,047	1,219	*ไม่เกิน 3,000
ความเค็ม (%)	0.4	0.4	0.5	-
ความขุ่น (NTU)	41.00	2.90	3.43	-
สี (Pt-Co Unit)	36.000	0.000	2.208	ไม่พึงเป็นที่รังเกียจ
ซีโอดี (mg/L)	352	16	48	*ไม่เกิน 120
บีโอดี (mg/L)	128	8	12	ไม่เกิน 20
อุณหภูมิ (C°)	28.0	28.7	29.0	*ไม่เกิน 40

ตารางที่ 15 (ต่อ)

พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ เสียเริ่มต้น	คุณภาพน้ำที่ผ่านระบบ บำบัดแบบธรรมชาติ		ค่ามาตรฐานควบคุมการ ระบายน้ำทิ้งจากระบบ บำบัดน้ำเสียชุมชน
		หญ้าแฝก	รูปถายี่	
ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)	42.56	10.36	16.52	ไม่เกิน 20
ออร์โธฟอสเฟต (mg/L)	13.57	0.60	0.70	ฟอสฟอรัสทั้งหมด $\leq 2$

หมายเหตุ เปรียบเทียบกับมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ โดยใช้น้ำเสียชุมชนจากบ่อสูบ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทำการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดลองแบบแบตช์ ส่วนที่สองเป็นการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องโดยใช้คอลัมน์แก้ว และส่วนที่สามเป็นการทดลองการจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติได้ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

ส่วนแรกผลจากการทดลองแบบแบตช์ พบว่าถ้ำลอยลิกไนต์ 5 กรัมต่อน้ำเสียชุมชน 50 มิลลิลิตร สามารถบำบัดสีและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 86.26 และ 62.50 ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 ชั่วโมงสามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 81.52 และ 75.00 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 4 วันสามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 78.67 และ 62.50 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงกลไกการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์พบว่าสอดคล้องกับทั้ง ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช และอัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์ต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:20 สามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 83.57 และ 62.50 ตามลำดับ

ส่วนที่สองจากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง พบว่าการทดลองโดยการปล่อยผ่านสามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงสุด ร้อยละ 62.19 และ 77.27 ตามลำดับ ส่วนที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงสุดร้อยละ 85.35 และ 90.91 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน สามารถบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ ร้อยละ 80.81 และ 83.33 ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองในส่วนของการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องมาเปรียบเทียบกับ ยังพบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ให้ผลการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีได้ดีกว่าการทดลองแบบปล่อยผ่านและแช่ทิ้งเป็นวัน โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีของน้ำและซีโอดีสูงกว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 4 วัน ประมาณร้อยละ 4.54 และ 7.58 ตามลำดับ และสูงกว่าแบบปล่อยผ่าน 23.16 และ 13.64 ตามลำดับอีกด้วย

ส่วนที่สามการทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบประยุกต์สำหรับใช้งานจริงโดยใช้การจำลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิดคือหญ้าแฝกและรูปฤาษี เป็นการจำลองพื้นที่

ปลูกของระบบบำบัดแบบธรรมชาติ อาศัยตัวกลางที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ ดิน พืช และ จุลินทรีย์ทำหน้าที่ในการบำบัดน้ำเสียร่วมกัน ผลการทดลองพบว่าพืชทั้งสองชนิดให้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดสีของน้ำ บีโอดี ซีโอดี ทีเคเอ็น และออร์โธฟอสเฟตได้ดีคือเท่ากับร้อยละ 86.05, 85.94 86.36, 61.18 และ 94.84 ตามลำดับสำหรับรูปถ่าย และเท่ากับร้อยละ 93.42, 90.63, 95.45, 75.66 และ 95.80 ตามลำดับ สำหรับหญ้าแฝก และจะเห็นได้ว่าหญ้าแฝกมีประสิทธิภาพในการบำบัด มลสารในน้ำเสียดีกว่าต้นรูปถ่ายร้อยละ 7.37, 4.69, 9.09, 14.48, 0.96 ตามลำดับ รวมถึงหูดควบคุม ที่ไม่ได้ผสมแกลบยลิกไนต์ในชั้นวัสดุปลูกให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารต่ำกว่าหูดตัวอย่าง คือเท่ากับร้อยละ 17.63, 12.50, 27.27, 22.37 และ 4.13 ตามลำดับ

จากงานวิจัยนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า แกลบยลิกไนต์มีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับ มลสารในน้ำเสียและสามารถนำแกลบยลิกไนต์มาผสมกับดินในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อเป็นตัว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติโดยใช้พืชบำบัด ซึ่งเป็นเทคโนโลยี อย่างง่าย ใช้วัชพืชและพืชท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์ นำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง รวมถึงเป็นการใช้ ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรม และลดปริมาณของเสียที่จะนำไปกำจัดให้เหลือน้อยลงได้อีก ด้วย

### ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยการใช้ถ้ำลอยลิกไนต์จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษเป็นตัวดูดซับมลสารในระบบบำบัดแบบธรรมชาติ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ถ้ำลอยลิกไนต์มีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาเป็นตัวดูดซับมลสาร ดังนั้นจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับน้ำเสียประเภทอื่นๆได้
2. การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองระบบบำบัดแบบธรรมชาติโดยใช้พืชโคล่พื้นน้ำในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลได้ผิวดักกลาง ดังนั้นอาจจะทำการเปรียบเทียบโดยใช้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านพื้นผิวดัก
3. ศึกษาคุณภาพของดินหลังจากการประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากดินที่ผสมถ้ำลอยลิกไนต์ในการทดลองอาจมีคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กนกพร บุญส่ง. 2549. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแทนลอน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กลุ่มศึกษาและสนับสนุนองค์ประกอบส่วนท้องถิ่น สถาบันวิจัยสังคม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

2551. ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบึงประดิษฐ์ (Constructed Wetland). แหล่งที่มา:

[http://www.sri.cmu.ac.th/~srilocal/water/page\\_04d.htm](http://www.sri.cmu.ac.th/~srilocal/water/page_04d.htm), 29 มิถุนายน 2557.

เกษม จันทร์แก้ว. 2553. วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 8. สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

กรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย. 2555. จำนวนราษฎรทั่วราชอาณาจักร แยกเป็น

กรุงเทพมหานครและจังหวัดต่างๆ ตามหลักฐานการทะเบียนราษฎร ณ วันที่ 31 ธันวาคม

2555. แหล่งที่มา: [http://stat.bora.dopa.go.th/stat/y\\_stat55.html](http://stat.bora.dopa.go.th/stat/y_stat55.html) 2555, 29 มิถุนายน 2557.

กรมควบคุมมลพิษ. 2537. มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน.

แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html), 29 มิถุนายน

2557.

\_\_\_\_\_. 2555. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2555. 210 หน้า.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2536. การพัฒนาและธรรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. กอง

แผนที่และการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักเทคโนโลยี

สิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2539. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.

แหล่งที่มา: <http://www2.diw.go.th/PIC/download/info/water1.pdf>, 7 พฤษภาคม 2557.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2556. โครงการจัดทำระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมตามแนวพระราชดำริ. แหล่งที่มา: [http://www.ertc.deqp.go.th/ertc/index.php?option=com\\_content&task=view&id=947&Itemid=66](http://www.ertc.deqp.go.th/ertc/index.php?option=com_content&task=view&id=947&Itemid=66), 7 พฤษภาคม 2557.

กลอยกาญจน์ เก่าเนตรสุวรรณ. 2544. การบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้บึงประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิวดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ขวัญฤดี โชติชนาทวีวงศ์. 2548. ตำราระบบบำบัดมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2556. สารมลพิษอุตสาหกรรมและการควบคุม. ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. (อัครสำเนา)

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

ดร.รชนี เลขเพ็ชร. 2545. การใช้เถ้าลอยขับพิษมีนัสและเลิกไนต์ในการปรับปรุงดินกระจายตัว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทศรัตน์ ไชยรัตน์. 2555. ประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เถ้าลอยเลิกไนต์และเถ้าลอยปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และ วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2540. คู่มือการวิเคราะห์น้ำเสีย. สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

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

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ และ คณิตา ตังคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บริษัท เอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน). 2555. การพัฒนาสิ่งแวดล้อมของโรงงานอย่างยั่งยืน. แหล่งที่มา: <http://paper.scg.co.th/th/home/content/3/12/Environmental.html>, 14 ตุลาคม 2556.

มนต์ชัย จันทร์ศิริ. 2548. ประสิทธิภาพของหญ้าแฝกที่ปลูกด้วยเทคนิคแทนลอน้ำในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

ราชกิจจานุเบกษา. 2535. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เล่มที่ 109 ตอนที่ 37.

ลัทธินิ คณานินันท์. 2539. ประสิทธิภาพของกกกลมรูปถาญี้อและแห้วทรงกระเทียมในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.

ลัทธินิ ทองอินทร์ และ จินดาวัลย์ วิบูลย์อุทัย. 2554. ประสิทธิภาพของรูปถาญี้อและกกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลผ่านลำต้น. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ฉบับบัณฑิตศึกษา. 3 (11): 49-58.

วรวิมล มัชยันต์. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพบดกดินดิบด้านการรับแรงด้วยปูนขาวและเถ้าปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วัชรพงษ์ สุระคุปต์. 2554. ผลของความลึกชั้นตัวกลางต่อการกำจัดไนโตรเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบน้ำไหลใต้ผิวในแนวตั้ง. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. 25 (3): 71-78.

วิจิตรอัจฉรา สรรพกิจจำนง. 2536. รายงานศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงฉบับที่  
วพ.131 เล้าลอยในงานทาง. 33 หน้า.

วิฑูร ชินพันธ์ และ อาทิตย์ สุขเกษม. 2536. การศึกษาเปรียบเทียบหญ้าแฝกในประเทศไทย, น. 30-  
49. ใน รายงานผลการดำเนินงานโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอัน  
เนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปี 2536. กองแผนงาน กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

วิฑิต ขอสันติวิวัฒน์. 2545. การปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พื้นที่  
ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบไหลใต้ผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิมลพรรณ รุ่งพรหม. 2542. พระราชดำริในการแก้ไขปัญหาหน้าเสียด. คุรุทรัพย์การนำของแผ่นดิน.  
1 (2): 50-55.

วีระ ตั้งชาวล. 2545. เคมิของน้ำและการบำบัดน้ำเสียด. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

วีระชัย ฒ นคร. 2536. การศึกษาอนุกรมวิธานของหญ้าสกุล Vetiveria ในประเทศไทย, น. 30 -36.  
ใน รายงานผลการดำเนินงานโครงการพัฒนาและรณรงค์การใช้หญ้าแฝกอันเนื่องมาจาก  
พระราชดำริ ประจำปี 2536. กองแผนงาน กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

ศุวศา กานตวนิชกูร. 2546. การกำจัดไนโตรเจนของระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลใต้ผิวดินแบบ  
ไหลขึ้นตามด้วยแบบไหลลง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.  
11 (2): 46-55.

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.  
2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเล้าลอยถ่านหินที่อุณหภูมิและความดันสูง. แหล่งที่มา:  
<http://www.nstda.or.th/thairesearch/node/4645>, 29 มิถุนายน 2557.

- สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. **น้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำเสียชุมชน**. แหล่งที่มา: <http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=laws&tabid=1&secid=3>, 29 มิถุนายน 2557.
- สุชาดา ปุณณสัมฤทธิ์. 2548. **การบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์แบบผสม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุรัชัย มัชฌาชีฟ. 2538. **วัชพืชบำบัดน้ำเสียในประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แพรวพิทยา, กรุงเทพฯ.
- สุรัสวดี บุษปะเรณู. 2545. **การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดบีโอดีและซีโอดีในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรีโดยวิธีห้วยกรองน้ำเสีย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2552. **แก้ไขปัญหาหน้าเสียดโดยวิธีธรรมชาติช่วยธรรมชาติ**. แหล่งที่มา: <http://www.haii.or.th/wiki84/index.php>, 12 พฤศจิกายน 2556.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. 2556. **โครงการกระดาษเพื่อต้นไม้ โดยมูลนิธิศูนย์สื่อเพื่อการพัฒนา**. แหล่งที่มา: [http://www.thaihealth.or.th/healthcontent/special\\_report/34160](http://www.thaihealth.or.th/healthcontent/special_report/34160), 3 ตุลาคม 2556.
- สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. 2538. **ปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากบ้านเรือน**. แหล่งที่มา: [http://osos.boi.go.th/index.php?option=com\\_content&view=article&id=11&Itemid=57&lang=th](http://osos.boi.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=57&lang=th), 12 พฤศจิกายน 2556.
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. 2554. **รายงานการดำเนินงานของสำนักจัดการคุณภาพน้ำประจำปี 2554**. 145 หน้า.

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์ และ ปิยวรรณ โภชน์พันธุ์. 2549. การเจริญเติบโตของหญ้าแฝก 4 แหล่งพันธุ์ที่ปลูกในน้ำเสียชุมชน กรมชลประทาน, น. 641-649. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44 (สาขาพืช). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โตมนัส สมประเสริฐ และ ศุวศา กานตวนิชกูร. 2545. การเปรียบเทียบการกำจัดไนโตรเจนโดยพืชน้ำสองชนิดในระบบบึงประดิษฐ์ที่มีการไหลในแนวตั้งอยู่เหนือถังกรองทรายที่มีการไหลในแนวราบ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 10 (2): 46-54.

อาภรณ์ ยิ่งยง. 2539. การบำบัดบีโอดีและซีโอดี ในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรีโดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

องค์กรจัดการน้ำเสีย ฝ่ายพัฒนาองค์กร. 2556. รายงานแผนบริหารความเสี่ยงองค์กรจัดการน้ำเสียประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2556 (ฉบับใหม่). 49 หน้า.

APHA, AWWA and WEF. 1995. **Standard Method for Examination of Water and Wastewater**. Fifteenth printing. American Public Health Publisher Inc., New York.

Barry Crittenden and Thomas, W. J. 1998. **Adsorption Technology & Design**. Butterworth-Heinemann Publishing, Great Britain.

Boyd, C. E. 1970. Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrients Removal from Polluted Water. **Economic Botany**. 24: 94-103.

Buckley, C. A. 1992. Membrane Technology for The Treatment of Dyehouse Effluents. **Water Science & Technology**. 25 (9): 203-209.

Grace, J. B. and Harrison, T. 1986. The Biology of Canadian Weeds. 73. *Typhalatifolia* L., *Typha angustifolia* L. and *Typha x glauca* Godr. **Canadian Journal of Plant Science**. 66: 361-379.

- Johnson, A. T. 1989. The Theory of Coloration of Textiles. **Society of Dyes and Colorist**. 90 (2): 912-920.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. 1999. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. **Environmental Science & Technology**. 33 (7): 973–980.
- Konduru, R. and Viraraghavan, T. 1997. Dye Removal Using Low Cost Adsorbents. **Water Science and Technology**. 3 (36): 189–196.
- Maron, H. and Prutton, F. 1961. **Principles of Physical Chemistry**. Second printing. The Macmillan Company, New York.
- Massechelyn, P. and Patrick, W. 1994. Arsenic and Chromium Redox Chemistry in Wetland Soils and Sediments, pp. 615–625. *In* Adriano DC, ed. **Biogeochemistry of Trace Elements. Science and Technology Letters**. Northwood publishing Company, New York.
- Mark, A. Reinsel. 2014. **Floating Wetlands Help Boost Nitrogen Removal in Lagoons**. Available Source: <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-28/issue-6/editorial-features/floating-wetlands-help-boost--nitrogen-removal-in-lagoons.html>, September 18, 2014.
- Maschinski, J., Southam, G., Hines, J. and Strohmeyer, S.. 1999. Efficiency of a Subsurface Constructed Wetland System Using Native Southwestern U.S. Plants. **Journal of Environmental Quality**. 14 (4): 459-462.
- Patrino, J. and Russel, T. 1994. Natural Wetland Polishing Effluent Discharging to Wooloweyah Lagoon. **Water Science & Technology**. 29 (4): 185–192.

- Rani Devi and Dahiya, R. P. 2006. Chemical Oxygen Demand (COD) Reduction in Domestic Wastewater by Fly Ash and Brick Kiln Ash. **Water, Air, and Soil Pollution**. 4 (174): 33-46.
- Richards Pual and Reynolds, T. D. 1995. **Unit Operations and Processes in Environmental Engineering**. Second printing. Cengage Learning, Boston.
- Ron, C. and George, T. 1998. **Small and Decentralized Wastewater Management Systems**. Second printing. WCB McGraw-Hill, Singapore.
- Teller Am., Brunauer S., Deming, L. S. and Deming, W. E. 1940. BET Surface Area Analysis of Nanoparticles. **Chemical Society**. 62: 1715-1723.
- United States Environmental Protection Agency. 2000. **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**. Available Source: <http://water.epa.gov/type/wetlands/restore/upload/constructed-wetlands-design-manual.pdf>, October 29, 2013.
- Wang, T. W., Jing, S. R. and Lin, Y. F. 1989. Using Constructed Wetland Systems to Remove Solids from Highly Polluted River Water. **Water Science and Technology**. 1: 89-96.
- Wilcox, D.A. 1986. The Effects of Deicing Salts on Vegetation in Pinhook Bog, Indiana. **Canadian Journal of Botany**. 64: 865-874.
- Yang Qiong, Zhang He Chenl, Jian Gang Zhaol and Bin HeGu. 2007. Contaminant Removal of Domestic Wastewater by Constructed Wetlands Effects of Plant Species. **Journal of Integrative Plant Biology**. 4 (49): 437-446.
- Zeynep Zaimoglu. 2006. Treatment of Campus Wastewater by a Pilot-Scale Constructed Wetland Utilizing Typhalatifolia, Juncusacutus and Iris versicolor. **Journal of Environmental Biology**. 27 (2): 293-298.



ภาคผนวก

**ตารางผนวกที่ 1** ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานออร์โธฟอสเฟตกับค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของสารละลายออร์โธฟอสเฟต (ppm)	ค่าดูดกลืนแสง (nm.)
0.5	0
1.5	0.035
2.5	0.064
5.0	0.134
7.5	0.211
10.0	0.290

**ตารางผนวกที่ 2** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับปริมาณแฉ่ำลอยลิกไนต์จาก การทดลองแบบแบตช์

ปริมาณแฉ่ำลอยลิกไนต์ (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง	ร้อยละการบำบัด
1	0.070	66.82
2	0.043	79.62
3	0.032	84.83
4	0.033	84.36
5	0.029	86.26
6	0.030	85.78
7	0.039	81.52
8	0.041	80.57
9	0.056	73.58
10	0.061	71.23
11	0.066	68.87
12	0.074	65.09
13	0.077	63.68
14	0.075	64.62
15	0.079	62.74

**ตารางผนวกที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีไอดี กับปริมาณแกลลอลิกไนต์จากการทดลองแบบแบตช์

ปริมาณแกลลอลิกไนต์ (กรัม)	ร้อยละการบำบัด
1	12.50
2	25.00
3	50.00
4	50.00
5	62.50
6	62.50
7	50.00
8	37.50
9	37.50
10	37.50
11	25.00
12	25.00
13	25.00
14	25.00
15	12.50

**ตารางผนวกที่ 4** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับระยะเวลาจากการทดลองแบบแบตช์

ระยะเวลาสัมผัส	ค่าการดูดกลืนแสง	ร้อยละการบำบัด
1hr.	0.095	54.98
2 hrs.	0.071	66.35
3 hrs.	0.053	74.88
4 hrs.	0.039	81.52
5 hrs.	0.048	77.25
6 hrs.	0.067	68.25

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ค่าการดูดกลืนแสง	ร้อยละการบำบัด
1 day	0.064	69.67
2 days	0.059	72.04
3 days	0.052	75.35
4 days	0.045	78.67
5 days	0.064	69.67
6 days	0.083	60.66
7 days	0.091	56.87

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับระยะเวลาจากการทดลองแบบแบตช์

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ร้อยละการบำบัด
1 hr.	37.50
2 hrs.	50.00
3 hrs.	62.50
4 hrs.	75.00
5 hrs.	62.50
6 hrs.	62.50
1 day	37.50
2 day	37.50
3 day	50.00
4 day	62.50
5 day	50.00
6 day	37.50
7 day	37.50

**ตารางผนวกที่ 6** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีของน้ำ กับอัตราส่วนโดยน้ำหนัก  
ของเกลือยลิกไนต์ต่อดินจากการทดลองแบบแบตช์

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ เกลือยลิกไนต์:ดิน	ค่าการดูดกลืนแสง	ร้อยละการบำบัด
1:10	0.045	78.87
1:20	0.035	83.57
1:30	0.046	78.40
1:40	0.051	76.06
1:50	0.053	75.12

**ตารางผนวกที่ 7** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีโอดี กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ  
เกลือยลิกไนต์ต่อดินจากการทดลองแบบแบตช์

อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ เกลือยลิกไนต์:ดิน	ร้อยละการบำบัด
1:10	37.50
1:20	62.50
1:30	50.00
1:40	37.50
1:50	37.50

ตารางผนวกที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ้ำลอยลิกไนต์

ปริมาณถ้ำลอย (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	log q	log C
1	30	18.458	0.05	0.577	1.733	0.054	-0.239	1.266
2	30	12.833	0.05	0.429	2.331	0.078	-0.368	1.108
3	30	6.167	0.05	0.397	2.519	0.162	-0.401	0.790
4	30	5.333	0.05	0.308	3.247	0.188	-0.511	0.727
5	30	3.458	0.05	0.265	3.774	0.289	-0.577	0.539

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดในการ  
ทดลองแบบปล่อยผ่าน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง			ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.182	0.185	0.183	224	8.71	36.36
2	0.174	0.176	0.175	208	12.93	40.91
3	0.163	0.142	0.153	192	24.14	45.45
4	0.139	0.133	0.136	144	32.34	59.09
5	0.094	0.082	0.088	92	56.22	73.86
6	0.081	0.079	0.080	80	62.19	77.27
7	0.081	0.084	0.083	92	58.71	73.86
8	0.097	0.086	0.092	112	54.23	68.18
9	0.126	0.114	0.120	128	40.30	53.98
10	0.148	0.133	0.141	156	29.85	40.91
11	0.148	0.145	0.147	156	26.87	40.91
12	0.151	0.149	0.150	162	25.37	36.21

**ตารางผนวกที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา  
สัมผัส 4 ชั่วโมง จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง			ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.124	0.131	0.127	192	26.73	45.45
2	0.122	0.109	0.116	160	33.33	54.55
3	0.088	0.092	0.090	112	48.28	68.18
4	0.054	0.041	0.048	96	72.70	72.73
5	0.037	0.028	0.033	48	81.32	86.36
6	0.024	0.031	0.028	32	84.20	90.91
7	0.045	0.047	0.046	32	85.35	90.91
8	0.048	0.053	0.051	48	72.43	86.36
9	0.054	0.056	0.055	80	68.39	77.27
10	0.082	0.081	0.082	128	54.60	63.64
11	0.091	0.082	0.087	144	50.31	59.09
12	0.097	0.086	0.091	156	47.41	55.68

**ตารางผนวกที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา  
สัมผัส 4 วัน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดตัวอย่าง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง			ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.128	0.123	0.126	176	32.16	38.88
2	0.116	0.108	0.112	160	39.47	38.88
3	0.102	0.098	0.100	144	45.94	50.00
4	0.067	0.074	0.071	112	61.62	61.12
5	0.065	0.061	0.063	64	65.94	77.78

ตารางผนวกที่ 11 (ต่อ)

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง			ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย		สีของน้ำ	ซีไอดี
6	0.052	0.050	0.051	48	78.65	83.34
7	0.047	0.047	0.047	56	80.81	80.56
8	0.083	0.084	0.064	82	69.99	71.53
9	0.097	0.093	0.096	144	54.87	50.00
10	0.098	0.104	0.101	160	45.41	44.44

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดในการทดลองแบบปล่อยผ่าน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
			สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.191	288	4.98	18.18
2	0.181	288	9.95	18.18
3	0.176	256	12.44	27.27
4	0.154	224	23.38	36.36
5	0.097	192	51.74	45.45
6	0.086	192	57.21	45.45
7	0.095	224	52.74	36.36
8	0.119	224	40.80	36.36
9	0.134	256	33.33	27.27
10	0.157	256	21.89	27.27
11	0.163	288	18.90	18.18
12	0.157	320	21.90	9.09

**ตารางผนวกที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา  
สัมผัส 4 ชั่วโมง จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
			สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.132	224	24.14	36.36
2	0.124	224	28.74	36.36
3	0.111	192	36.21	45.45
4	0.089	160	48.85	54.55
5	0.062	128	64.37	63.64
6	0.059	128	66.09	63.64
7	0.063	96	63.79	72.73
8	0.058	128	66.67	63.64
9	0.082	160	52.87	54.55
10	0.088	224	49.43	45.45
11	0.115	192	33.91	36.36
12	0.134	224	22.98	36.36

**ตารางผนวกที่ 14** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และซีไอดีกับร้อยละการบำบัดที่ระยะเวลา  
สัมผัส 4 วัน จากการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องของชุดควบคุม

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
			สีของน้ำ	ซีไอดี
1	0.134	224	27.58	22.22
2	0.122	224	34.05	22.22
3	0.116	192	37.30	33.33
4	0.109	192	41.08	33.33
5	0.087	160	52.97	44.44
6	0.079	128	57.30	55.56

## ตารางผนวกที่ 14 (ต่อ)

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละการบำบัด	
			สีของน้ำ	ซีโอดี
7	0.065	128	64.86	44.44
8	0.081	160	56.22	44.44
9	0.093	192	49.73	33.33
10	0.115	192	37.84	33.33

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆของดินผสมแกลบ  
ลิกไนต์ร่วมกับการปลูกหญ้าแฝก

ครั้งที่/ ระยะเวลา บำบัด 4 ชั่วโมง	ร้อยละการบำบัด				
	สีของน้ำ	บีโอดี	ซีโอดี	ทีเคเอ็น	ออร์โธฟอสเฟต
1	78.16	43.75	68.18	25.66	94.62
2	85.79	60.16	72.73	35.53	95.58
3	88.42	70.31	72.73	53.95	95.58
4	91.84	81.25	86.36	67.76	95.76
5	93.42	90.63	95.45	75.66	95.80
6	89.74	89.06	90.91	73.03	95.36
7	86.58	88.28	70.91	60.53	94.62
8	68.42	85.16	64.55	53.29	82.54

**ตารางผนวกที่ 16** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆของดินผสมถ้ำลอย  
ลึกในครั้งร่วมกับการปลูกทุเรียน

ครั้งที่/ระยะเวลา บำบัด 4 ชั่วโมง	ร้อยละการบำบัด				
	สีของน้ำ	บีโอดี	ซีโอดี	ทีเคเอ็น	ออร์โธฟอสเฟต
1	68.42	36.72	54.55	20.39	90.42
2	80.00	56.25	63.64	27.63	94.32
3	82.11	66.41	63.64	38.82	94.32
4	86.05	78.13	72.73	42.76	94.84
5	83.16	85.94	81.82	61.18	93.37
6	79.21	85.16	86.36	58.55	91.67
7	75.79	85.16	81.82	50.66	90.94
8	71.84	84.38	63.64	46.71	90.42

**ตารางผนวกที่ 17** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดพารามิเตอร์ต่างๆกับการใช้ดินไม่ผสม  
ถ้ำลอยลึกในครั้งร่วมกับการปลูกหญ้าแฝกในชุดควบคุม

ครั้งที่/ระยะเวลา บำบัด 4 ชั่วโมง	ร้อยละการบำบัด				
	สีของน้ำ	บีโอดี	ซีโอดี	ทีเคเอ็น	ออร์โธฟอสเฟต
1	55.53	34.38	45.45	9.87	81.36
2	62.11	43.75	45.45	17.76	84.75
3	68.95	49.22	54.55	33.55	88.95
4	75.79	67.97	63.64	41.45	91.67
5	70.26	75.00	63.64	47.36	88.50
6	64.74	78.13	68.18	53.29	86.51
7	62.63	73.44	68.18	45.39	83.79
8	58.42	67.19	54.55	39.47	79.54

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวณภัทรวรรณ ตั้งเดิมทรัพย์
เกิดวันที่	7 พฤษภาคม 2533
สถานที่เกิด	เขตพญาไท จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ.(เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-