



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดน้ำเสียโรงงานผักกาดดองโดยใช้หินปูนลดความเป็นกรดร่วมกับระบบหญ้ากรอง
น้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย
อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

Pickled Green Mustard Factory Wastewater Treatment by Deacidification Using Limestone
in Combination with Grass Filtration System and Constructed Wetland of The King's
Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project

نامผู้วิจัย นางสาวพัชรณัฐ ชูดวงแก้ว

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงอิ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดน้ำเสียโรงงานผักกาดดองโดยใช้หินปูนลดความเป็นกรดร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสีย
และพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย

อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

Pickled Green Mustard Factory Wastewater Treatment by Deacidification Using Limestone in
Combination with Grass Filtration System and Constructed Wetland of The King's Royally
Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project

โดย

นางสาวพัชรณัฐ ชูดวงแก้ว

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

พัชรณัฐ ชูดวงแก้ว 2557: การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟักกาดองโดยใช้หินปูนลดความเป็นกรดร่วมกับระบบหมุนำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ศุภณัฐา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. 100 หน้า

ฟักกาดองเป็นผลิตภัณฑ์จากการถนอมอาหารด้วย กรรมวิธีการหมัก โดยวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้แก่ ฟักกาดเขียว น้ำตาล และเกลือ ดังนั้นปัญหาสำคัญในด้านสิ่งแวดล้อม คือ น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตฟักกาดองมีปริมาณสารอินทรีย์และความเป็นกรดสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเป็นกรด ในน้ำเสียจากโรงงานฟักกาดอง งด้วยหินปูน และลดปริมาณสารอินทรีย์ด้วย ระบบบำบัด หมุนำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ ผลการทดลองพบว่า การแข่งขันหินปูน 60 กิโลกรัมในน้ำเสีย 60 ลิตร นาน 9 วัน มีประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรดทำให้พีเอชเท่ากับ 6.7 ผลการทดลองแบบเบดซ์ พบ ว่าปริมาณถ่านกะลามะพร้าว 12 กรัม ค่อน้ำเสีย 50 มิลลิลิตร ระยะเวลาดำรง 5 วัน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี (70.80%) ความขุ่น (78.28%) และซีไอดี (70.00%) สูงที่สุด รูปแบบการดูดซับสอดคล้องกับ ทั้งไอโซเทอร์มทั้งของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วน โดยน้ำหนัก ของถ่านกะลา มะพร้าว ผสมกับดิน ที่เหมาะสมคือ 1:10 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง ทำโดยบรรจุวัสดุเพาะปลูก และบำบัดน้ำเสียเลียนแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย และระบบ พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พบว่าระบบหมุนำกรองน้ำเสียให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี (71.19%) ความขุ่น (66.14%) และซีไอดี (85.00%) ดีกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ดังนั้น จึงทำการทดลองด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กเลียนแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสียโดยเปรียบเทียบวัสดุเพาะปลูกระหว่างดินกับถ่านกะลามะพร้าวผสมดินและปลูกต้นกกกลมและธูปฤาษี พบว่าถ่านกะลามะพร้าวผสมดินร่วมกับการปลูกต้นธูปฤาษีมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีให้ร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี เท่ากับ 97.92, 91.79 และ 91.25 ตามลำดับ

Patcharanut Chudongkaew 2014: Pickled Green Mustard Factory Wastewater Treatment by Deacidification Using Limestone in Combination with Grass Filtration System and Constructed Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 100 pages.

Pickled green mustard products are food preservation by fermentation process. The main raw materials in production process were green mustard, sugar and salt. Therefore, important problem for environment was wastewater from production processes that had high amount organic content and acidity. This research aims to reduce acidity of pickled green mustard factory wastewater by limestone and reduce organic content by grass filtration system and constructed wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project with using coconut shell charcoal as adsorbent. The results were found that soaking limestone 60 kg into wastewater 60 L for 9 days that effective in reducing acidity to pH 6.7. From batch experiments that the highest removal efficiency percentage of color (70.80%) turbidity (78.28%) and COD (70.00%) were achieved from coconut shell carbon 12g per 50 mL of wastewater and contact time 5 days. The adsorption model was conformed to both Langmuir and Freundlich isotherm. Furthermore, it was found that the suitable ratio by weight of coconut shell carbon to soil was 1:10. The continuous flow experiments were investigated by packing growing materials and wastewater treatment similar to the grass filtration and the constructed wetland system. The results were revealed that the grass filtration system gave the removal efficiency percentage of color (71.19%) turbidity (66.14%) and COD (85.00%) better than the constructed wetland. Therefore, the filtrated lysimeter techniques experiments by simulating the grass filtration system were carried out by comparing growing material between soil and coconut shell charcoal mixing with soil and growing *Cyperus corymbosus* Rottb. and *Typha angustifolia* Linn. It was found that coconut shell charcoal mixing with soil and growing *Typha angustifolia* Linn had the good removal efficiency percentage of color, turbidity and COD at 97.92, 91.79 and 91.25 respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะ สิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและ
คำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจาก
พระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์
สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบ คุณ เพื่อนๆนิสิตปริญญาโท คณะ สิ่งแวดล้อม รุ่น 35 ที่ให้ความช่วยเหลือ
ทั้งกำลังใจและกำลังใจตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวชูดวงแก้ว ที่คอยเป็นกำลังใจใน
การศึกษาเล่าเรียน รวมทั้งได้เมตตาอบรม สั่งสอน และคอยให้ความรู้ ตลอดจนสนับสนุน
ทุนการศึกษาจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

พัชรณัฐ ชูดวงแก้ว
เมษายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	52
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
สรุป	79
ข้อเสนอแนะ	80
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	84
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	100

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตผักดองที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม	10
2	สมบัติทางกายภาพและความร้อนของผงดำนกะหล่ำมะพร้าว	33
3	บทบาทส่วนต่างๆของพืชไผ่พันธุ์น้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์	36
4	การเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำโรงงานผักกาดดองกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	53
5	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดควบคุม	77
6	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบหมุนเวียนน้ำเสีย ด้วยกกกลมและรูปฤาษี	78
ตารางผนวกที่		
1	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณผงดำนกะหล่ำมะพร้าว ที่ เหมาะสม	85
2	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับปริมาณผงดำนกะหล่ำมะพร้าวที่ เหมาะสม	86
3	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับปริมาณผงดำนกะหล่ำมะพร้าวที่ เหมาะสม	87
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	87
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	88
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)	88
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของผงดำนกะหล่ำมะพร้าวผสมดินใน อัตราส่วนต่างๆ	89
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น ของผงดำนกะหล่ำมะพร้าวผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ	89
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี ของผงดำนกะหล่ำมะพร้าวผสมดินใน อัตราส่วนต่างๆ	90
10	ไอโซเทอร์มการดูดซับของผงดำนกะหล่ำมะพร้าว	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์	91
12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหล ผ่านคอลัมน์	91
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์	92
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ทุกสัปดาห์	92
15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหล ผ่านคอลัมน์ทุกสัปดาห์	93
16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่าน คอลัมน์ทุกสัปดาห์	93
17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับ ดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	94
18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าว ผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	94
19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสม กับดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	95
20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ ปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	95
21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ ปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	96
22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์ กับการใช้ดินเพียงอย่างเดียว ร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม) ทุกสัปดาห์	96
23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการ ปลูกพืช (รูปถ่าย) ทุกสัปดาห์	97

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าว ร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์	97
25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าว ร่วมกับการปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์	98
26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ ปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์	98
27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับ การปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์	99
28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการ ปลูกพืช (ธูปฤาษี) ทุกสัปดาห์	99

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การหมักผักกาดดอง	8
2 กระบวนการผลิตผักกาดดอง	9
3 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	15
4 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	15
5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	17
6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	18
7 ดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	19
8 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	19
9 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	22
10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	25
11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	26
12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q$ และ $\log C$	27
13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช	28
14 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	29
15 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	29
16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	30
17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	31
18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	32
19 ถ่านกะลามะพร้าว	33
20 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	38
21 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชกรองและหญ้ากรอง	39
22 การศึกษาปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด	48
23 การศึกษาปริมาณดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด	49
24 คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุปลูกสำหรับการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง	49
25 การทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับการปลูกต้นกกกลมและรูปถ่าย	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
26 กราฟมาตรฐานสี่แพลตฟอร์ม-โคบอลต์	52
27 ระยะเวลาการปรับสภาพความเป็นกรดด้วยหินปูนกับพีเอช	54
28 จำนวนครั้งการปรับสภาพลดความเป็นกรดด้วยหินปูน (ครั้งที่)	55
29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีกับปริมาณถ่าน กะลามะพร้าว	56
30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีกับระยะเวลาการ สัมผัส (ชั่วโมง)	57
31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดีกับระยะเวลาการ สัมผัส (วัน)	58
32 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว	59
33 ไอโซเทอร์มฟรุนดิช ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว	59
34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดิน(กรัม)กับร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี	60
35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดี กับอัตราส่วนโดย น้ำหนักของถ่านกะลามะพร้าวต่อดิน	61
36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดีกับครั้งที่การบำบัด น้ำเสียแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	62
37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดีกับครั้งที่การบำบัด น้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสีย	63
38 การทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็กด้วยกกกลมแข่งน้ำเสีย	64
39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีไอดีแบบระบบหมุนำ กรองน้ำเสียที่ปลูกต้นกกกลม	65
40 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดสี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรอง ในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ ดินเพียงอย่างเดียว	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
41 ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละการบำบัด สีกับครั้งที่การบำบัดน้ำเสีย ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	66
42 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดความขุ่นกับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	67
43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	67
44 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดซีโอไซด์กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	68
45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอไซด์กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	68
46 รูปถ่ายแข่งในน้ำเสีย	69
47 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอไซด์กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหฐากรองน้ำเสียที่ปลูกต้นรูปถ่าย	70
48 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดสี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกรูปถ่ายโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	71
49 ความสัมพันธ์ระหว่าง ร้อยละการบำบัด สีกับครั้งที่การบำบัดน้ำเสีย ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกรูปถ่ายโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
50 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดความชุ่มชื้นกับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินกับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	72
51 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	72
52 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดชีโอดีกับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	73
53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว	73
54 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมักกรองน้ำเสียที่ปลูกกกกล่มและจุลินทรีย์	74
55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมักกรองน้ำเสียที่ปลูกกกกล่มและจุลินทรีย์	75
56 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมักกรองน้ำเสียที่ปลูกกกกล่มและจุลินทรีย์	76

การบำบัดน้ำเสียโรงงานผักกาดทองโดยใช้หินปูนลดความเป็นกรดร่วมกับระบบหญ้า
กรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลม
ผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

**Pickled Green Mustard Factory Wastewater Treatment by Deacidification Using
Limestone in Combination with Grass Filtration System and Constructed
Wetland of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental
Research and Development Project**

คำนำ

อุตสาหกรรมผลิตผักกาดทองนับวันจะมีการพัฒนาและ ขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งใน
ภาคอุตสาหกรรมขนาดใหญ่และอุตสาหกรรมในครัวเรือน ซึ่งผลที่ตามมาย่อมก่อให้เกิดปัญหาน้ำ
เสียจากกระบวนการผลิตมากขึ้นเช่นกัน น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตผักกาดทอง เป็นน้ำที่มีค่า
COD สูง ($> 800 \text{ mg/L}$) เนื่องจากในกระบวนการผลิตมีการใช้ ผักกาดเขียว น้ำตาล และเกลือใน
กระบวนการหมัก ซึ่ง ของเสียที่มาจากกระบวนการผลิตมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่สูงมีจุลินทรีย์ใน
กระบวนการหมักสร้างสารประกอบจำพวกกรด แอลกอฮอล์และ สารอื่นๆเกิดขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้มี
ฤทธิ์ในการยับยั้งหรือชะลอการเจริญของจุลินทรีย์อื่น ๆที่เป็นสาเหตุการเน่าเสียของผักผลไม้
ส่งผลให้ปริมาณของน้ำเสียมี กลิ่นที่เหม็น สีขุ่น น้ำขุ่น ความเป็นกรด สูง และค่า CODสูงและใน
อุตสาหกรรมครัวเรือนยังไม่มี การบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง เมื่อปล่อย น้ำเสีย ออกสู่แหล่งน้ำ
ธรรมชาติจะก่อให้เกิดผลด้านลบต่อสิ่งแวดล้อมและจิตวิทยาของชุมชนใกล้เคียงพื้นที่โรงงานได้
โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรมในครัวเรือนซึ่งเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กทำให้ไม่มีการบำบัดน้ำ
เสียก่อนปล่อยทิ้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้คิดนำวิธีการบำบัดที่ทำได้ง่ายและอาศัยวิถีธรรมชาติในการช่วย
ฟื้นฟูธรรมชาติ

เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบพืชกรองน้ำเสีย เป็นวิธีการ
บำบัดวิธีหนึ่งที่ดีเป็นวิธีที่ใช้ธรรมชาติช่วยฟื้นฟูธรรมชาติคือ พื้นที่ชุ่มน้ำ เทียมของโครงการ

ศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ซึ่งผู้วิจัยได้คิดจะนำวิธีดังกล่าวมาใช้ โดยลดความเป็นกรด และความขุ่น ของน้ำเสีย ด้วยหินปูน และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด กลิ่นเหม็น และCOD โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับในวัสดุปลูกผสมร่วมกับดิน สำหรับต้นพืชที่ปลูกบนพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมในงานวิจัยคือต้นกกกลมและรูปฤาษี ซึ่งเป็นพืชที่หาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในการช่วยบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งวัสดุที่นำมาบำบัดน้ำเสียสามารถหาได้ทั่วไปในท้องถิ่นนำมาใช้ร่วม กับเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพี นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบพืชกรองน้ำเสีย จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากยิ่งขึ้น



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้นิพจน์ลดความเป็นกรดของน้ำเสียโรงงานฝักกาดอง
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฝักกาดองดี วัยหินปูน ร่วมกับระบบหมักกรองน้ำเสีย และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวเป็นตัวดูดซับ



การตรวจเอกสาร

1. ผักกาดดอง

1.1 นิยามและความหมายของผักกาดดอง

ผักกาดดอง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำผักกาดเขียวปลีหรือผักกาดชนิดอื่นที่เหมาะสม ทั้งหัวหรือทำเป็นชิ้นตามขนาดที่ต้องการ อาจนำไปแช่ในน้ำปูนใสหรือสารช่วยทำให้กรอบก่อน เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แคลเซียมแล็กเตต นำมาดองในน้ำดอง ในระยะเวลาที่เหมาะสม หรือนำมาดองในน้ำปรุงรสอีกครั้ง การหมักดองผักผลไม้โดยทั่วไปเป็นการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ในผักผลไม้เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผักผลไม้ นั้น เกิดลักษณะทางกายภาพแบบใหม่มีกลิ่นรสที่แปลกไปจากเดิม และทำให้อายุการเก็บรักษาของผักผลไม้หมักดองยาวนานกว่าผักผลไม้สด เนื่องจากจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักสร้างสารประกอบจำพวกกรด แอลกอฮอล์และอื่นๆ ขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้มีฤทธิ์ในการยับยั้งหรือชะลอการเจริญของจุลินทรีย์อื่นที่เป็นสาเหตุการเน่าเสียของผักผลไม้เหล่านั้น

ผักกาดเขียวปลี (Green mustard หรือ Chinese mustard หรือ Leaf mustard) เป็นผักกาดที่อยู่ในตระกูล Cruciferae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica juncea* (L.) นิยมบริโภคสดเนื่องจากมีรสขม และเผ็ด แม้แต่ต้มสุกแล้วก็ยังไม่หายขม แต่จะมีคุณภาพดีหลังจากการนำมาดอง (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2534) การดองผักกาดเขียวปลีจะเป็นการดองแบบ Brined Pickles คือ การดองผักผลไม้ในน้ำเกลือโดยผ่านกระบวนการของการหมักดอง (Fermentation) เป็นเวลาหลายอาทิตย์ การหมักดองมีผลทำให้ลักษณะของผักผลไม้เปลี่ยนแปลงไป เช่น ผักสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลืองและลักษณะของผักจะดูใสเนื้อแน่นมากขึ้น กรอบ อ่อนนุ่ม และมีลักษณะพิเศษอื่น ๆ เฉพาะตัวของผักดอง (มาลี และ ดรณี, ม.ป.พ) ผักกาดเขียวปลีดองนั้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องผ่านกระบวนการหมักซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไม่มีอากาศและใช้สารอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักจะมีอยู่ทั้งในสภาพรีดิคซ์และออกซิไดส์ (ดวงพร, 2542)

1.2 ชนิดของผักดอง

1.2.1 ผักที่ผ่านการดองเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำ (Processed pickles) เป็นการดองที่ต้องใช้ระยะเวลาในการดองหลายสัปดาห์ โดยที่ผักที่ดองได้ยังคง มีความกรอบและมีกลิ่นรสเฉพาะตัว ความเข้มข้นของน้ำเกลือที่ใช้จะน้อยกว่า 12% ส่วนมากจะใช้ที่ระดับประมาณ 4-8 % โดยเป็นความเข้มข้นในระดับที่สูงพอที่จะยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่น และเป็นระดับที่พอเหมาะ ให้จุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดแลคติกเจริญได้ดี แต่ระดับความเข้มข้นของน้ำเกลือที่เหมาะสมที่สุด ในการดองจะขึ้นอยู่กับชนิดของผักและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นหลัก การดองด้วยวิธีนี้จะมีเชื้อจุลินทรีย์พวกที่ใช้ออกซิเจนในการ เจริญทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลที่อยู่ในผักหรือเติมลงไปให้เป็นกรดแลคติก วิธีการดองแบบนี้จะใช้ได้กับผักหลายชนิด เช่น แดงกวา (Pickles หรือ Saltstock) กะหล่ำปลี (Sauerkraut) ผักกาดดอง กิมจิ เป็นต้น อาหารพวกนี้จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลง ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) เพียงอย่างเดียว หรือเปลี่ยนแปลงด้วยเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติกและเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่น ๆ

1.2.2 การหมักดองโดยไม่มีเชื้อจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้อง (Unfermented pickle) ใช้กับการหมักผักที่มีความเป็นกรดสูง เช่น แดงกวา ดอกกะหล่ำ หัวหอม แครอท หรือพริกโดยจะใช้เกลือที่มีความเข้มข้นสูงถึง 20-25% ในการหมักการหมักด้วยวิธีนี้มีจุดประสงค์เพื่อเก็บรักษาผักและผลไม้ในน้ำเกลือมากกว่า หรือเป็น ขั้นตอนหนึ่งในการขจัดรสขมและฝาดในการทำผลิตภัณฑ์ผักอบแห้ง เช่น สมอ

1.2.3 การดองในน้ำส้มสายชู วิธีการดองแบบนี้อาจ ใช้ร่วมกับการดองด้วยเกลือทั้งที่ใช้และไม่ใช้เชื้อจุลินทรีย์ และอาจไม่ผ่านกระบวนการ หมักเลยก็ได้ แต่เป็นการแช่ผักในน้ำส้มสายชูที่ปรุงแต่งรสชาติแล้วด้วยเครื่องเทศ น้ำตาล และเกลือ นับเป็นการดองที่ทำให้ง่ายที่สุด สามารถทำให้เสร็จได้ภายใน 1-2 วัน สิ่งที่สำคัญ ของการดองด้วยวิธีนี้คือ การเลือกใช้น้ำส้มสายชูที่มีคุณภาพดี ใส ไม่มีตะกอนและมีความ เข้มข้นของกรดอะซิติก 5 % ไม่ควรใช้น้ำส้มสายชูที่ผลิตเองในครัวเรือน เนื่องจากมักทำให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ดองเสร็จแล้วคล้ำลง

1.2.4 การดองในน้ำมัน ในบางประเทศนิยม เช่น อินเดีย อังกฤษ เป็นต้น การดองในน้ำมัน โดยใช้ turnip กะหล่ำดอก หรือพืชอื่นๆ ที่ผ่านการ ดองในน้ำมันหรือไม่ก็ได้ โดยการคลุกกับเกลือและเครื่องเทศ บรรจุขวด แล้ว ตากแดดไว้ประมาณ 4-8 วัน จากนั้นจึงเติมน้ำมันลงไปจนกระทั่งพสมกันดี

1.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการดอง

กระบวนการดองที่ต้องมี การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในผักผลไม้ให้เป็นกรดแลคติกจะเป็นแบคทีเรียที่อยู่ใน Family Lactobacteriaceae ซึ่งใน Family นี้จะมีอยู่ 5 Genus ได้แก่

1.3.1 Streptococcus

1.3.2 Pediococcus

1.3.3 Diplococcus

1.3.4 Leuconostoc

1.3.5 Lactobacillus

แบคทีเรียเหล่านี้เป็นแกรมบวก สร้างสปอร์ไม่ได้ ต้องการวิตามินบีรวมและกรดอะมิโนในการเจริญ ไม่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีปริมาณกรดอะซิติกเข้มข้นเกินกว่า 3-6% และหากต้องการให้แบคทีเรียในกลุ่มนี้ทำให้กระบวนการหมักได้รวดเร็วขึ้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ สามารถแบ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

- Homofermentative เป็นกลุ่มที่ใช้น้ำตาล 85-95% ในการผลิตกรดแลคติกเพียงอย่างเดียว ส่วนที่เหลือจะนำไปสร้างพลังงาน และสารประกอบที่ระเหยได้ (Volatile Compound) ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Streptococcus Faecalis Pediococcus Cerevisiae

- Hermentative เป็นกลุ่มที่ใช้น้ำตาลประมาณ 50 % ในการผลิตกรดแลคติกอีก 25 % ใช้ในการผลิตกรดอะซิติกและเอทานอล ส่วนที่เหลือจะใช้ผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Leuconostoc Mesenteroides , Leuconostoc Fermenti

อาหารหมักดองจะมีกรดเป็นตัวควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการ ปริมาณกรดในการเจริญที่แตกต่างกัน สูดท้ายผลิตภัณฑ์อาหารหมักดองที่ได้จะมีเฉพาะแบคทีเรียชนิดที่ทนกรดสูงเท่านั้น จากนั้นสภาวะที่เป็นกรดที่สูงมากขึ้น จะเป็นตัวทำลายตัวเองในภายหลัง จึงมียีสต์และราที่ทนกรดเจริญต่อไป โดยรา จะสามารถใช้กรดได้ ส่วนยีสต์จะผลิตสารที่เป็นด่างทำให้สภาวะ ความเป็นกรดลดลงจนถึงระดับที่แบคทีเรียทำงานต่อไปได้

1.4 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีในกระบวนการดอง

อาหารหมักดองจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ลักษณะ เนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และกลิ่นรสของอาหารเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ผู้บริโภค ยอมรับได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์จะใช้เอนไซม์ที่อยู่ในเซลล์ตัวเองย่อยสลายสารอาหารต่างๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จนได้เป็นสารประกอบที่รวมกัน เป็นกลิ่นรสที่ดีและสร้างความแปลกใหม่ให้กับอาหาร

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารที่เกิดจากจุลินทรีย์ในกระบวนการหมัก

น้ำตาล + Streptococcus spp. กรดแลกติก (นมเปรี้ยว, ผักผลไม้ดอง)

น้ำตาล + Saccharomyces spp. (ยีสต์) อัลกอฮอล์ + แก๊ส (ไวน์)

อัลกอฮอล์ + ออกซิเจน + Acetobacter spp. กรดน้ำส้ม + น้ำ (น้ำส้มสายชู)

ปัจจัยที่ช่วยในการหมักดอง ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ ปริมาณเกลือ และเชื้อตั้งต้น ซึ่งเมื่อปัจจัย เหล่านี้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้เต็มที่ และผลิตเอนไซม์ในปริมาณที่พอเพียงใน การทำปฏิกิริยาเคมีกับอาหาร ทำให้การดองดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว จนได้ผลิตภัณฑ์อาหารหมักดองที่มีคุณภาพ เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค

1.5 กระบวนการหมักดอง

โดยธรรมชาติแล้วการหมักเกิดขึ้นเมื่อสภาพแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวอาศัยพื้นฐานของการย่อยสลายสารอินทรีย์นั่นเอง และในที่สุดสารอินทรีย์นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแร่ธาตุลงไปในดิน หรือกระจายอยู่อากาศต่อไป การหมักโดยธรรมชาติก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อมนุษยชาติ นับตั้งแต่โบราณกาลจวบจนปัจจุบันเพราะการหมักเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ส่วนประกอบของอาหารให้อยู่ในสภาพที่ยอมรับกันได้ เช่น การเปลี่ยนแปลงผลไม้และน้ำผลไม้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีแอลกอฮอล์เป็นองค์ประกอบหรือการเกิดกรดขึ้นในนํ้านมซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากนํ้านมขึ้นมาเป็นดั้น (วรารุณี, 2538) การดองเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ใช้กันมานานเพื่อชะลอการเน่าเสียของผัก และเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้หลายเดือนโดยไม่ต้องอาศัยห้อง

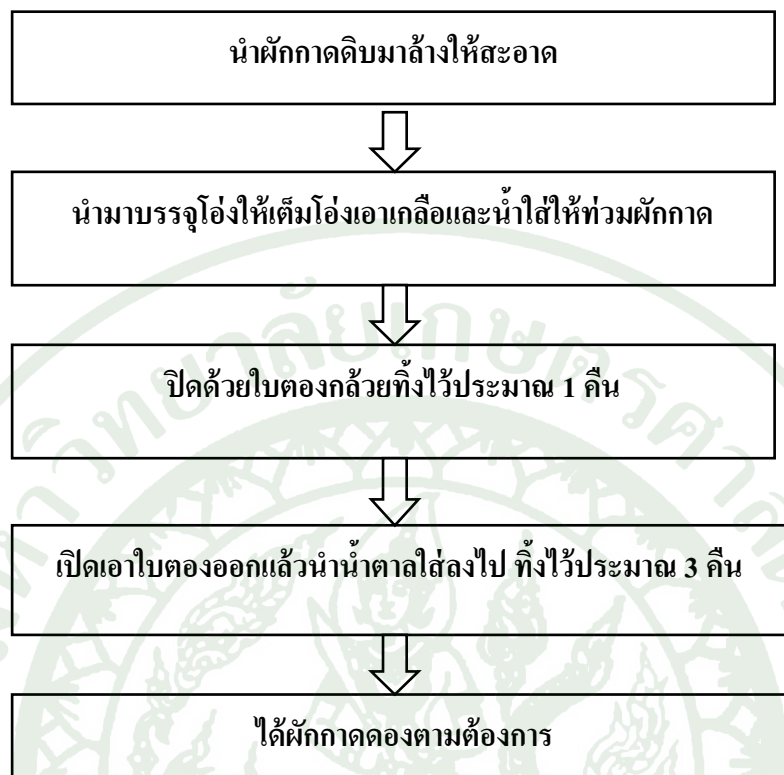
เย็น จึงลงทุนน้อย ใช้เครื่องจักรน้อย และไม่ต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิต กระบวนการ
 ดองเริ่มมีขึ้นจากความต้องการยืดอายุการเก็บอาหารเพื่อใช้ในระหว่างที่ไม่ใช่ฤดูกาลของผลิตผล
 นั้นๆ หรือเพื่อไว้บริโภคในระหว่างเดินทางไกลโดยเฉพาะการเดินทางเรือ นอกจากเหตุผลในการยืด
 อายุแล้วการดองยังทำให้เกิดลักษณะจากผลการศึกษาของ Hawer (1993) พบว่าหลังจากแช่ผักใน
 น้ำเกลือนาน 2 สัปดาห์ผักจะสูญเสียน้ำหนัก 44.62 เปอร์เซ็นต์ และหลังจาก 3 สัปดาห์ น้ำเกลือที่มี
 ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเข้มข้นเป็น 3.46, 7.17, 9.04, 10.59 และ
 14.82 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ หลังจากล้างเกลือออก 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเกลือมีค่า 2.72, 4.67,
 5.38, 6.84 และ 9.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในระหว่างการเก็บความเป็นกรด-ด่างของผักใน
 น้ำเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำจะลดลงรวดเร็วมาก และจากผลทั้งหมดผู้ศึกษาสรุปว่าความเข้มข้นของ
 เกลือที่เหมาะสมในการแช่ผักคือ 5 หรือ 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 1 การหมักผักกาดดอง

จากผลการศึกษาของ Hawer (1993) พบว่า หลังจากแช่ผักในน้ำเกลือนาน 2 สัปดาห์ผักจะ
 สูญเสียน้ำหนัก 44.62 เปอร์เซ็นต์ และหลังจาก 3 สัปดาห์ น้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20
 และ 30 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเข้มข้นเป็น 3.46, 7.17, 9.04, 10.59 และ 14.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ
 หลังจากล้างเกลือออก 4 ชั่วโมง ความเข้มข้นของเกลือมีค่า 2.72, 4.67, 5.38, 6.84 และ 9.43
 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และในระหว่างการเก็บความเป็นกรด-ด่างของผักในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น
 ต่ำจะลดลงรวดเร็วมาก และจากผลทั้งหมดผู้ศึกษา สรุปว่า ความเข้มข้นของเกลือที่เหมาะสมคือ 5
 หรือ 10%

1.5.1 กระบวนการผลิตผักกาดดอง



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตผักกาดดอง

2. ผลพินิจที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตผักกาดดอง

2.1 น้ำเสีย

โรงงานผักกาดดอง เป็นโรงงานหนึ่งที่เกิดน้ำเสียใน ปริมาณมาก พารามิเตอร์ คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากกระบวนการผลิต ได้แก่ ค่า pH ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ค่าปริมาณสาร ที่ละลายได้ และค่าปริมาณสารแขวนลอย คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จะ แตกต่างกันไปตามลักษณะของการผลิต น้ำเสียจากโรงงานผักกาดดอง มีเกลือแคง (NaCl) อยู่มาก เมื่อทิ้งลงน้ำแล้ว น้ำไม่เน่า แต่น้ำจะมีรสเค็ม กลายเป็นน้ำกร่อย ทำให้ปลาตายและพืชน้ำจืดตายได้ น้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจำเป็น ต้องผ่านกระบวนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ตัวอย่างคุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิต ผักกาดดองที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม แสดงดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำเสียในกระบวนการผลิตผักดองที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนการผลิต	กิจกรรม	ปัญหาสิ่งแวดล้อม
1. การเตรียมวัตถุดิบ	- การล้างทำความสะอาดวัตถุดิบ - การปอกเปลือกและตากแต่ง	- ปริมาณน้ำใช้มาก - เศษเปลือกผลไม้
2. การปรับปรุงรสชาติและ คุณลักษณะผลไม้ก่อน ทำให้แห้ง	- การแช่หรือล้างด้วยน้ำเกลือ / น้ำปูน - การต้ม / ลวก - การทำให้เย็น	- น้ำเสียมีปริมาณบีโอดีสูง - ใช้พลังงานมาก (ก๊าซหุงต้ม) - น้ำเสียมีปริมาณบีโอดีสูง
3. การแปรรูปผลไม้ด้วย การทำให้แห้ง	- การกวนผลไม้ (กรณีผลไม้กวน)	- ใช้พลังงานมาก (ก๊าซหุงต้ม)
4. การแปรรูปผลไม้ด้วย การดอง	- การดอง - การล้าง	- น้ำเสียมีปริมาณบีโอดีสูง - ปริมาณน้ำใช้มาก - น้ำเสียมีปริมาณบีโอดีสูง
5. การบรรจุและจำหน่าย	- การบรรจุ	- ผลิตภัณฑ์หกหล่น - น้ำปรุงรสหกหล่น
6. การล้างทำความสะอาด อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตและ สถานที่ผลิต	- การล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ ที่ใช้ผลิตและสถานที่ผลิต	- ปริมาณน้ำใช้มาก - น้ำเสียมีปริมาณบีโอดีมาก

2.2 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD)

การวิเคราะห์ค่าของ COD ใช้สำหรับประมาณปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่หายไป โดยที่สารอินทรีย์ในตัวอย่างน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์โดยปริมาณที่มากเกินพอของสารเคมีประเภท ออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง ที่นิยมใช้คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ในสภาพของความ เป็นกรด ในอุณหภูมิที่สูง โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Silver Sulfate โดยทั่วไปแล้วค่าของ COD จะมีค่า

มากกว่าค่าของ BOD_5 เสมอและใช้เวลาในการหาประมาณ 3 ชม. ซึ่งรวดเร็วกว่าการหาค่า BOD และปริมาณของสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางเคมีจะมีปริมาณมากกว่าสารที่ถูกออกซิไดซ์โดยวิธีทางชีวภาพ หรือกล่าวได้ว่า 20 ปริมาณสารอินทรีย์ที่วัดในเทอมของ COD เป็นการวัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (ทั้งที่ย่อยสลายได้ ย่อยสลายได้ช้า และย่อยสลายไม่ได้ด้วยจุลินทรีย์) เช่น กลูโคส ลิกนิน และเซลลูโลส น้ำมัน ไขมันจากเนย พืชและสัตว์ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมนอกจากนี้ยังมี สารอนินทรีย์อื่น ๆ เช่น เฟอร์รัส ไอออน (Fe^{2+}), แมงกานีส(II)ไอออน (Mn^{2+}), คลอไรด์ไอออน (Cl^-), ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) สารประกอบในรูปคอลลอยด์ที่แขวนลอยและสารละลายในน้ำเสียของ สารประกอบเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับ $K_2Cr_2O_7$ ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ในขณะที่ BOD เป็นการวัดสารอินทรีย์เฉพาะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้เท่านั้น การที่ค่า COD สูงกว่า BOD เนื่องจาก สารอินทรีย์คาร์บอนถูกเปลี่ยนไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยไม่ต้องอาศัยการดูดซึมทางชีวโดยจุลินทรีย์ เช่น เซลลูโลส และลิกนินจะถูกออกซิไดส์อย่างแรง และถ้ามีสารที่ไม่สามารถถูกย่อยทางชีวอยู่ด้วย เช่น เซลลูโลส จะทำให้ค่า COD ยิ่งสูงกว่าค่า BOD มากขึ้น

3. การลดความเป็นกรดของน้ำเสียจากโรงงานผักกาดทอง

3.1 การใช้หินปูนในการลดความเป็นกรดของน้ำเสีย

หินปูนเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก การนำหินปูนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ไม่จำเป็นต้องทำให้หินปูนอยู่ในรูปผง หรือในรูปของสารละลายก่อน ในกรณีที่ใส่หินปูนมากเกินไปหินปูนจะทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์ทำให้น้ำ ที่ผ่านการสะเทินแล้วมีค่า pH ไม่เกิน 8 ดังนั้น การใช้หินปูนมากเกินไปย่อมไม่มีผลเสียต่อการบำบัดน้ำเสีย

แต่การใช้หินปูนในการบำบัดน้ำเสียสภาพกรด ไม่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของ H_2SO_4 มากกว่า 6,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะจะเกิดสาร $CaSO_4$ มากเกินควรซึ่งไปปกคลุมบริเวณผิวหินปูนจนหมดประสิทธิภาพในการปรับ pH และพวกน้ำเสียที่มีอลูมิเนียม (Al^{+3}) หรือเหล็ก (Fe^{+3}) มากจะเกิดปัญหาเช่นเดียวกัน คือเกิดตะกอนเคมีไฮดรอกไซด์ของพวก Al หรือ Fe ปกคลุมก้อนหินปูน

การบำบัดน้ำเสียด้วยหินปูนเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เฉพาะแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูนเท่านั้น เพราะฉะนั้นเปอร์เซ็นต์ของแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูน จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถ

และอายุการใช้งานของหินปูนในการบำบัดน้ำเสีย จากการวิจัยและการศึกษาพบว่า หินปูนสามารถลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำได้ ลดสภาวะความเป็นกรดต่าง โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลง pH ของน้ำทิ้ง โดยใช้หินปูน หรือ CaCO_3 จะทำให้ความสามารถของการละลายของโลหะหนักลดลง ตกตะกอนแยกจากสารละลายได้ คำกล่าวคือ เมื่อสารละลายที่มีสมบัติเป็นกรด ($\text{pH} < 7$) ไหลผ่านหินปูน CaCO_3 จะเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



โดย CaO จะเกิดปฏิกิริยากับน้ำในสารละลาย ดังสมการ



Ca(OH)_2 ที่เกิดขึ้นจะแตกตัวให้ OH^- ไอออนซึ่งจะทำให้ pH ของสารละลายที่เป็นกรดถูกสะเทิน (Neutralized) ทำให้ pH สูงขึ้น ไอออนของโลหะหลายชนิด เช่น ตะกั่ว (Pb), ปรอท (Hg), แคดเมียม (Cd), นิกเกิล (Ni) และทองแดง (Cu) มีความสามารถในการละลายลดลง จึงตกตะกอนแยกจากสารละลาย สารละลายที่ไหลผ่าน CaCO_3 ข้างต้นจะมี pH ที่ถูกสะเทิน ใกล้เคียงกับแหล่งน้ำธรรมชาติ และมีปริมาณการปนเปื้อนของโลหะหนักที่เป็นพิษลดลง เป็นการช่วยลดปริมาณสารที่ก่อมลพิษก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำ

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูน

ในการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูนนั้น มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการสะเทิน เช่น เปอเซนต์ของแคลเซียมคาร์บอเนตในหินปูน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถและอายุการใช้งานของ ระบบสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูน พื้นที่ผิวสัมผัสของ หินปูน เป็นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูน ลักษณะของน้ำเสียกรดเป็นตัวกำหนดถึงความสามารถในการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูน อัตราเร็วของปฏิกิริยา ตลอดจนคุณภาพน้ำที่ผ่านการสะเทินแล้ว และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตรา เร็วของปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นปฏิกิริยาการสะเทินจะเกิดได้เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการสะเทินน้ำเสียกรดด้วยหินปูน

4. กระบวนการดูดซับ

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

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้ายและการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัด ความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

4.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดย โมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

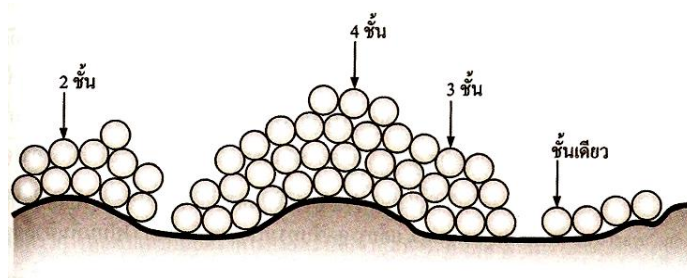
4.1.2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

4.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

4.2 รูปแบบของการดูดซับ

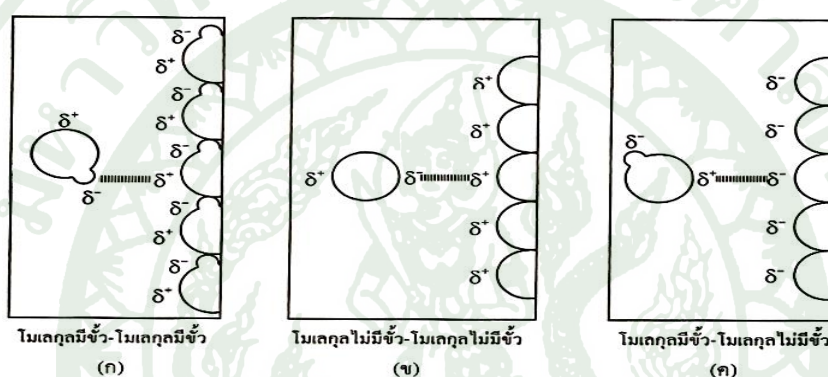
สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

4.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption หรือ Physical Adsorption หรือ Van Der Waals Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล – ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกละลาย และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดูดซับบนชั้น โมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวน ชั้นของโมเลกุลตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกละลายกับตัวถูกละลายด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)



ภาพที่ 4 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และ โมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

4.2.2 การดูดซับทางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือจะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันสร้างพันธะโควาเลนต์ ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึด

เหนียวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับที่มีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวที่ดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือ น้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิตา, 2550)

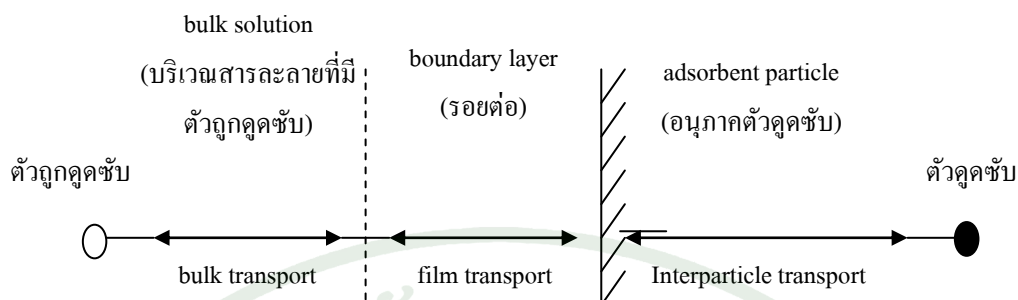
4.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ พื้นในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

4.3.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

4.3.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุล ผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

4.3.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

4.4 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

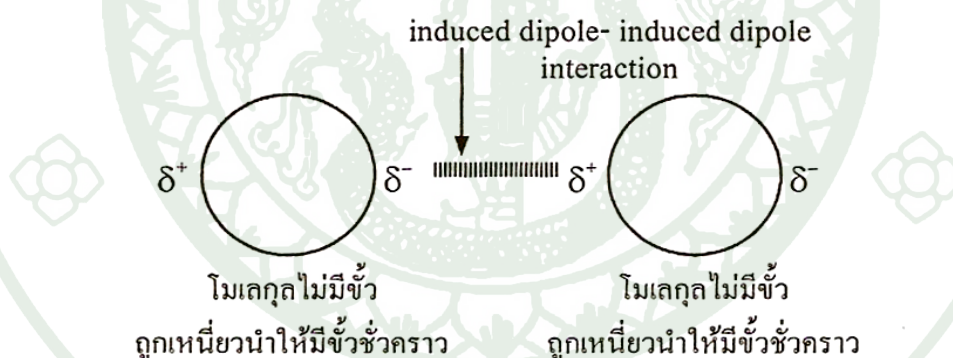
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี ในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

4.4.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โคเวเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

1) แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรง ลอนดอน หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนใน โมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ในขณะที่ใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอ สมมติในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้ว

ชั่วคราว (Induce Dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

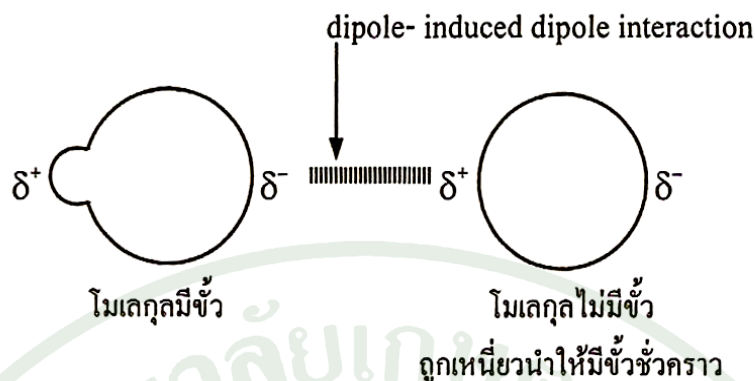
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย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



ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

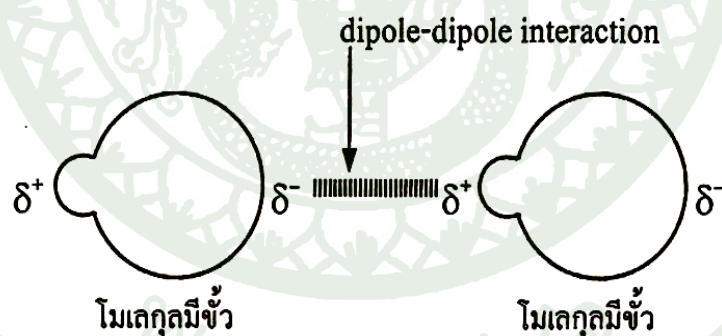
2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ



ภาพที่ 7 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล



ภาพที่ 8 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ในกรณีที่มีโมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์ที่มีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่

มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่ กิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน

แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูลต่อโมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (Desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

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

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบขั้นเดียว ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ จึงไม่เกิดการคาย

4.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.5.1 ความดัน อัตรารวดในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film Diffusion หรือ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความดันของระบบ ถ้าน้ำมีความดันต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความดันสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

4.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น

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

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

4.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวดูดซับในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวดูดซับจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลายในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

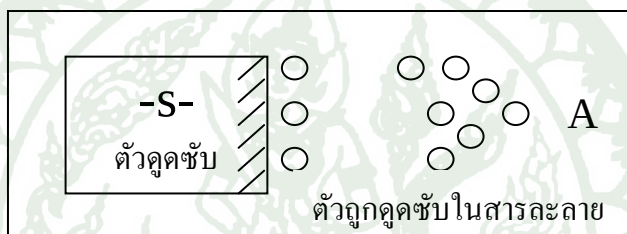
4.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อค่าการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

4.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

4.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับติดผิว และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับติดผิวเลย

4.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

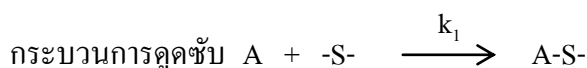
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$(1 - q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือ อยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

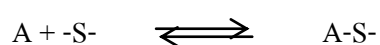
ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



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

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

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

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ บนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับเป็น โมลต่อกิโลกรัม หรือ โมลต่อกรัม

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม กรัม หรือ กิโลกรัม

V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์ เซนติเมตรหรือลิตร

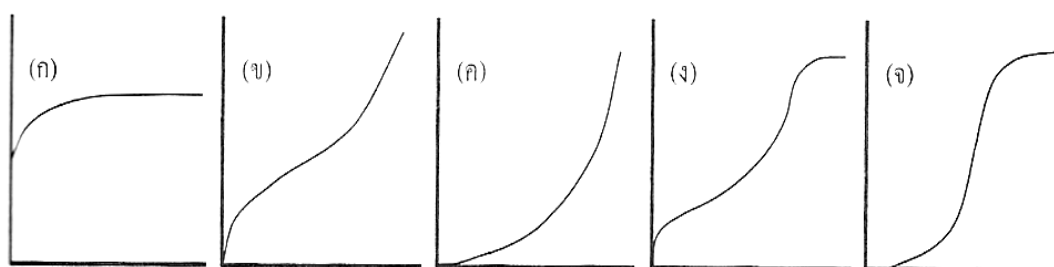
C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลาร์

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นโมลาร์

4.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอนจะให้อารมณ์แบบพื้นฐานของ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

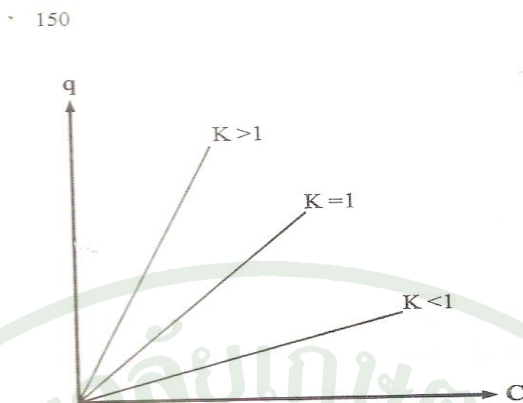
จากภาพที่ 10 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัย แบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

4.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C

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

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิว ตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

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

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

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

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

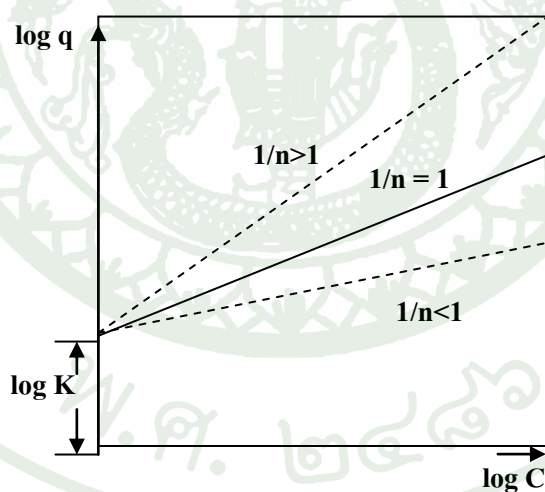
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ
(ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$ คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$
และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log C$

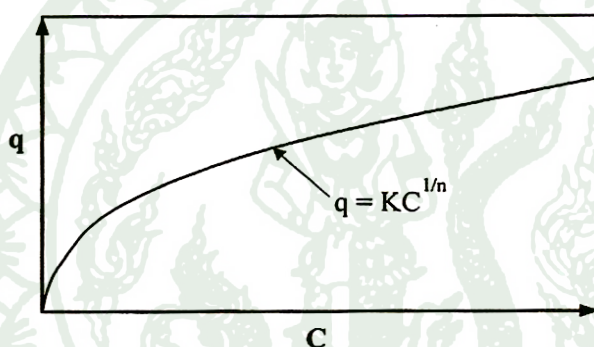
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

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

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

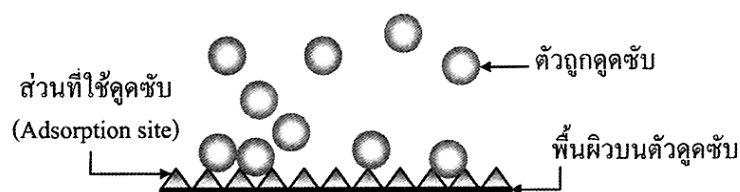
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 13 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรันทิช

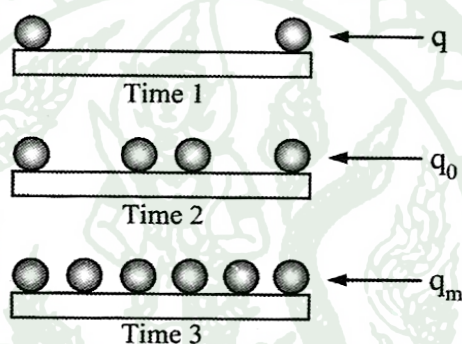
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

4.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)



ภาพที่ 15 การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ แล ะจากสมการที่ (1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแลงเมียร์ จะใช้สมการที่ (1) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย q_m ซึ่งจะได้สมการดังนี้

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

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

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

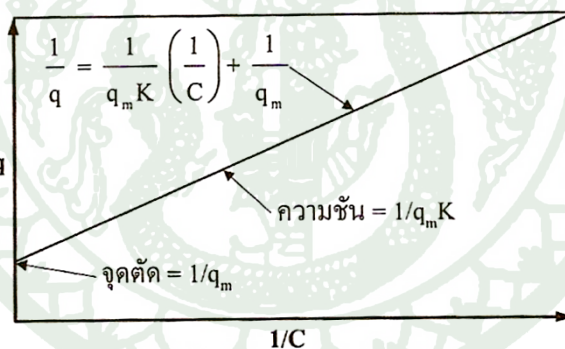
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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

จุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

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

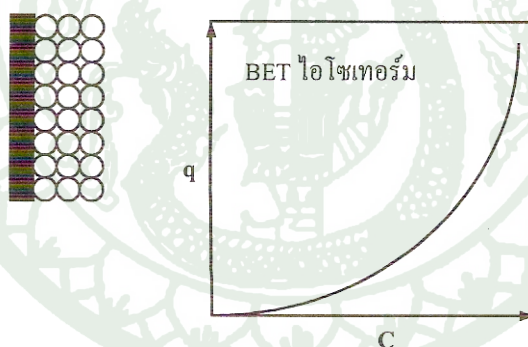
- 1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับ ที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตส์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์
มีรูปแบบสมการดังนี้

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

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



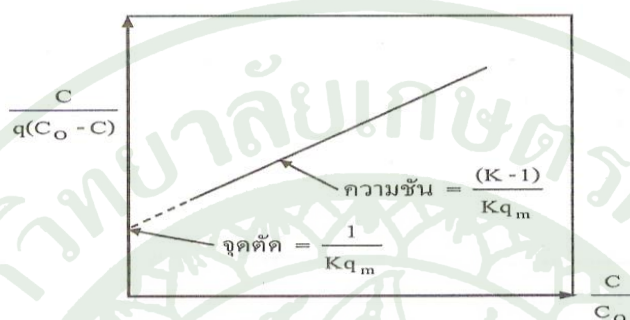
ภาพที่ 17 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบต

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (8) ใหม่จะได้สมการดังนี้

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับ ค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรงมี
ความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพที่ 18 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2550)

5. ถ่านกะลามะพร้าว

กะลามะพร้าวเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นแอคติเวตเตดคาร์บอน กะลามะพร้าวเป็นวัสดุพื้นบ้านที่พบได้ทั่วไป เพราะในประเทศไทยใช้มะพร้าวในการประกอบอาหารเป็นประจำ และจำนวนมาก ทั้งอาหารคาวและอาหารหวาน ประโยชน์ที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน ที่ชาวบ้านนำมาใช้คือ นำมาเป็นเชื้อเพลิงเป็นส่วนใหญ่โดยไม่ทราบถึงคุณค่า โดยเฉพาะนำมาทำแอคติเวตเตดคาร์บอน ดังนั้นการนำถ่านกะลามะพร้าวมาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับวัสดุปลูกจึงมีความเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียแบบเทคโนโลยีอย่างง่าย เพราะมีราคาถูก และเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาทำประโยชน์ (อวยพร, 2531)

5.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกะลามะพร้าว

ถ่านกะลามะพร้าวเป็นถ่านที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน มีลักษณะเป็นเกล็ดเกรด PHO 8x30 (ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for Testing and Material, ASTM) ดังภาพที่ 19 การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 19 ถ่านกะลามะพร้าว

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของผงถ่านกะลามะพร้าว

สมบัติทางกายภาพ	ค่าที่ตรวจวัด
ค่าการกระจายตัวของอนุภาค (ASTM เมช/มิลลิเมตร)	
+8 (2.36 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
8x30 (2.36-0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 90
-30 (0.60 มิลลิเมตร)	มากกว่าร้อยละ 5
ความหนาแน่น	น้อยกว่า 0.5 กรัม/ซีซี
ความชื้น	มากกว่าร้อยละ 8 โดยมวล
ปริมาณเถ้า	มากกว่าร้อยละ 3.5 โดยมวล
พีเอช	9-11
พื้นที่ผิว (จากการคำนวณ)	น้อยกว่า 1,100 ตารางเมตร/กรัม
ไอโอดีน นัมเบอร์ (AWWA B 604)	น้อยกว่า 1,050 มิลลิกรัม/กรัม
ระดับคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (ASTM 3467-88)	น้อยกว่าร้อยละ 50 โดยมวล
ค่าความแข็ง (ASTM 3802-79)	น้อยกว่าร้อยละ 98

ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ถูกใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น การดูดกลิ่น (Deodorization) การดูดสี (Decolourization) การลดสารคลอรีน (Dechlorination) และสารกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นต้น

5.2 การดูดซับด้วยผงถ่าน

การดูดซับด้วยผงถ่าน เป็นกระบวนการที่ใช้ผงถ่านดูดซับสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ เมื่อแยกเอาผงถ่านออกแล้ว จะได้น้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานระบายออกจากโรงงานได้ โดยผงถ่านจะนำมาใช้คล้ายวัสดุกรองในถังกรอง โดยปล่อยให้น้ำเสียที่ต้องการบำบัดไหลผ่านถังกรองถ่านช้า ๆ เพื่อให้เกิดการดูดซับได้เต็มที่ น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะระบายทิ้งหรือนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้ ผงถ่านที่หมดประสิทธิภาพการดูดซับแล้ว สามารถนำกลับมาล้างด้วยสารเคมีเพื่อปรับคืนสภาพ แล้วนำมาใช้ใหม่ได้ทำ ช้า ๆ เช่นนี้ไปจนกว่าผงถ่านนั้นจะหมดสภาพไปจริง ๆ ในกรณีนี้ ใช้ได้กับการดูดซับที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีติดแน่นกับผงถ่าน หากในระหว่างการกรองหรือดูดซับ เกิดปฏิกิริยาเคมีติดแน่นกับผงถ่าน ก็ไม่สามารถนำมาปรับคืนสภาพได้ ต้องนำไปกำจัดด้วยการเผาต่อไป ปัญหาที่พบบ่อยในการดูดซับก็คือ ปัญหาของพื้นผิวนอกสุดตันจนปิดช่องว่างระหว่างเม็ดถ่านทำให้น้ำเสียไหลผ่านลงไปไม่ได้ จำเป็นต้องล้างสิ่งสกปรกเหล่านั้นออกแบบเดียวกับการล้างทรายกรอง การตรวจสอบเพื่อหาปริมาณผงถ่านที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ตลอดจนหาจำนวนครั้งที่นำผงถ่านนั้นกลับมาใช้ซ้ำ สามารถทำได้ในห้องทดลองโดยใช้หลักการของไอโซเทอม ข้อมูลที่ได้จากการทำไอโซเทอมสามารถนำมาหาคำตอบที่ต้องการได้ เราจะทราบได้ว่า 1 หน่วยน้ำหนักของผงถ่านจะดูดซับสารชนิดนั้น ๆ ได้เท่าไร

5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากถ่านกะลามะพร้าว

จากลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติต่างๆ ของถ่านกะลามะพร้าว ทำให้ถ่านกะลามะพร้าวถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น การดูดกลืน การดูดสี การลดสารคลอรีน และการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ เป็นต้น

เพ็ญจันทร์ (2553) ศึกษาการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียด้วยถ่านกกกล ม และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ พบว่า ถ่านกกกลมปริมาณ 5 กรัมและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 4 กรัมมีสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ที่พีเอช 5 ความเร็วรอบการเขย่า 100 รอบ/นาที ระยะเวลาเขย่า 30 นาที ระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล 30 นาที และความเข้มข้นของฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 66.00 และ 42.70 ซึ่งสามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำทิ้งของบริษัท ทีโอซี ไกลคอล จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บุษยา (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผงใบผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดยตุง พบว่า ผงใบผักตบชวา 1 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ 6 ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 55.43 ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ 5 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ 9 ชนิด ร้อยละการดูดซับเฉลี่ยเท่ากับ 93.04

อวยพร (2531) ศึกษาประสิทธิภาพในการ ลดค่าความขุ่น สี ระดับน้ำสูญเสีย และระยะเวลาการกรองของถังกรอง ที่ใช้ทรายและถ่านกะลามะพร้าว และถ่านกะลามะพร้าวเพียงอย่างเดียว พบว่า ความขุ่นของน้ำที่กรองได้เฉลี่ย 1 NTU โดยเป็นเปอร์เซ็นต์การลดความขุ่นโดยเฉลี่ยมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพการกำจัดสี อยู่ในช่วง 30%-50% ระยะเวลาในการกรองมีค่าระดับน้ำสูญเสีย 1.50 เมตร และระยะเวลาในการกรองที่ได้มากกว่าถังกรองที่ใช้ทรายอย่างเดียวไม่น้อยกว่าสองเท่า

Amuda *et al.* (2007) ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก จากน้ำเสียอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าว พบว่าการดูดซับ zinc (II) มีลักษณะการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ดังนั้นจึงเป็นการดูดซับที่ผิวแบบชั้นเดียว

6. เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางธรรมชาติ

เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย อาศัยกระบวนการทำงานร่วมกัน ระหว่าง ดิน น้ำและพืช โดยทำการปลูกพืชที่ทนน้ำท่วมขังได้ในดินที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างดินนา 3 ส่วน ต่อทราย 1 ส่วน ให้มีเนื้อดินเป็นดินร่วน เพื่อช่วยเพิ่มการซึมซาบและการระบายน้ำ เมื่อทำการขังน้ำเสียแล้ว จุลินทรีย์ในดินจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ กลายเป็นสารอนินทรีย์ และธาตุอาหารให้พืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2543)

6.1 พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำ

พืชมีหน้าที่หลัก คือ สร้างสิ่งแวดล้อมให้กับจุลินทรีย์ โดยที่ใบและลำต้นของพืชช่วยชะลอความเร็วของการไหลของน้ำ ทำให้ออกซิเจนละลายในน้ำเสียตกตะกอน และยังเป็นที่พักอาศัยของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นส่วนของใบ ลำต้น และ รากพืชยังสามารถนำออกซิเจนจากชั้นบรรยากาศลงไปสู่รากจึงทำให้บริเวณรอบๆ รากพืชมีออกซิเจนสำหรับจุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย และทำให้ในไตรฟายอิงแบคทีเรียมีการเจริญได้ดีและสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน

นอกจากนี้เมื่อพืชเจริญเติบโตและตายลง ใบและลำต้นจะทับถมเหนือพื้นผิวดิน ทำให้เกิดชั้นของซากอินทรีย์วัตถุ จากการที่เกิดการสะสมของมวลสิ่งมีชีวิต ทำให้เป็นที่เกาะอาศัยของจุลินทรีย์ และเป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ นอกจากนี้พืชสามารถดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้อีกด้วย เพื่อไปใช้ในการเจริญเติบโต (Reddy and Busk, 1987)

โดยส่วนต่างๆของพืชที่ใช้ในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ มีบทบาทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 พืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ และเห็นเด่นชัด สำหรับชนิดของพืชน้ำที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถแบ่งเป็น พืชใต้น้ำ (Submerged Plant) พืชโผล่พ้นน้ำ (Emergent Plant) พืชลอยน้ำ (Floating Plant) และพืชชายน้ำ (Marginal Plant) แต่ในปัจจุบันนี้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์นิยมใช้พืชโผล่พ้นน้ำ ได้แก่ กล้วยไม้ กอ อ้อ และแห้วทรงกระเทียม เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียมากกว่าการใช้พืชลอยน้ำ เนื่องจากพืชลอยน้ำไม่สามารถทนกับอากาศ และศัตรูพืชได้ แต่พืชน้ำจะมีส่วนในการบำบัดน้ำเสียอย่างมาก ซึ่งหน้าที่ของพืชน้ำ คือ เป็นตัวช่วยปรับสภาวะแวดล้อม เพื่อช่วยให้การบำบัดน้ำเสียเป็นไปด้วยดี (จรงักษ์, 2543)

ตารางที่ 3 บทบาทส่วนต่างๆ ของพืชโผล่พ้นน้ำในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
ส่วนที่อยู่เหนือน้ำ	-ลดความเข้มของแสง เพื่อลดการเจริญเติบโตของไฟโตแพลงตอน -ลดความเร็วลม เพื่อป้องกันการแขวนลอยของตะกอน -สะสมธาตุอาหาร -ป้องกันอิทธิพลจากสภาพอากาศในฤดูหนาว (ประเทศหนาว) -ช่วยให้ระบบดูสวยงาม
ส่วนที่อยู่ใต้น้ำ	-ลดความเร็วกระแสน้ำ เพื่ออัตราการตกตะกอน -ลดการฟุ้งกระจายของตะกอนใต้น้ำ -กรองตะกอนขนาดใหญ่ -เป็นพื้นที่ผิวสำหรับการจับของไบโอฟิล์ม -ปล่อยออกซิเจน เพื่อสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่ม

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ส่วนประกอบของพืช	บทบาทในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย
รากและระบบรากพืชในชั้นตะกอนได้น้ำ	การย่อยสลายโดยออกซิเจน
	-ดูดซับธาตุอาหาร
	-ทำให้ผิวตะกอนได้น้ำถูกกัดเซาะน้อย
	-ป้องกันการอุดตันของตัวกลางในระบบไหลในแนวดิ่ง
	-ปล่อยออกซิเจนเพื่อเพิ่มการย่อยสลาย และ การเกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน
	-ดูดซับธาตุอาหาร
	-ปล่อยแอนติไบโอติก

เนื่องจากพืชโผล่พ้นน้ำมีบทบาทในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้ แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้ ดังนั้นการเลือกพืชโผล่พ้นน้ำที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น จึงควรมีคุณสมบัติของพืชโผล่พ้นน้ำที่จะนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำดังนี้ (พัฒน์, 2536)

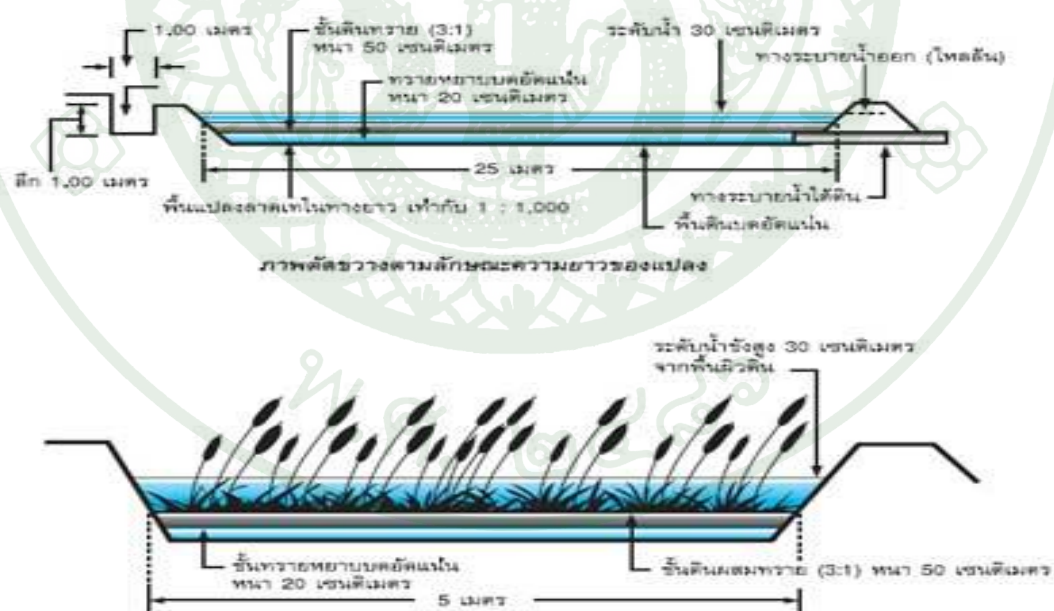
- ปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศและดินได้ดี (ควรเป็นพืชพันธุ์พื้นเมือง)
- ทนต่อสารมลพิษในน้ำเสียได้ดี
- ผลิตมวลชีวะได้มาก
- มีอัตราการสังเคราะห์แสง และเจริญเติบโตได้ตลอดปี
- มีความสามารถในการดูดซึม และเก็บสะสมสารต่างๆ ได้
- ง่ายต่อการจัดการ โดยนำออกจากระบบบ้าง เพื่อไม่ให้พืชอยู่หนาแน่นเกินไป

6.2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพืชบำบัดน้ำเสีย

6.2.1 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

รูปแบบเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษา

วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (LERD) ที่ศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้น ได้ยึดหลักการตามแนวพระราชดำริ โดยการทำแปลงและ/หรือทำบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่รวบรวมได้จากชุมชน และปลูกพืชน้ำที่ผ่านการคัดเลือกแล้วว่าเหมาะสมที่สุด 2 ชนิด คือ กกกลม(กกจันทบูรณ) และธูปฤาษี ช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้น ร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในดิน และระยะเวลาการกักพักเพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในการบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะการให้น้ำเสียหรือระบายน้ำเสีย 2 ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ในระดับหนึ่ง และมีการระบายน้ำเสียลงสู่ระบบบำบัดอย่างต่อเนื่อง (ระบบเปิด) น้ำเสียใหม่เข้าไปดินน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากระบบให้ไหลผ่านทางระบายน้ำ และ/หรือทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งมีระยะเวลาในการกักพักน้ำเสีย 1 วัน เมื่ออายุของพืชครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดพืชนั้นออกเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับพืชได้ พืชที่ตัดออกเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ประโยชน์เป็นผลพลอยได้อีกอย่างอื่นต่อไปด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบโดยสังเขปของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมดังกล่าวนี้

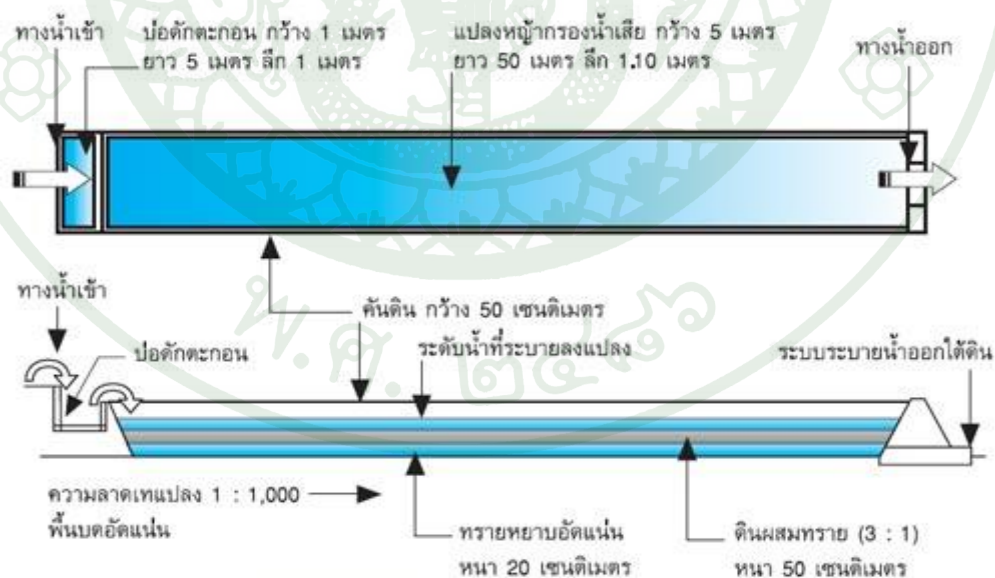


ภาพที่ 20 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)

6.3 การบำบัดด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

รูปแบบเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย ที่ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาขึ้น ยึดหลักการตามแนวพระราชดำริโดยการทำแปลงและ/หรือบ่อเพื่อกักเก็บน้ำเสียที่ได้จากชุมชน และปลูกหญ้าอาหารสัตว์ที่ผ่านการคัดเลือกที่เหมาะสม 3 ชนิด คือ หญ้าสตาร์ หญ้าคาธลา และหญ้าโคสโครสช่วยในการบำบัดน้ำเสียอาศัยการกรองน้ำเสียขณะที่ไหลผ่านแปลงหญ้าและการปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์แสงให้กับน้ำเสียนั้นร่วมกับการใช้ดินผสมทรายช่วยในการกรองน้ำเสีย และการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ในดิน เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สำหรับเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจะมีลักษณะการให้น้ำเสียหรือระบายน้ำเสียเข้าสู่ระบบ คือ ระบบที่ให้น้ำเสียขังไว้ 5 วัน และปล่อยทิ้งไว้ให้แห้ง 2 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์ในดินมีโอกาสดักจับตัวและระบายน้ำที่ผ่านการบำบัดออกจากระบบโดยปล่อยระบายน้ำทางระบบท่อใต้ดินสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เมื่ออายุของหญ้าครบระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดจะตัดหญ้านั้นออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดให้กับระบบ หญ้าที่ตัดออกเหล่านี้สามารถนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ได้ ซึ่งรูปแบบโดยสังเขปของเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย และลักษณะพืชที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (มูลนิธิชัยพัฒนา, 2543) ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ระบบบำบัดน้ำเสียด้วยพืชกรองและหญ้ากรอง

ที่มา: มูลนิธิชัยพัฒนา (2543)

1) ฐูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.)

เป็นวัชพืชล้มลุก อายุประมาณ 2 ปี สูงประมาณ 1.5-2 ม. เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มน้ำ อยู่ในวงศ์ Typhaceae มีระบบรากที่ดี ช่วยป้องกันการพังทลายของดินชายน้ำ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมผิวดินในไม้ยืนต้น สวนไม้ผลต่างๆ เพื่อลดการสูญเสียน้ำจากผิวดิน หรือลดการชะล้างหน้าดินจากน้ำฝนได้ ใบเหนียวนิ่มใช้มุงหลังคา ใช้ทำเครื่องจักสาน เช่น เสื่อ ตะกร้า เชือก ขอดอ่อนกินได้ทั้งสด และทำให้สุก ในการป้องกันกำจัดฐูปฤาษี ควรทำก่อนออกดอก จะดีที่สุด เมล็ดมีการแพร่ระบาดได้ดีโดยลมและน้ำได้ง่าย การตัดต้นขนาดใหญ่ ควรตัดให้ต่ำกว่าระดับผิวน้ำ และฐูปฤาษีสามารถกำจัดได้ โดโรเจนจากน้ำเสียในที่ลุ่มต่อไร่ได้ถึง 400 กก. ต่อปี และสามารถดูดเก็บโพแทสเซียมต่อไร่ได้ถึง 690 กก. ต่อปี จึงเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่จะมีบทบาทเป็นพืชเศรษฐกิจในอนาคต

2) กกกลมหรือกกจันทบูร (Cyperus Corymbosus Rottb.)

เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆ กับดอกเท่านั้นที่จะเป็นสามเหลี่ยม ลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1 ถึง 2 เมตร อยู่ในวงศ์ Cyperaceae ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ลำต้นใต้ดิน มีลักษณะเป็นแง่งสั้นๆ หรือเหง้า เรียกว่า Rhizome ลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็กสีน้ำตาล ซึ่งมีความยาวตามชนิดของกก เรียกว่า Stolon บางครั้งลำต้นส่วนนี้จะบวมโตขึ้นเป็นที่สะสมอาหารแต่ขยายพันธุ์ไม่ได้ ลำต้นที่มีก้านยาว สีเขียว ชูขึ้นไปในอากาศ เรียกว่า Arial stem

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิตติ และ สำอาง (2529) ได้จากที่เลือกใช้ต้นกกกรังกา เนื่องจากมีความทนต่อสารพิษ สามารถปรับตัวเข้ากับลักษณะสมบัติของน้ำเสียได้ดี และสามารถเจริญเติบโตและดำเนินกิจกรรมต่างๆ ได้ตลอดการทดลอง นอกจากนี้โครงสร้างของต้นกกกรังกาเป็นพืชที่มีเส้นใยที่ไม่เน่าสลายง่าย จึงมีผลน้อยในการก่อให้เกิดการเจือปนของสารอินทรีย์กลับคืนสู่น้ำเสียอีกครั้ง

จุฑามาศ (2554) ได้ศึกษาผลการใช้กกกลม ฐูปฤาษี และพุทธรักษา ในการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าราชบุรี โดยทำการคัดเลือกพืชบำบัดน้ำทิ้งของโรงไฟฟ้าราชบุรี ด้วยวิธีพืชบำบัด

เลือกพืช 3 ชนิดคือ กกกลม ฐปถาญี และพุทธรักษา โดยใช้แปลงควบคุมขนาด 1x10x1 เมตร พบว่า ฐปถาญีมีแนวโน้มเหมาะสมมากที่สุดในการบำบัดน้ำทิ้งโรงไฟฟ้าราชบุรี

Boyde (1970) พบว่า ฐปถาญีเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการกำจัดและบำบัดน้ำเสียเพราะรากของฐปถาญีมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสียได้ค่อนข้างสูง และสามารถดูดซับธาตุโลหะหนักได้ เช่น โปรท ตะกั่ว แคดเมียม นอกจากนี้ฐปถาญีนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตจกสาน มุงหลังคาบ้าน และกระดาษ เนื่องจากก้านฐปถาญีมีเยื่อไฟเบอร์มาก ทำให้มีความเหนียว นอกจากนี้ ฐปถาญีมีปริมาณน้ำหนักแห้งต่อ ไร่ประมาณ 1.7-2.4 ตันต่อไร่ สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนได้ และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีปริมาณธาตุอาหาร ไนโตรเจน ร้อยละ 2.33 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.51 และโปแตสเซียม ร้อยละ 2.35 ซึ่งค่อนข้างสูง เมื่อนำมาทำปุ๋ยหมักจะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูงดี วย นอกจากนี้ฐปถาญียังใช้เป็นสารกำจัดแมลงได้เมื่อนำมาจุดไฟให้เกิดควัน

8. ดินที่ใช้ในการศึกษา

8.1 ดินเหนียว

ดินเหนียว เนื้อดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดดินเหนียวตั้งแต่ร้อยละ 40 ขึ้นไปมีอนุภาคขนาดทราย ร้อยละ 45 หรือน้อยกว่า และมีอนุภาคขนาดทรายแป้งน้อยกว่าร้อยละ 40 ดินเหนียวเป็นดินที่มีเนื้อละเอียด ในสภาพดินแห้งจะแตกออกเป็นก้อนแข็งมาก เมื่อเปียกน้ำแล้วจะมีความยืดหยุ่นสามารถปั้นเป็นก้อนหรือคลึงเป็นเส้นยาวได้ เหนียวเหนอะหนะติดมือ เป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศไม่ดี แต่สามารถอุ้มน้ำ ดูดยึด และแลกเปลี่ยนธาตุอาหารพืชได้ดี เหมาะที่จะใช้ทำนาปลูกข้าว เพราะเก็บน้ำได้นานเนื้อดินที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินเหนียว ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทรายแป้ง

8.2 ดินทราย

ดินทราย เป็นดินที่มีอนุภาคขนาดทรายเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่าร้อยละ 85 ลักษณะโดยทั่วไปจะเกาะตัวกันหลวมๆ และมอง เห็นเป็นเม็ดเดี่ยวๆ ได้ถ้าสัมผัสดินที่อยู่ในสภาพแห้งจะรู้สึกสากมือ เมื่อลองกำดินที่แห้งนี้ไว้ในอุ้งมือแล้วคลายมือออกดินก็จะแตกออกจากกันได้ แต่ถ้ากำ

ดินที่อยู่ในสภาพขึ้นจะสามารถทำให้เป็นก้อนหลวมๆ ได้ แต่พอสัมผัสจะแตกออกจากกันทันที ดินทรายเป็นดินที่มีการระบายน้ำและอากาศดีมาก แต่มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เพราะความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารพืชมีน้อย พืชที่ขึ้นบนดินทรายจึงมักขาดทั้งธาตุอาหารและน้ำ เนื้อดินที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ดินทราย ดินทรายปนดินร่วน และดินร่วนปนทราย (กองสำรวจดิน, 2519)

8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิตติมา (2539) ใช้ดินปนทรายปลูกพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ พบว่าตัวกลางดินปนทรายสามารถดูดซับฟอสฟอรัสเพื่อให้พืชดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี ทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถกำจัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 75.7 ส่วนไนโตรเจนสามารถกำจัดได้ร้อยละ 82.1 ซึ่งแสดงว่าการใช้ดินปนทรายเป็นตัวกลางสามารถกำจัดฟอสฟอรัส และไนโตรเจนได้ดี

รัตนา (2542) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์ในการกำจัดแคดเมียม จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปลูกต้นธูปฤาษีในตัวกลางดินปนทราย พบว่าพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์สามารถบำบัดน้ำเสียได้ตามที่มาตรฐานน้ำทิ้งกำหนด และตัวกลางดินปนทรายสามารถดูดซับแคดเมียมได้ร้อยละ 95.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินปนทรายสามารถดูดซับแคดเมียม

Kedlec และ Knight (1996) ดินสำหรับพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์เป็นดินที่มีความอึดตัวของน้ำหรือถูกน้ำท่วมขัง และเป็นดินที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ ดินในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์จะมีลักษณะทางกายภาพ และเคมี คือ มีความสามารถซึมผ่านของน้ำในดินได้ต่ำไปจนถึงสูงโดยที่ความพรุนของดินสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และสามารถรองรับน้ำได้สูง ขณะที่ดินมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่า 20–35 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณคาร์บอนอินทรีย์มีมากกว่า 12–20 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้จุลินทรีย์ภายในดินมีอาหาร และพลังงานเพียงพอต่อการเจริญ จากลักษณะดังกล่าวข้างต้นสามารถบอกถึงประสิทธิภาพ และความสามารถของดินในการบำบัดหรือลดสารปนเปื้อนในน้ำเสีย

9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำทิ้งโรงงานผักกาดดอง

ฐปนา (2528) บำบัดน้ำเสียจากโรงงานผัก ผลไม้ดอง โดยคัดแยกแบคทีเรียทนเค็มจากตัวอย่างน้ำเสียและดินจากโรงงานผักดอง สามารถแยกแบคทีเรียทนเค็มได้จำนวน 34 ไอโซเลต

โดยทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร Nutrient broth ที่มีความเข้มข้นของเกลือเท่ากับ 0-25%(w/v) ผลการทดลองสามารถคัดเชื้อแบคทีเรียที่ทนเค็มในช่วงกว้าง 10 ไอโซเลต มาเลี้ยงในน้ำเสียจากโรงงานฟักทอง 3 สัปดาห์ และตรวจวัดประสิทธิภาพการลดค่า FCOD และ BOD พบว่า *Bacillus cereus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Enwinia cupripedii* มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีได้ดีที่สุด คือ จาก 7,920 mg/l เป็น 857, 1,118 และ 1,324 mg/l ตามลำดับ และลดค่าบีโอดี จาก 6,300 mg/l เป็น 686, 894 และ 1,059 mg/l ตามลำดับ การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของเชื้อทั้ง 3 ไอโซเลต พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

รอยพิมพ์ (2549) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการหมักดองผักโดยสาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina platensis*) นำน้ำเสียจากกระบวนการหมักดองผักมาเลี้ยงสาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ระดับความเข้มข้นของน้ำเสียร้อยละ 60.00 ซึ่งมีค่าบีโอดีและซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 950 และ 1,260 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังผ่านการเพาะเลี้ยงสาหร่ายแล้วพบว่าลดลงเหลือ 207 และ 276 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่า ระดับความเข้มข้นของสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่าย ชุดที่มีการเติมสารอาหารเปรียบเทียบกับชุดที่ไม่มีการเติมสารอาหาร พบว่า สาหร่ายมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเติมสารอาหาร

Kubo *et al.* (2001) ศึกษาการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตผักดองในประเทศญี่ปุ่นซึ่งมีเกลือประมาณ 15% (w/v) พบว่าจุลินทรีย์ที่มีส่วนช่วยในการบำบัดน้ำเสียคือ แบคทีเรียทนเค็ม 2 ชนิด คือ *Staphylococcus* sp. และ *Bacillus cereus* ซึ่งสามารถเจริญได้ที่ความเข้มข้นของเกลือ 0-20% (w/v) และเจริญได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นของเกลือ 0-10% (w/v)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 เครื่องย่อยสลาย (Digestion Block) พร้อมหลอดย่อยสลาย (Digestion Vessels)
- 1.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วย DO-Meter, pH-Meter, Turbidity-Meter, Digital TDS-Meter และ EC-Meter
- 1.4 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.5 คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตร พร้อมแคมป์และขาตั้งใช้สำหรับการทดลองแบบไหลผ่านต่อเนื่อง
- 1.6 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ Whatman
- 1.7 กะบะพลาสติกกรุปลีเหลื่อมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร สำหรับใช้ในเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

2. สารเคมี

- 2.1 โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate; $K_2Cr_2O_7$) Grade AR
- 2.2 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate (FAS); $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) Grade AR
- 2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4) Grade AR
- 2.4 สารละลายอินดิเคเตอร์เฟอโรอิน (Ferrouin) Grade AR
- 2.5 เมอร์คิวริกซัลเฟต (Mercuric sulfate; $HgSO_4$) Grade AR
- 2.6 สารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) Grade AR
- 2.7 1,10-ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต (1,10-Phenanthroline monohydrate; $C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$) Grade AR
- 2.8 ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) Grade AR
- 2.9 เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต (FAS) Grade AR

3. ถ่านกะลามะพร้าว

ถ่านกะลามะพร้าว มีลักษณะเป็นเกล็ด เกรด PHO 8×30 ผ่านการทดสอบมาตรฐานตาม American Society for Testing and Material, ASTM

4. วัสดุปลูก

ได้แก่ ดินนาผสมทราย จากโครงการศึกษา วิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมผสมผักเบี้ย ,กรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด

5. พืชที่ใช้ปลูก ได้แก่ ต้นกกกลม และต้นรูปถาวยี่

6. น้ำเสีย จากโรงงานผักกาดดอง

7. หินปูน จากจังหวัดสระบุรี

วิธีการ

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 N

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

1.2 กรดซัลฟิวริกเกรด

ชั่งซิลเวอร์ซัลเฟต 10.11 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 ลิตร กวนช้าๆ จนซิลเวอร์ซัลเฟต ละลายหมด

1.3 สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

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

1.4 สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 N

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

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

2.1 ปิเปตสารละลายสีแพลตทินัม-โคบอลต์ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00, 18.00 และ 20.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.00 มิลลิลิตร แต่ละขวด แล้วปรับปริมาตร ด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ ความเข้มข้น 10.00, 20.00, 30.00, 40.00, 50.00, 60.00, 70.00, 80.00, 90.00 และ 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

2.2 นำสารละลายมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์ จากข้อ 2.1 มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแพลตทินัม-โคบอลต์ (แกนนอน)

3. การเตรียมถ่านกะลามะพร้าว

นำถ่านกะลามะพร้าวมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป

4. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานผักกาดดอง

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด -ด่าง (pH) สี(color) ความขุ่น (Turbidity) ความเค็ม (Salinity) สภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids, TDS) อุณหภูมิ (Temperature) บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) และซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

5. ศึกษาสถานะการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน

ชั่งหินปูน 60 กิโลกรัม แข่งขันในน้ำเสีย 60 ลิตร ต่อ 1 การทดลอง ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ระยะเวลาการบำบัด และอายุการใช้งานของหินปูน

5.1 ศึกษาระยะเวลาในการแข่งขันน้ำเสีย โดยทำการวัดค่าพีเอชของน้ำเสียที่ แข่งหินปูนทุกวัน จนค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจน คงที่ หลังจากนั้น นำน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพการลดความเป็นกรดด้วย หินปูนมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และนำน้ำเสียไปศึกษาทดลองในขั้นต่อไป

5.2 อายุการใช้งานของหินปูน โดยใช้หินปูนชุดเดิมที่ใช้ในข้อ 5.1 แข่งขันน้ำเสีย ทำการศึกษา ทดลองจนประสิทธิภาพการเพิ่มพีเอชลดลง

6. ศึกษาประสิทธิภาพ การบำบัดน้ำเสียด้วยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าวโดยการทดลองแบบ แบนด์

ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว ระยะเวลาในการบำบัด และไอโซเทอรั่มของการดูดซับ

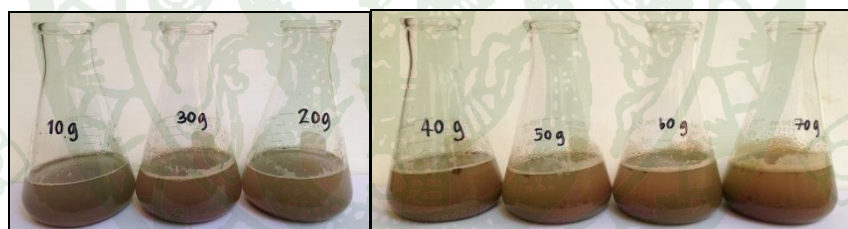
6.1 ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว ทำการชั่งถ่านกะลามะพร้าวที่ผ่านการอบไล่ความชื้น ที่ ปริมาณ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 และ 15 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ปริมาตร 250 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำเสีย ที่ผ่านการปรับลดคว ามเป็นกรดด้วยหินปูน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ในแต่ละใบ คน แล้วตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นตรวจวัดหาประสิทธิภาพการบำบัด สี ความขุ่น และซีโอดี

6.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ใช้ถ่านกะลามะพร้าวในปริมาณที่ศึกษาได้จากข้อ 6.1 คือน้ำเสียที่ผ่านการปรับลดด้วยหินปูนปริมาตร 50 มิลลิลิตรในแต่ละการทดลอง โดยแปรผันระยะเวลาที่ใช้บำบัดเป็นชั่วโมง คือ ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ชั่วโมง และแปรผันระยะเวลาที่ใช้บำบัดเป็นวันตั้งแต่ 1 ถึง 6 วัน

6.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ของถ่านกะลามะพร้าวว่ามีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ หรือแบบฟรุนดลิชโดยนำผลการทดลองที่ศึกษาได้จากการแปรผันปริมาณถ่านกะลามะพร้าวมาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับ

7. ศึกษาประสิทธิภาพปริมาณดินนาผสมทราย

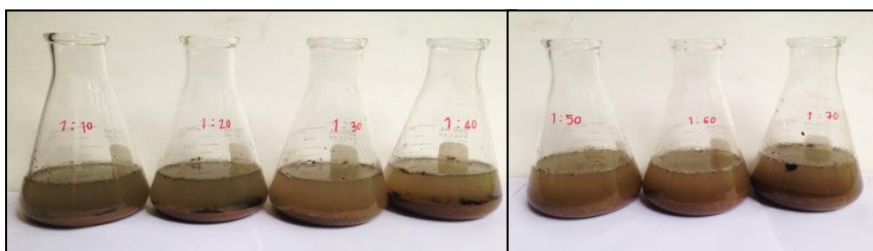
ชั่งดิน 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ เติมน้ำเสียที่ผ่านการลดความเป็นกรดจากข้อ 5.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 22 จากนั้นทำการทดลองต่อเช่นเดียวกับข้อ 6.1



ภาพที่ 22 การศึกษาปริมาณดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด

8. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยการทดลองแบบเบตซ์

อัตราส่วนระหว่างถ่านต่อดินที่ศึกษา คือ 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60 และ 1:70 ต่อปริมาตรน้ำเสียที่ผ่านการลดความเป็นกรดด้วยหินปูน 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงแล้วกรองด้วยกระดาษกรองแล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าสี ความขุ่น และซีไอดี



ภาพที่ 23 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด

9. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

9.1 ทำการทดลองโดยใช้คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตร บรรจุชั้นกรวด 4.45 เซนติเมตร ทรายหยาบ 1.9 เซนติเมตร ทรายละเอียด 1.27 เซนติเมตร และถ่านกะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 8 สูง 16.5 เซนติเมตร ซึ่งการบรรจุเป็นการจำลองและเลียนแบบพื้นที่เพาะปลูกระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบบึงน้ำกรองน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำรินี้



ภาพที่ 24 คอลัมน์บรรจุชั้นวัสดุปลูกสำหรับการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง

9.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมุนำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ทำการศึกษา 2 แบบ คือ

9.2.1 ขังแ่งน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ในคอลัมน์ ตามจำนวนชั่วโมงที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบเบตซ์ ข้อที่ 6.1 ปล่อน้ำเสียออก นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัด ทำการทดลองซ้ำจนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง หรือ คงที่

9.2.2 ขังแ่งน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ตามจำนวนวันที่ศึกษาได้จากการทดลองแบบเบตซ์ ข้อที่ 6.2 ปล่อน้ำเสียออก นำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการบำบัดโดยแ่งน้ำเสียในวันที่ทำการทดลอง และปล่อยให้ชั้นวัสดุปลูกแห้ง 2 วัน แล้วทำการเติมน้ำเสีย 200 มิลลิลิตร ทำการทดลองเช่นเดิม จนกระทั่งประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง หรือ คงที่

9.3 ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 9.2.1 และ ข้อ 9.2.2 แต่เปลี่ยนจากใช้น้ำเสียเป็นน้ำกลั่นแทนในการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

10. การจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบระบบหมุนำกรองน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

10.1 ทำการทดลอง โดยใช้กะบะพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมขนาด 51×51×54 เซนติเมตร บรรจุกรวดสูง 7 เซนติเมตร ทราบหยาบ 3 เซนติเมตร ทราบละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นดินนาปนทราบผสมถ่านกะลามะพร้าวในอัตราส่วนที่ศึกษาได้สูง 30 เซนติเมตร ปลูกพืช 2 ชนิด คือ กกกลม และ ฐปฤยิ ลงในกะบะ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 25 การทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับการปลูกต้นกกกลม (ก) และรูปถ่าย (ข)

10.2 เติมน้ำเสียที่ผ่านการลดความเป็นกรดด้วยหินปูน 20 ลิตร ลงในกะละ ปล่อยทิ้งไว้ 5 วัน ปล่อยน้ำออกทางด้านล่างของกะละ เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดมาหาประสิทธิภาพในการบำบัด สี ความขุ่น และซีไอดี แล้วปล่อยให้ชั้นวัสดุปลูกแห้ง 2 วัน แล้วเติมน้ำเสีย ทำการทดลองเช่นเดิม จนประสิทธิภาพการบำบัดลดลงจากเดิมประมาณครึ่งหนึ่ง หรือ คงที่

10.3 ชุดควบคุม ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 10.1 และ 10.2 เปลี่ยนจากการใช้น้ำเสียเป็นน้ำกลั่นแทนในการทดลอง เพื่อศึกษาว่ามีการชะล้างสิ่งเจือปนออกจากชั้นวัสดุปลูกหรือไม่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง

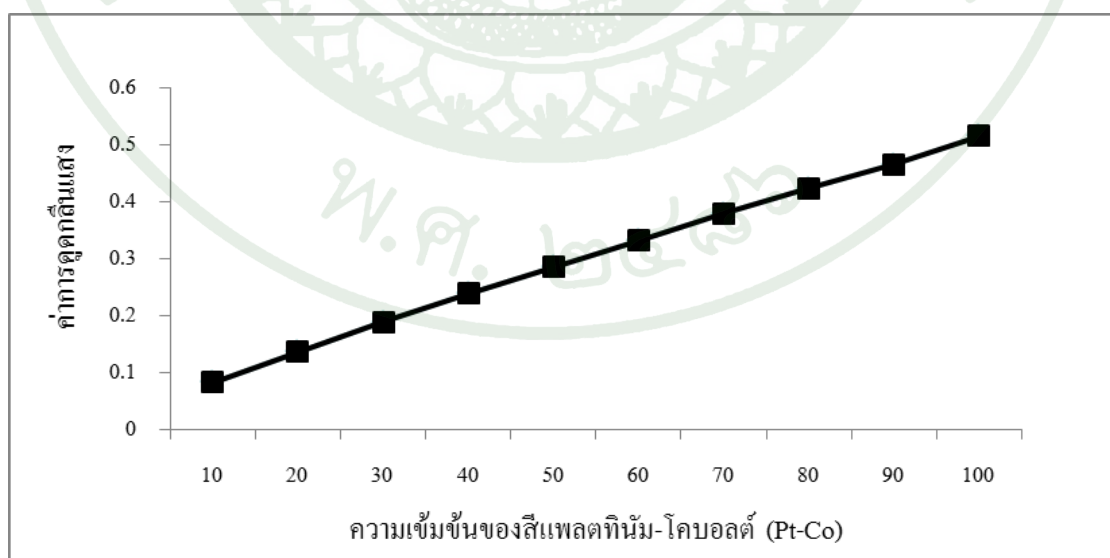
10.4 รวบรวมข้อมูล ประเมิน และวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีไอดี

ผลและวิจารณ์

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผักกาดทองด้วยการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน ร่วมกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติ ได้ผล การทดลองแบ่งออกเป็น 8 ส่วน ดังนี้ คือ ส่วนที่ 1 เป็นกราฟมาตรฐาน สีแพลตทินัม - โคบอลต์ ส่วนที่ 2 เป็นผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียของโรงงานผักกาดทองก่อนได้รับการบำบัด ส่วนที่ 3 เป็นการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน ส่วนที่ 4 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว ด้วยวิธีแบบเบตซ์ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ ส่วนที่ 5 เป็นผลการศึกษาปริมาณดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด ส่วนที่ 6 เป็นผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด ส่วนที่ 7 เป็นการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง และส่วนที่ 8 เป็นเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กร่วมกับการปลูกพืช 2 ชนิด คือ กกกลม และ กล้วยน้ำว้า มีรายละเอียดดังนี้

1. กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม - โคบอลต์ที่เตรียมจากการทดลองข้อที่ 2 มีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง โดยสมการเชิงถดถอยเชิงเส้นคือ $y = 0.0048x + 0.0424$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9991 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 กราฟมาตรฐานสีแพลตทินัม-โคบอลต์

2. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียจากโรงงานผักกาดดอง

ผักกาดดองเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากการถนอมอาหารซึ่งมีกรรมวิธีที่ได้จากการหมัก โดยวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้แก่ ผักกาดเขียว น้ำ ตาล และเกลือ ลักษณะ น้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์สูงพิจารณาได้จากค่าซีโอดี บีโอดี และมีความเป็นกรดสูง เมื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่าน้ำเสียของโรงงานผักกาดดอง มีค่าความเป็นกรด-เบส ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำ ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 4 และพบว่าค่าความเค็มและ ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าสูงเนื่องจากการใช้เกลือในกระบวนการผลิต สำหรับค่าสีที่ตรวจวัดได้เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานแพลตตินัม- โคบอลต์เท่ากับ 497.42 Pt-Co Unit ซึ่งถือว่าเกินค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริ โภคที่กำหนดให้ไม่เกิน 5-15 Pt-Co Unit เมื่อพิจารณาด้วยสายตา ยังเห็นสีที่น้ำฟุ้งกระจาย ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานผักกาดดองควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยทิ้งแหล่งน้ำสาธารณะ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำ จากน้ำเสีย โรงงานผักกาดดอง กับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

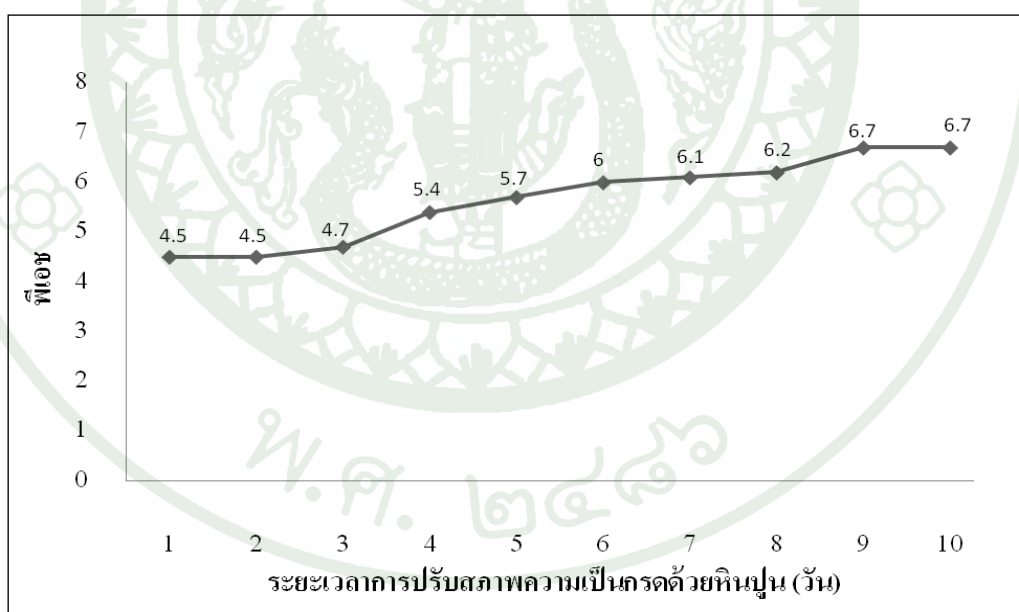
พารามิเตอร์	คุณภาพน้ำ โรงงานผักกาด ดอง	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคม อุตสาหกรรม
pH	4.5	5.5 – 9.0
Color (Pt-Co Unit)	497.4	5-15*
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	25,500.0	-
TDS (mg/L)	26,400.0	ไม่เกิน 3,000
Sal (mg/L)	22.0	2,000
Turbidity (NTU)	1,148.0	5-20*
COD (mg/L)	5,840.0	ไม่เกิน 120
BOD (mg/L)	2,145.0	ไม่เกิน 20
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	28.50	ไม่เกิน 40

* ค่ามาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภค

3. การปรับลดความเป็นกรดของน้ำเสียจากโรงงานผักกาดทองด้วยหินปูน

3.1 ระยะเวลาในการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน

เนื่องจาก น้ำเสียจากโรงงานผักกาดทองมีความเป็นกรด พีเอชเท่ากับ 4.50 จากการศึกษาระยะเวลาการแช่ขังหินปูนในน้ำเสียด้วยอัตราส่วนระหว่างหินปูน 60 กิโลกรัมต่อน้ำเสีย 60 ลิตร และทำการวัดพีเอชทุกวันพบว่าพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ที่พีเอช เท่ากับ 6.7 ตั้งแต่วันที่ 9 เป็นต้นไป ดังแสดงในภาพที่ 27 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระยะเวลาการปรับลด ความเป็นกรดด้วยหินปูนเท่ากับ 9 วัน โดยพีเอชเท่ากับ 6.7 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และจากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังการปรับ ลดความเป็น กรดด้วยหินปูน พบว่ามีค่าสีเท่ากับ 3.67 Pt-Co Unit ความขุ่นเท่ากับ 735.01 NTU และซีโอดี เท่ากับ 2,400 mg/l ดังนั้น แสดงว่าการแช่ขังน้ำเสียด้วยหินปูนมีประสิทธิภาพในการลดความเป็นกรด ทำให้ค่าพีเอชอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรง งานอุตสาหกรรมเท่านั้น สำหรับ สี ความขุ่น และซีโอดี ยัง มีค่าเกิน เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงต้องอาศัยการบำบัดในขั้นตอนต่อไป

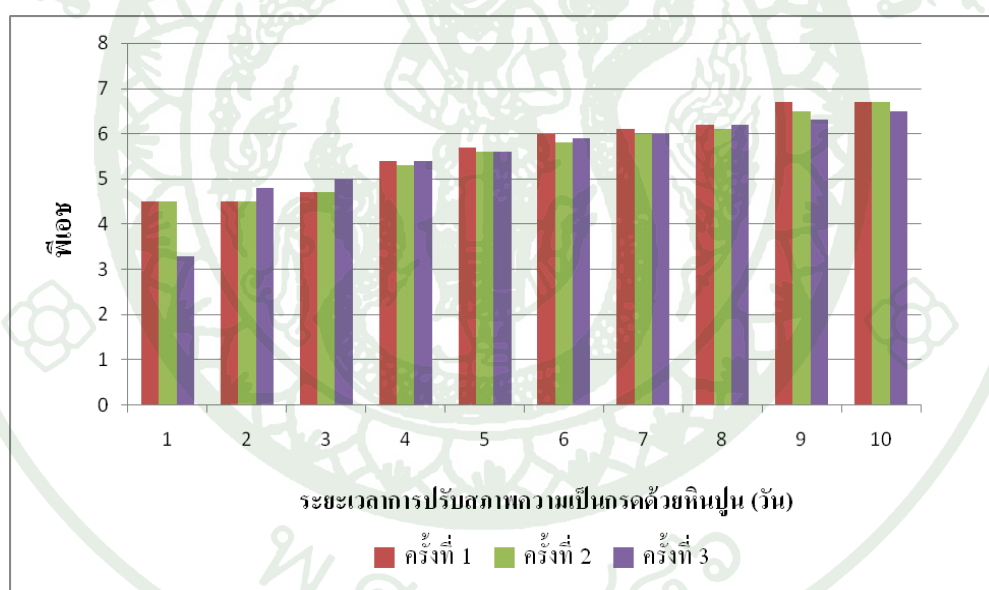


ภาพที่ 27 ระยะเวลาการปรับสภาพความเป็นกรดด้วยหินปูนกับพีเอช

3.2 อายุการใช้งานของหินปูน

จากการทดลองการแช่ขังน้ำเสีย 60 ลิตรต่อหินปูน 60 กิโลกรัมจำนวน 3 ซ้ำพบว่า ระยะเวลาการปรับสภาพความเป็นกรดของน้ำเสีย ในครั้งที่ 1 ใช้ระยะเวลาการแช่ขัง 9 วันพีเอช เท่ากับ 6.7 ครั้งที่ 2 ใช้ระยะเวลาการแช่ขัง 9 วัน พีเอชเท่ากับ 6.5 และครั้งที่ 3 ระยะเวลาการแช่ขัง 9 วัน พีเอชเท่ากับ 6.3 ดังภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุการใช้งาน ของหินปูนเพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพของหินปูนจะลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาปรับสภาพความเป็นกรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ระยะเวลาการปรับ ลดความเป็นกรดของหินปูน ยังขึ้นอยู่กับค่าพีเอช และ ลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกัน รวมถึงปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในหินปูนที่ลดลง จึง ส่งผลให้ระยะเวลาการปรับสภาพความเป็นกรด-เบสแต่ละครั้ง มีระยะเวลาไม่เท่ากัน

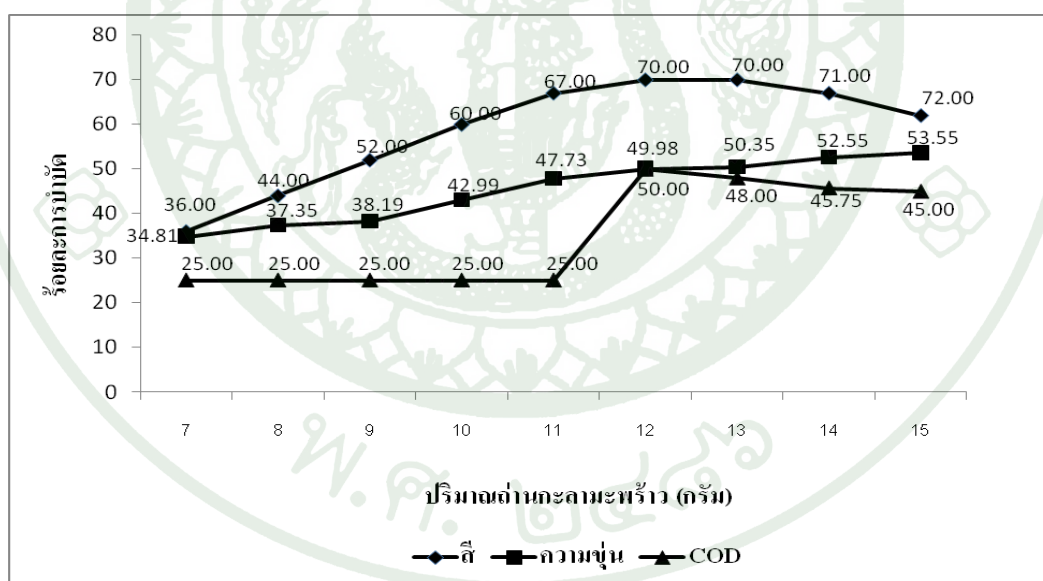


ภาพที่ 28 ระยะเวลาในการปรับสภาพความเป็นกรดด้วยหินปูนกับพีเอช (วัน)

4. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว ด้วยวิธีแบบเบคซ์และไอโซเทอร์มของการดูดซับ

4.1 ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว

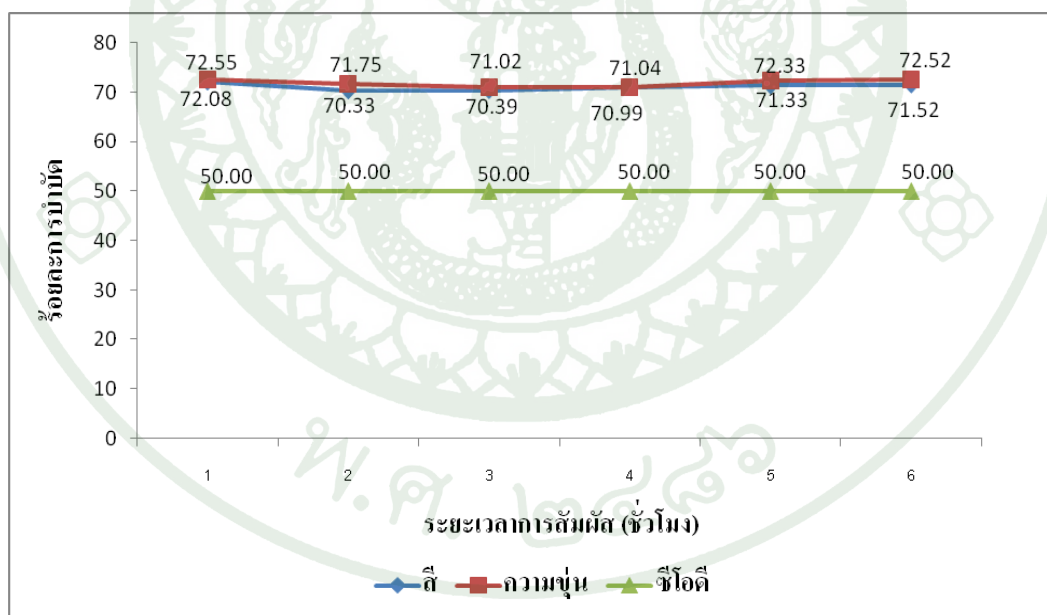
ถ่านกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติในการดูดกลิ่น การดูดสี และการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจากการแปรผันปริมาณถ่านกะลามะพร้าวตั้งแต่ 7 จนถึง 15 กรัม พบว่าที่ปริมาณถ่าน 12 กรัม ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด โดยให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี ร้อยละ 70.00, 49.98 และ 50.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 29 จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกะลามะพร้าวจะส่งผลต่อพื้นที่สัมผัสเพิ่มมากขึ้นด้วยจึงทำให้การดูดซับมลสารมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าปริมาณถ่านกะลามะพร้าวมากเกินไปอาจจะทำให้มีผลต่อ ค่าสี และความขุ่น ดังนั้น ปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ที่จะใช้ศึกษาในขั้นต่อไปคือ 12 กรัม



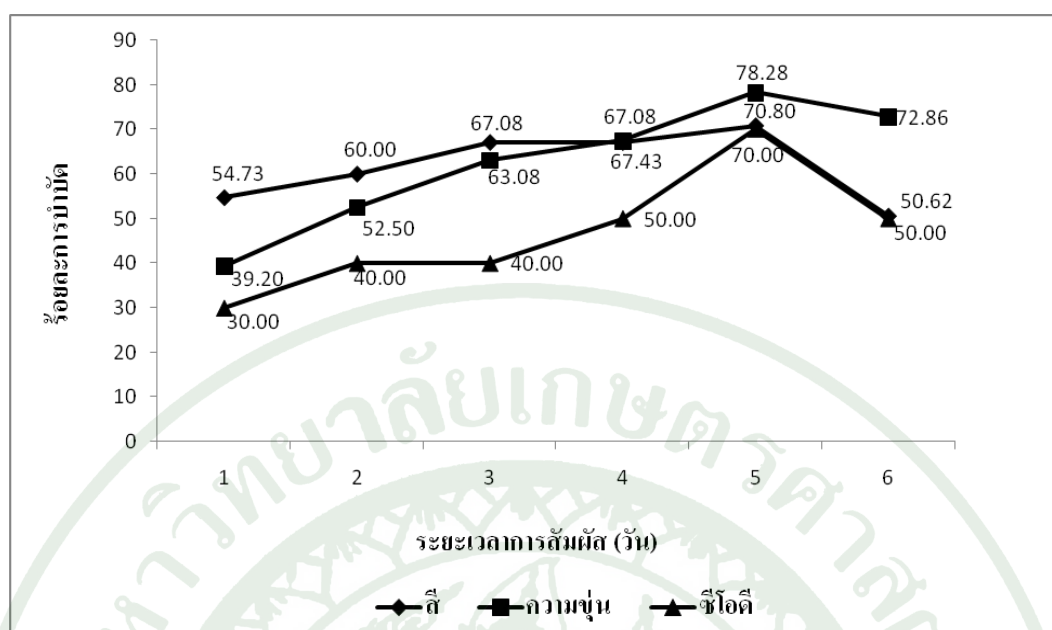
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีกับปริมาณถ่านกะลามะพร้าว

4.2 ระยะเวลาการสัมผัส

จากการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เป็นชั่วโมง พบว่า ในระยะเวลาการสัมผัส 1-6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดสี ความชุ่ม และซีไอดี ค่าการบำบัดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ที่ประมาณ 70-72, 71-72 และ 50 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 แต่จากการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสที่เป็นวัน พบว่า ระยะเวลาการสัมผัส 5 วัน มีประสิทธิภาพการบำบัดสี ความชุ่ม และซีไอดี ได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 70.80, 78.28 และ 70.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 31 จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพระยะเวลาการสัมผัสที่เป็นวันมี ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีกว่าระยะเวลาการสัมผัส ที่เป็นชั่วโมง เนื่องจากระยะเวลาการสัมผัสที่เป็นวันมีระยะเวลาเพิ่มขึ้นทำให้ผลสารมีโอกาสสัมผัส หรือถูกดูดซับมากขึ้น จากภาพที่ 31 จะเห็นว่าระยะเวลาเพิ่มขึ้นแนวโน้มการบำบัดเพิ่มขึ้นและเมื่อถึงระยะเวลาหนึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะคงที่และเริ่มลดลง เนื่องจาก การดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล (อัตราดูดซับ = อัตราคายดูดซับ) ทำให้ตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวและเริ่มหมดสภาพมีผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่หรือลดลง (นิพนธ์ และ คณิตวุฒิสกุล)



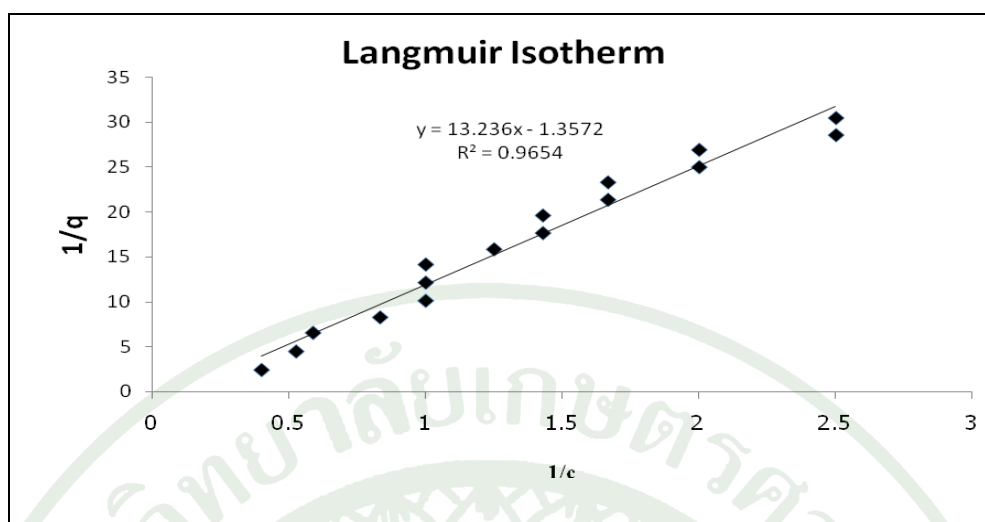
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความชุ่ม และซีไอดีกับระยะเวลาการสัมผัส (ชั่วโมง)



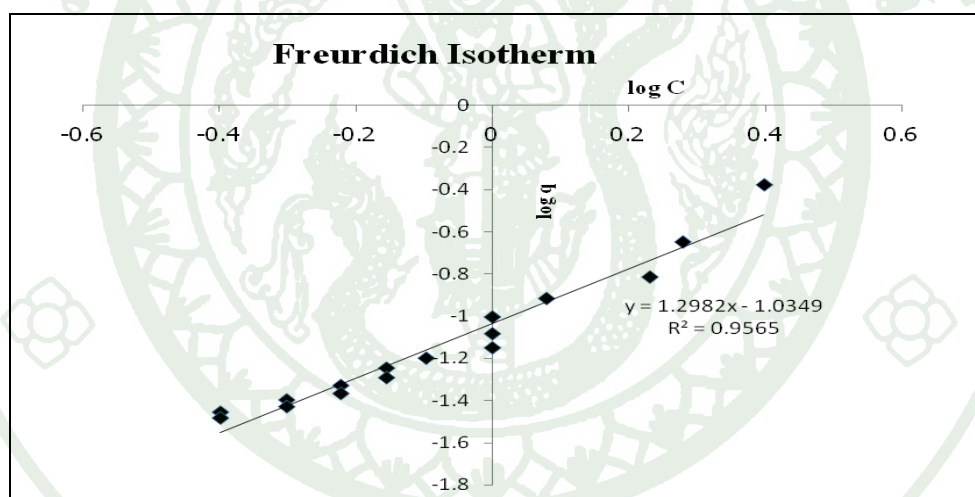
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบดอัดดิน ความชุ่มชื้น และซีโอดีกับระยะเวลาการสัมผัส (วัน)

4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองในข้อ 4.1 มาเขียนกราฟแสดงไอโซเทอร์มของแสงเมียร์ และฟรุณดิชได้กราฟดังแสดง ดังภาพที่ 32 และภาพที่ 33 ตามลำดับ ได้สมการถดถอยเชิงเส้น คือ $y = 13.236x - 1.3572$ และ $y = 1.2982x - 1.0349$ ตามลำดับ และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มากกว่าเท่ากับ 0.9654 และ 0.9565 ตามลำดับ ซึ่งค่ามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแสงเมียร์และฟรุณดิช ซึ่งกลไกการดูดซับ ของแสงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมดโดยมีกลไกของการดูดซับที่เหมือนกันซึ่งการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวและตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัดและเมื่อ ตัวถูกดูดซับดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ (นิพนธ์ และ คณิดา, 2550) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน (Johnson, 1989) และฟรุณดิชเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น (Buckley, 1992)



ภาพที่ 32 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว

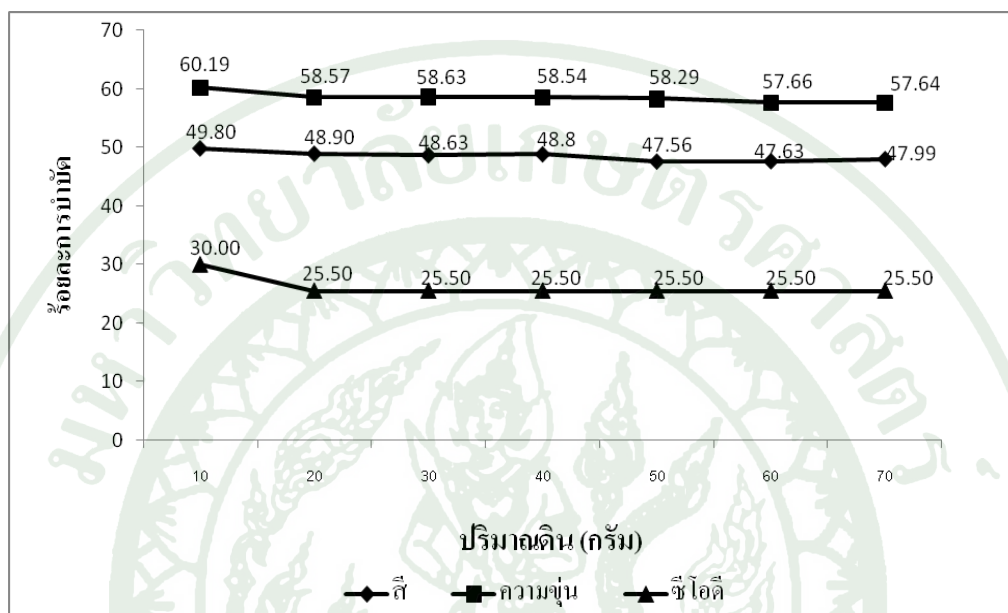


ภาพที่ 33 ไอโซเทอร์มฟรุนดิช ของการดูดซับด้วยถ่านกะลามะพร้าว

5. การศึกษาปริมาณดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด

จากการทดลอง เมื่อแปรผันปริมาณดินเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 กรัม ต่อน้ำเสีย ที่ปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน แล้ว 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาสัมผัส 5 วัน พบว่า ปริมาณดิน 10 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 89.80, 60.19 และ

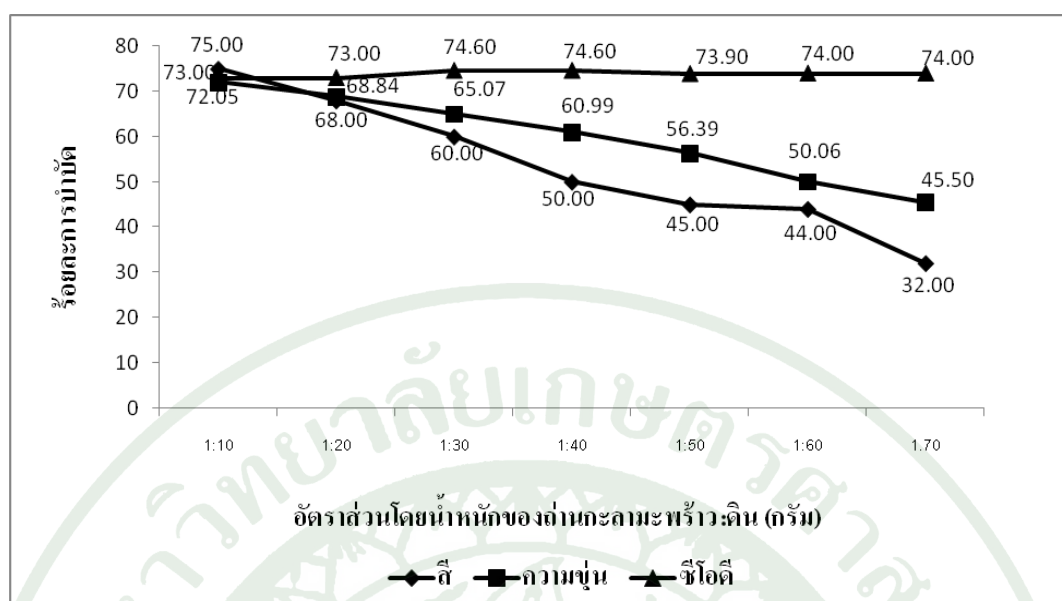
30.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 34 อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณดินทำให้น้ำเสียชะสารปนเปื้อนออกมาจากดินได้มากขึ้นประกอบกับน้ำเสียมีสถานะที่เหมาะสมในการชะสจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดิน (กรัม) กับร้อยละการบำบัดซี ความชุ่มและซีโอไซด์

6. การศึกษาอัตราส่วนระหว่างถ่านกะลามะพร้าวต่อดินที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด

จากผลการทดลองแบบเบตซ์ โดย แปรผันอัตราส่วน โดยน้ำหนักของถ่านกะลามะพร้าวต่อดินนาที่อัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60 และ 1:70 ผสมต่อน้ำเสียที่ปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูนแล้ว 50 มิลลิลิตร พบว่า ที่อัตราส่วน 1:10 มีประสิทธิภาพการบำบัดซี ความชุ่มและซีโอไซด์ที่ร้อยละ 75.00, 72.05 และ 73.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 35 อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณดินทำให้น้ำเสียชะสารปนเปื้อนออกมาจากดินได้มากขึ้นประกอบกับน้ำเสียมีสถานะที่เหมาะสมในการชะสจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง



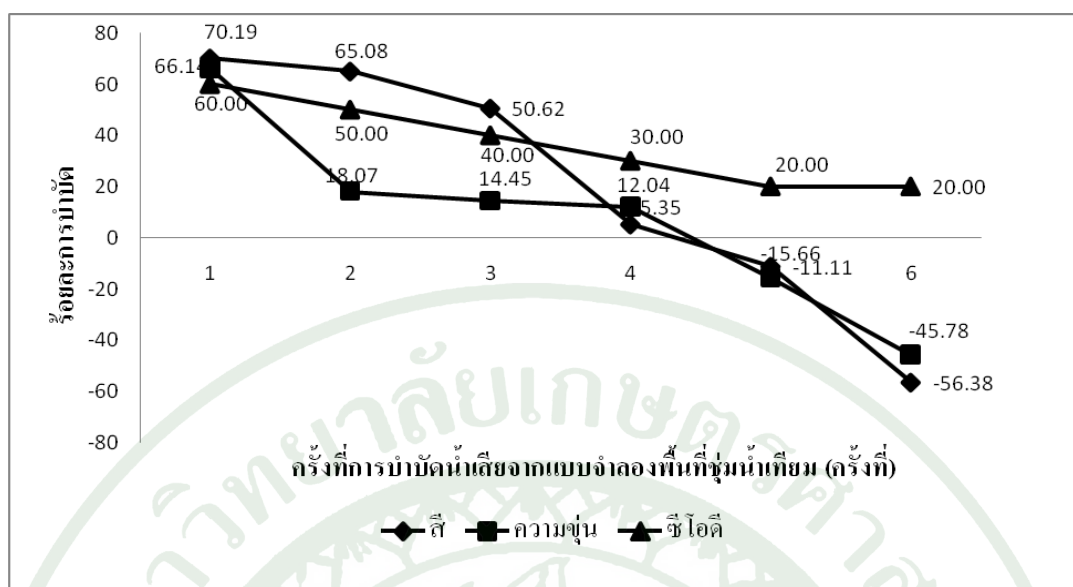
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี่ ความชุ่มและซีโอดี กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกะลามะพร้าวต่อดิน

7. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองโดย บรรจุชั้นวัสดุปลูกใน คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 33 เซนติเมตร คือชั้น กรวด 4.45 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 1.90 เซนติเมตร ทราวยละเอียด 1.27 เซนติเมตร และถ่านกะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 6 คือ 1:10 สูง 16.50 เซนติเมตร การทดลองแบบการไหลต่อเนื่องเป็นการจำลองชั้นวัสดุปลูกและวิธีการบำบัดน้ำเสียของระบบหลุมกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

7.1 การจำลองระบบบำบัดแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

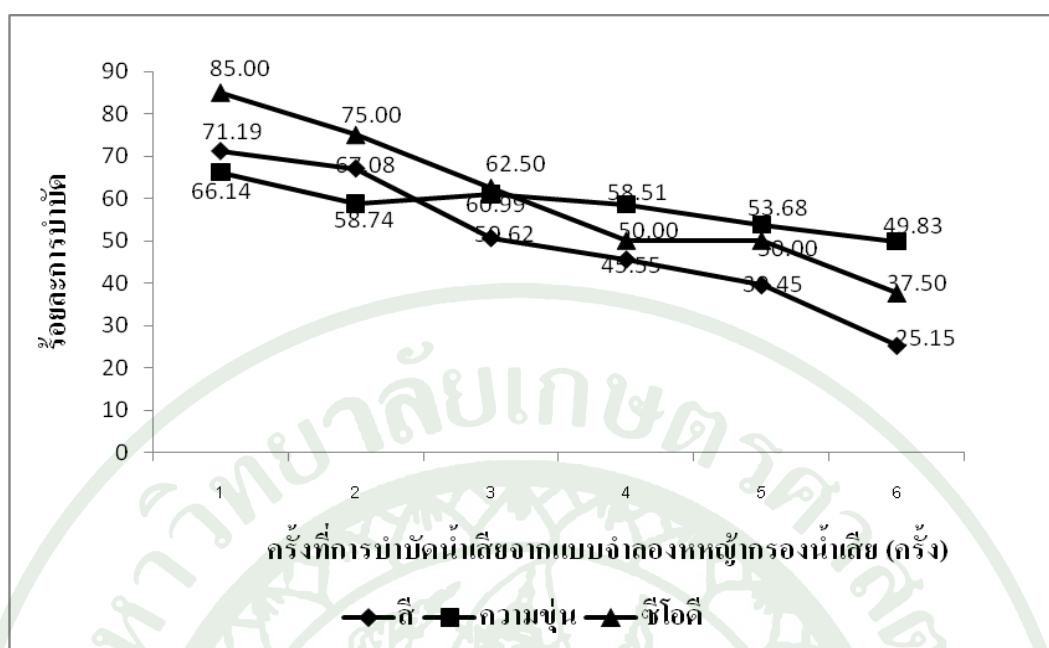
ทำการทดลอง โดยแช่ขังน้ำเสีย ที่ผ่านการปรับ ลดความเป็นกรดด้วยหินปูน 200 มิลลิกรัมในคอลัมน์ แช่ขังนาน 1 ชั่วโมงหลังจากนั้นปล่อยน้ำเสียมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ทำการทดลองเช่นเดิมจนประสิทธิภาพการบำบัดลดลง ผลการทดลองพบว่า ในชั่วโมงแรก มีประสิทธิภาพการบำบัด สี่ ความชุ่ม และ ซีโอดี ได้ดีถึงร้อยละ 70.19, 66.14 และ 60.00 ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองซ้ำพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไม่สามารถบำบัดได้ ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดี กับครั้งที่ การบำบัดน้ำเสีย แบบจำลองพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

7.2 การจำลองระบบบำบัดแบบห้วยกรองน้ำเสีย

การจำลองการบำบัดน้ำเสีย แบบระบบ ห้วยกรองน้ำเสีย คือ ปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยการแช่หินปูนปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์ที่บรรจุวัสดุปลูก แข่งขันน้ำเสีย 5 วัน จากนั้นปล่อยน้ำเสียผ่านคอลัมน์มาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ และปล่อยให้วัสดุปลูก ในคอลัมน์แห้ง 2 วัน ทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 6 ครั้ง พบว่า ในครั้งแรกสามารถลดสี ความขุ่น และซีโอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 71.19, 66.14 และ 85.00 ตามลำดับ ดังภาพที่ 37 จากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งการบำบัดครั้งที่ 5 น้ำเสียเริ่มมีค่า สี ความขุ่น และซีโอดี เกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดระบบห้วยกรองน้ำเสียมีประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เนื่องจากมีระยะเวลาการสัมผัสถึง 5 วัน จึงทำให้สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมีโอกาสที่จะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับถ่านกะลามะพร้าวและดินได้มาก่อนผ่านชั้นกรองต่อไป ดังนั้นระบบห้วยกรองน้ำเสียจึงมีความเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผักกาดดองในขั้นตอนการทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็กต่อไป



ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบ่มดดิน ความชุ่มและชีโอดี กับ ครั้งที่การบ่มดน้ำเสียแบบระบบห่อหุ้มเครื่องน้ำเสีย

8. การทดลองระบบบำบัดน้ำเสียแบบห่อหุ้มเครื่องน้ำเสียในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

ในการทดลองนี้มีการปลูกพืชช่วยในการบำบัดด้วย คือ กกกลมและรูปถายซึ่งโดยทั่วไประบบบำบัดแบบห่อหุ้มเครื่องน้ำเสียสามารถบำบัดน้ำเสียได้ เนื่องจาก น้ำเสียอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำผิวดิน และจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในชั้นใต้ดิน โดยทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ให้เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำหรับพืชใช้ในการเจริญเติบโต และผ่านการกรองโดยรากพืช และชั้นดินที่มีการผสมถ่านกะลามะพร้าว รวมถึงชั้นทรายหยาบ และทรายละเอียด ที่เป็นตัวกลางในการบำบัด ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกบำบัดออกไป สารอินทรีย์ที่สามารถตกตะกอนได้จะถูกกำจัดอย่างรวดเร็วภายใต้สภาพที่สงบนิ่งโดยการกรองการตกตะกอน ส่วนที่เหลือถูกกำจัดโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดกับต้นพืชและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำ ออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายได้จากการแพร่ผ่านจากบรรยากาศและจากระบบรากพืชในดิน ในการทดลองนี้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของวัสดุปลูกระหว่างใช้ดินเพียงอย่างเดียวกับใช้ดินผสมถ่านกะลามะพร้าวและเปรียบเทียบพืชที่ใช้บำบัด คือ กกกลม และรูปถาย

8.1 บำบัดโดยปลูกต้นกกกลม

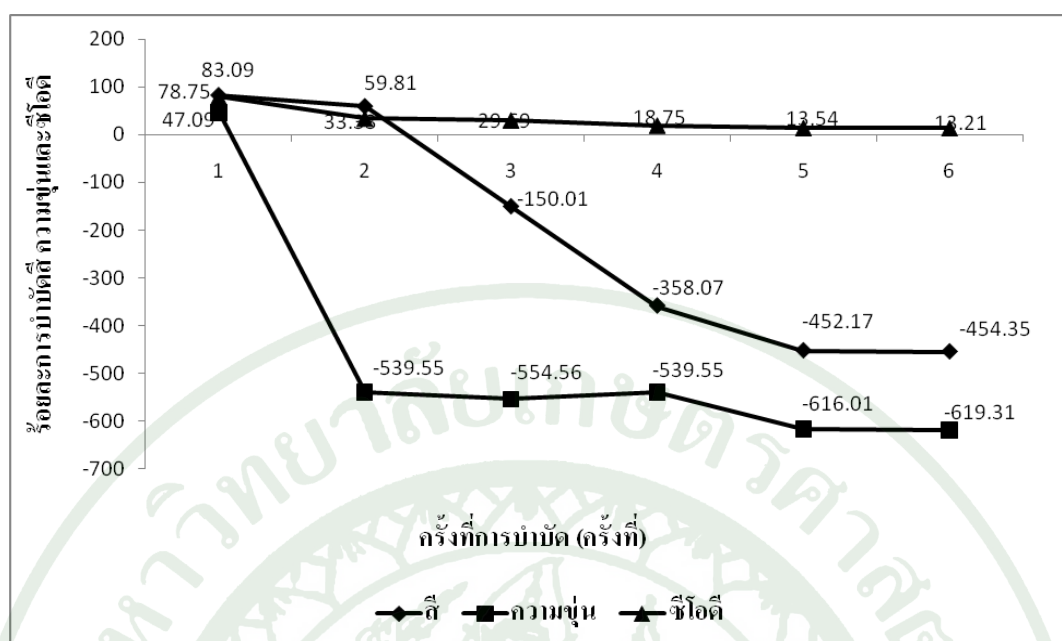
การทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบหยูก รongน้ำเสียร่วมกับการปลูกกกกลม ดังภาพที่ 38 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ดินเป็นวัสดุปลูก ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินเป็นวัสดุปลูก ส่วนที่ 3 เป็นชุดควบคุมใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสีย เพื่อศึกษาว่ามีการชะสารปนเปื้อนจากชั้นวัสดุปลูกออกมาหรือไม่



ภาพที่ 38 การทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็กด้วยกกกลมแข่งน้ำเสีย

8.1.1 ประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้ดินเป็นวัสดุปลูก

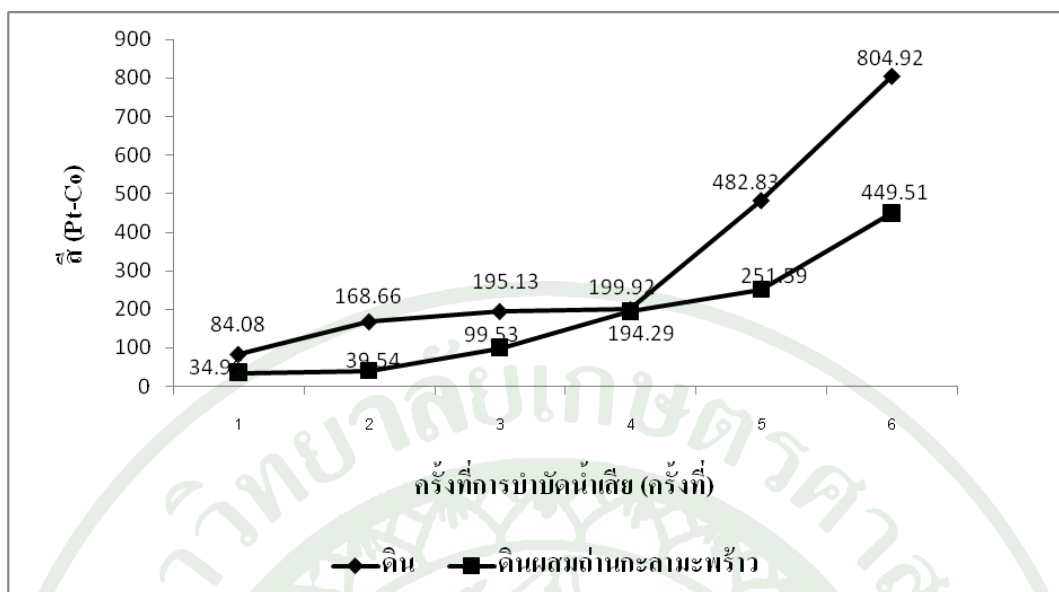
จากการบรรจุกรวดสูง 7 เซนติเมตร ทราวยหยาบ 3 เซนติเมตรทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และชั้นดินนา สูง 30 เซนติเมตรลงในกระบอกร่วมกับการปลูกกกกลมโดยทำการแข่งน้ำเสียที่ผ่านการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน ปริมาตร 20 ลิตร เป็นเวลา 5 วัน หลังจากนั้นปล่อยน้ำเสียมาวิเคราะห์ค่าสี ความขุ่น และซีโอดี และปล่อยให้ชั้นวัสดุแห้ง 2 วัน หลังจากนั้นทำการทดลองซ้ำจน ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงครึ่งหนึ่ง หรือคงที่ ผลการทดลองพบว่าครั้งที่ 1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดี ได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 83.09, 47.09 และร้อยละ 78.75 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัด ครั้งที่ 2 ไม่สามารถบำบัดความขุ่นได้และประสิทธิภาพการบำบัด สี และซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงครั้งที่ 6 ดังภาพที่ 39 ดังนั้น แสดงว่าในครั้งแรกมวลสารที่ปนเปื้อน ในน้ำเสียจะถูกดูดซับ ด้วยถ่านกะลามะพร้าว การกรองด้วยรากพืช สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้ดีที่สุด และพืชนำไปใช้ จากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับ การกรอง และการย่อยสลาย ลดต่ำลงจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลง และอาจมีการชะสารออกมา



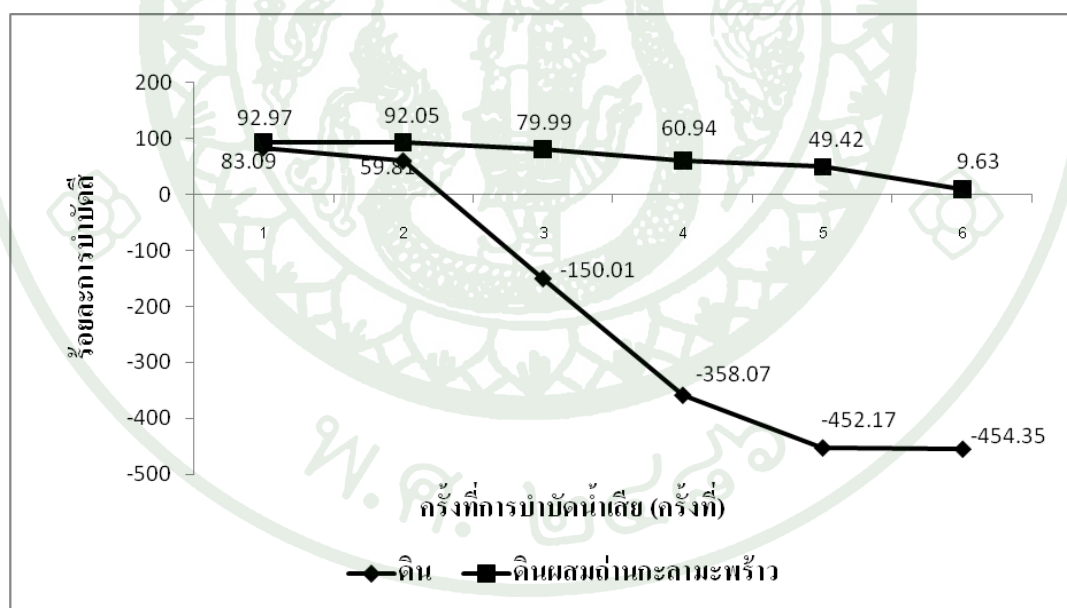
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดค่าความขุ่น และซีไอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสีย แบบห้ำกรองน้ำเสียที่ปลูกต้นกกกลม

8.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินนา

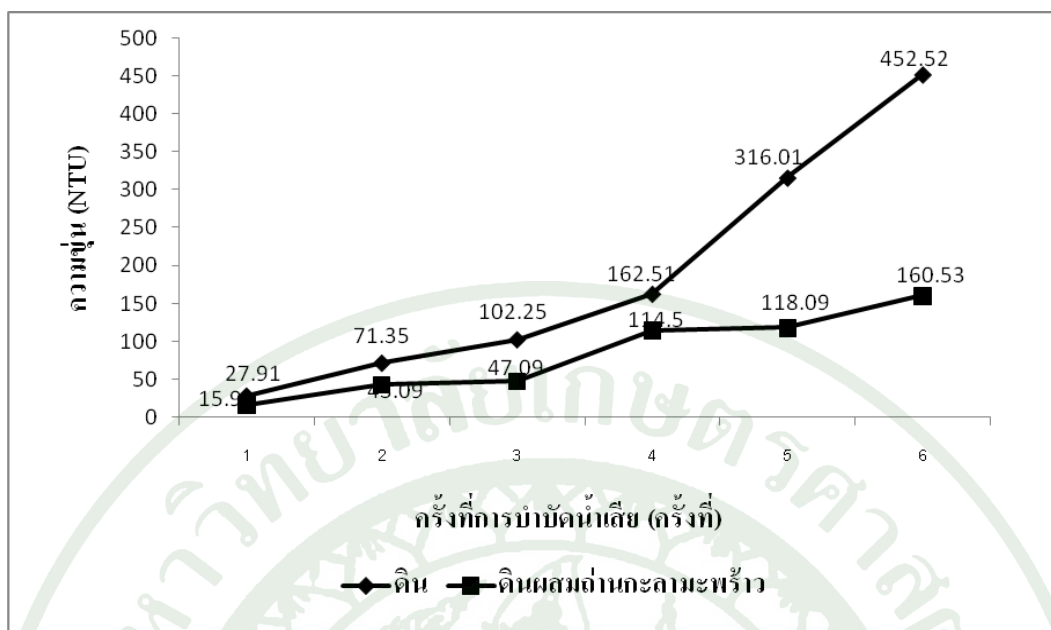
การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด ค่าความขุ่น และซีไอดีของ ชุดทดลองที่มีการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ด้วยการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดิน ทำการทดลองเช่นเดิม พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น และซีไอดีดีที่สุดในระบบการบำบัด ครั้งที่ 1 เท่ากับร้อยละ 92.97, 83.49 และ 88.75 ตามลำดับ ดังภาพที่ 41 ภาพที่ 43 และภาพที่ 45 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงการบำบัด ครั้งที่ 4 น้ำเสียเริ่มมีค่า ซีไอดีเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังภาพที่ 44 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดค่าความขุ่น และซีไอดี สูงกว่า ของการใช้ดินเพียงอย่างเดียวเป็นวัสดุปลูก เนื่องจากถ่านกะลามะพร้าวมีลักษณะเป็นรูพรุน ทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับ ดูดกลืน รวมทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ ที่อยู่ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดี ดังนั้นน้ำที่ออกจากระบบห้ำกรองน้ำเสียจึงไม่มึกลิ่นหรือกล่าวได้ว่าถ่านกะลามะพร้าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผักกาดทองได้นั่นเอง



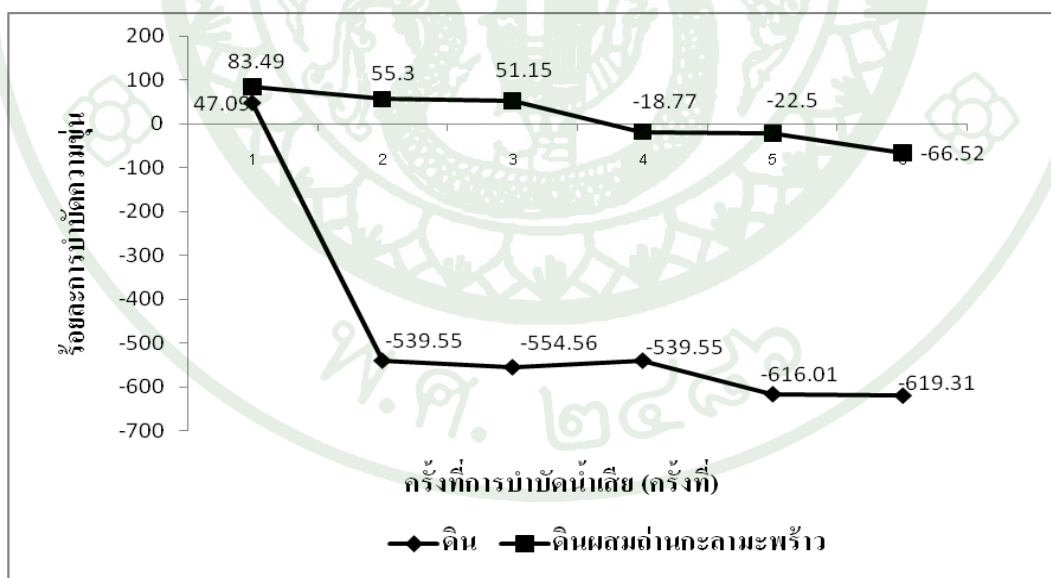
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



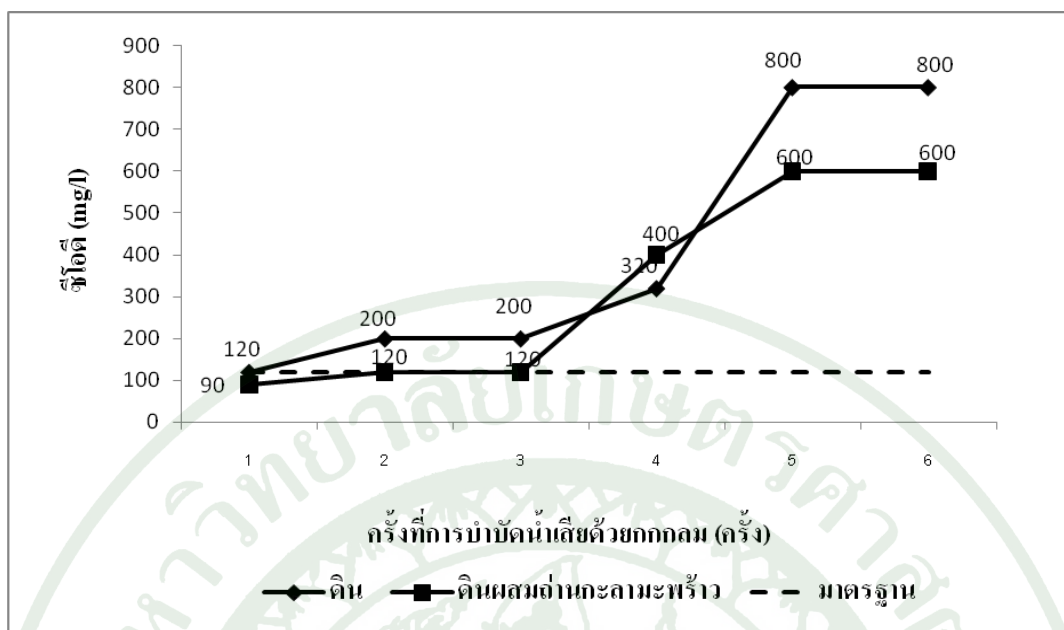
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



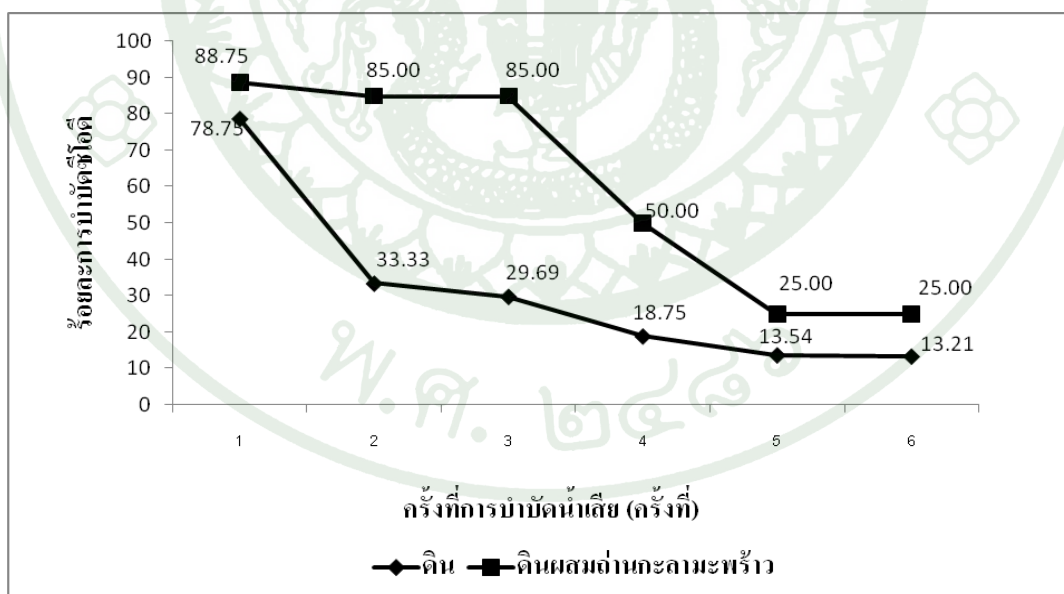
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดความขุ่น กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดซีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรอง ในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยที่ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดิน เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกกกกลมโดยที่ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว

8.2 บำบัดโดยปลูกธูปฤาษี

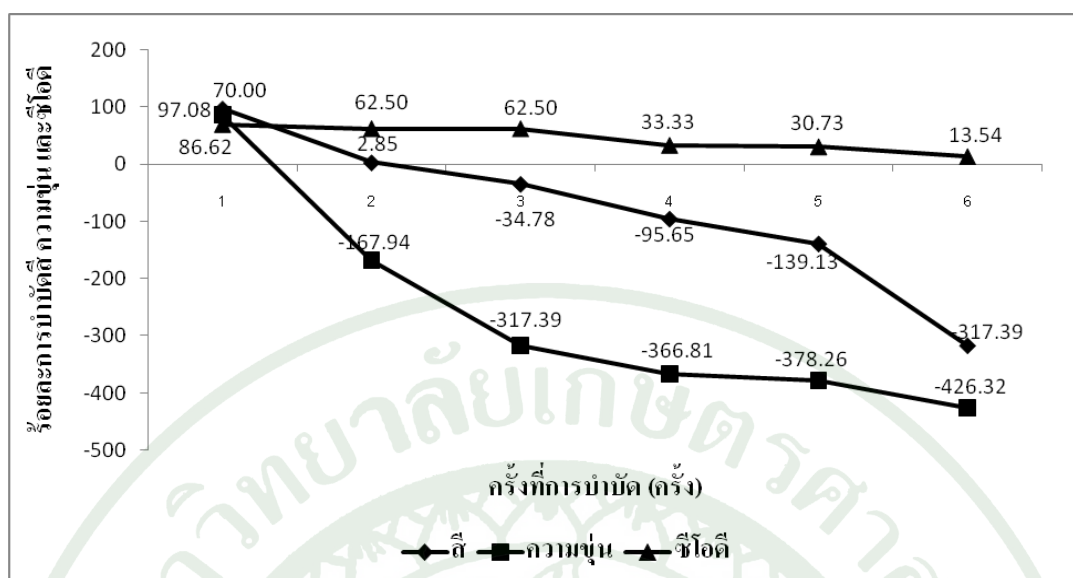
การทดลองการบำบัดน้ำเสียแบบหญ้ากรองน้ำเสีย ร่วมกับการปลูกธูปฤาษี ดังภาพที่ 46 ทำการทดลองเช่นเดียวกับกกกลม โดยเปรียบเทียบระหว่าง ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินในอัตราส่วน 1:10 และใช้ดินเป็นวัสดุปลูกเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 46 ธูปฤาษีแช่ขังในน้ำเสีย

8.2.1 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูก

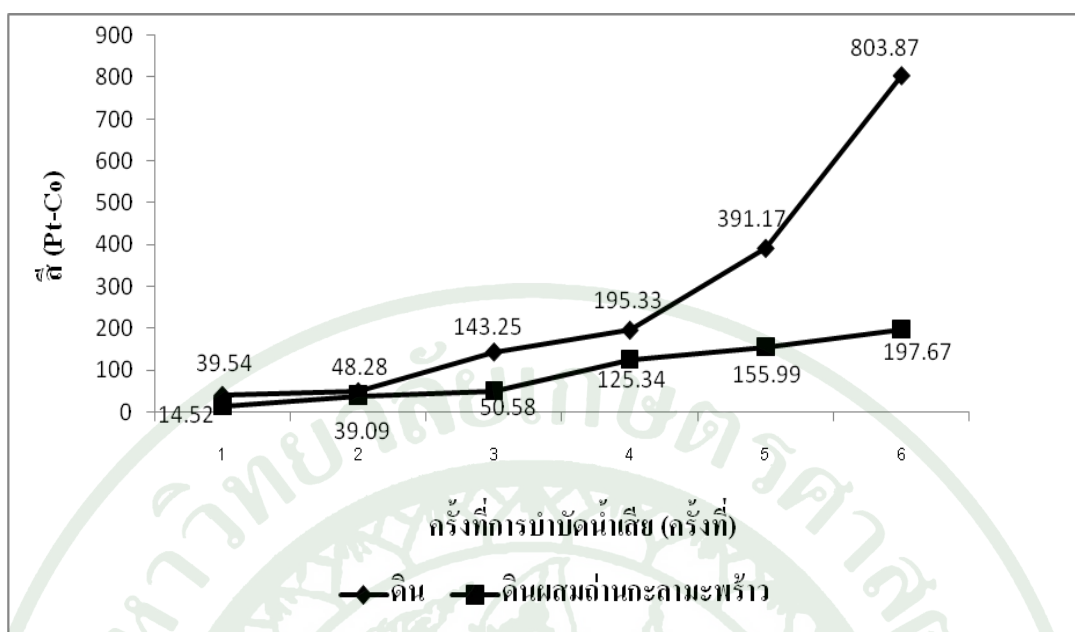
จากผลการทดลองพบว่า ในครั้งที่ 1 ให้ประสิทธิภาพการบำบัด สี ความขุ่น และ ซีไอดีได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 97.08 ,86.62 และ 70.00 ตามลำดับ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดลดลงอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 6 ดังภาพที่ 47 เนื่องจาก พื้นที่ผิวสัมผัสของชั้นวัสดุปลูก ถูกครอบครองด้วยโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจนอึดตัวในครั้งแรก หลังจากนั้นในครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 6 สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ไม่สามารถถูกดูดซับได้ นอกจากนี้ยังเกิดจากการชะสารปนเปื้อนที่อยู่ในชั้นวัสดุออกมาด้วยจึงทำให้การบำบัดในครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 6 ไม่มีประสิทธิภาพ



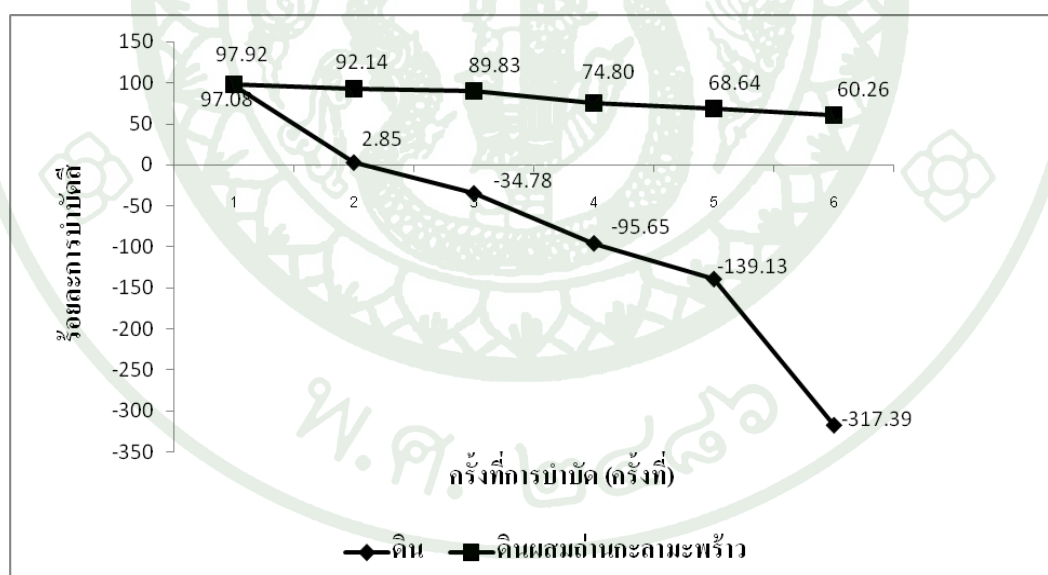
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซี ความชื้น และ ซีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียแบบหมุนเวียนน้ำเสียที่ปลูกต้นรูปถ่าย

8.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดที่ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินเป็นวัสดุปลูก

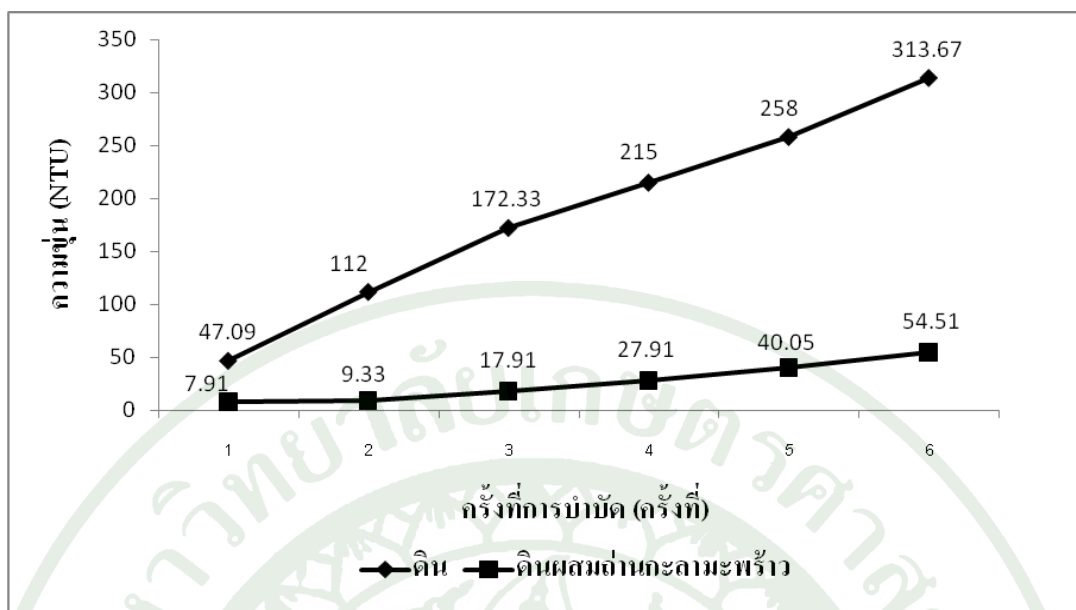
จากการ ศึกษาทดลอง ที่มีการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินปลูกรูปถ่ายทำการทดลองเช่นเดียวกับปลูกกกกล่ม พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด ได้ดีที่ร้อยละ 97.92 ในขณะที่ชุดทดลองที่มีดินเพียงอย่างเดียว มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ร้อยละ 97.08 ดังภาพที่ 49 ค่าความชื้นในชุดทดลองที่มีดินเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพ ร้อยละลดลงอย่างต่อเนื่องโดยค่าการบำบัดสูงสุดเท่ากับร้อยละ 86.62 และประสิทธิภาพค่าความชื้นในชุดทดลองที่มีถ่านกะลามะพร้าว ผสมดินที่ร้อยละ 91.79 ดังภาพที่ 51 และค่าซีโอดีที่มีการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินมีประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 91.25 แต่ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในชุดทดลองที่มีดินเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดที่ร้อยละ 70.00 ดังภาพที่ 53 และประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งถึงการบำบัดครั้งที่ 5 น้ำเสียเริ่มมีค่าซีโอดีเกินมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ดังนั้นชุดทดลองที่มีการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน จะให้ค่าซี ความชื้น และซีโอดี ได้ดีกว่าชุดทดลองที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามวิธีการบำบัดนี้ไม่สามารถบำบัดให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภคได้



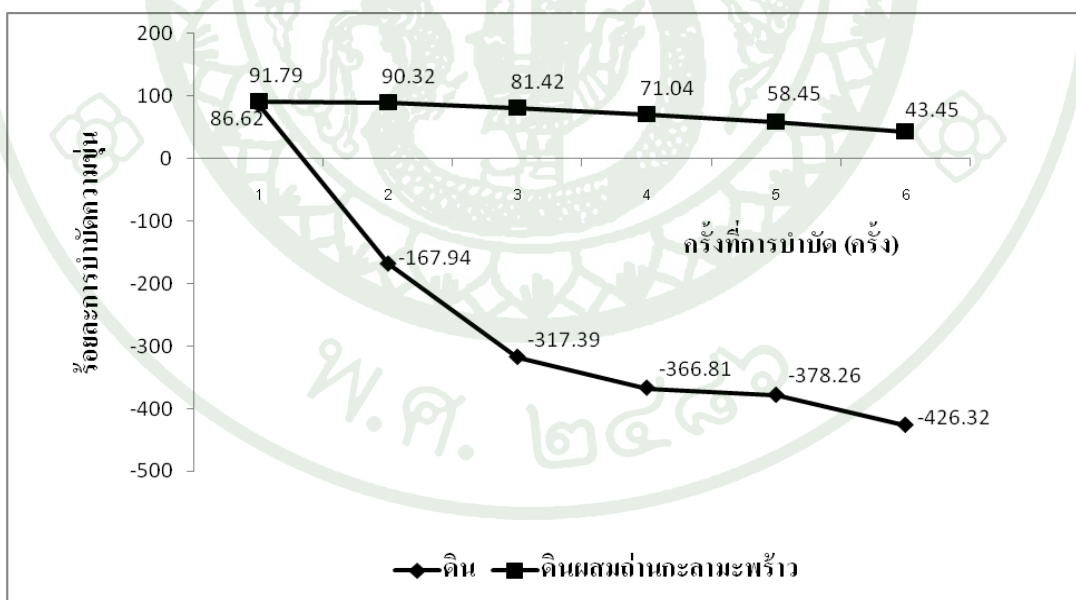
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกหญ้าโดยที่ใช้ถ่านกลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



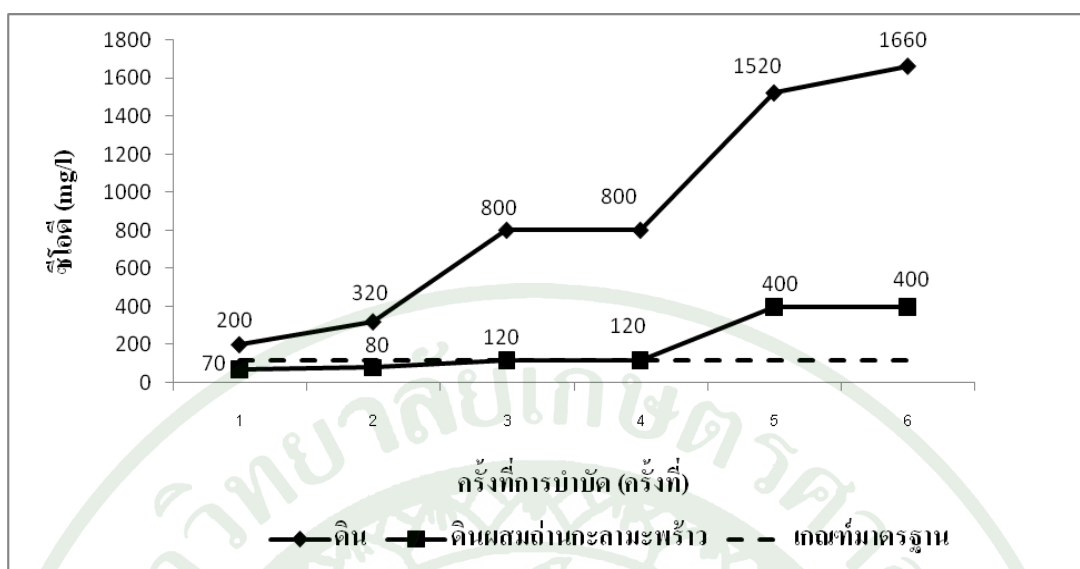
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกหญ้าโดยที่ใช้ถ่านกลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



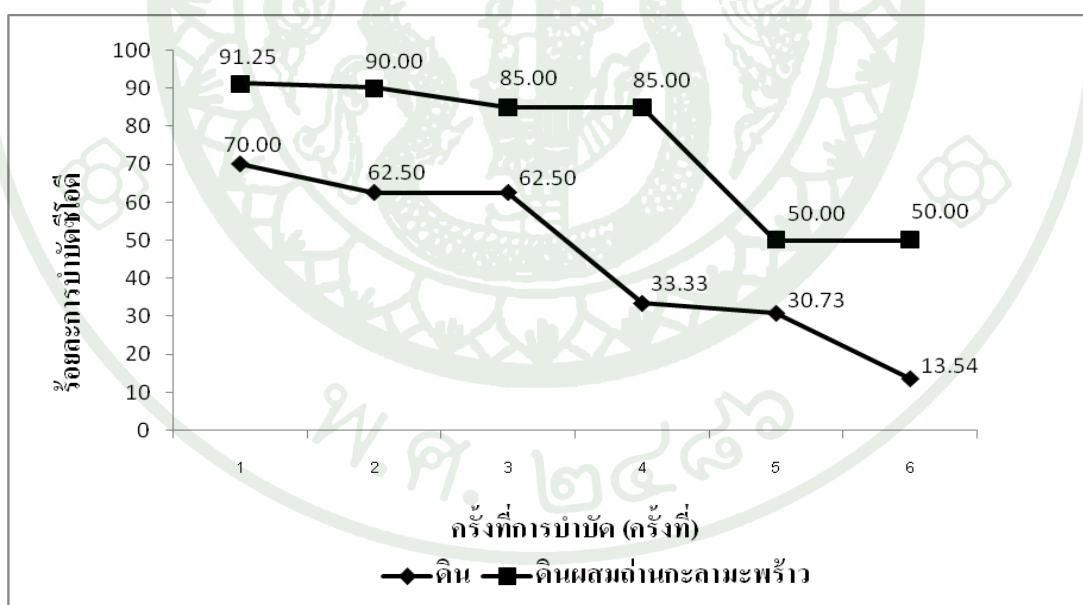
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่น กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างการบำบัดความขุ่น กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกธูปฤาษีโดยที่ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว

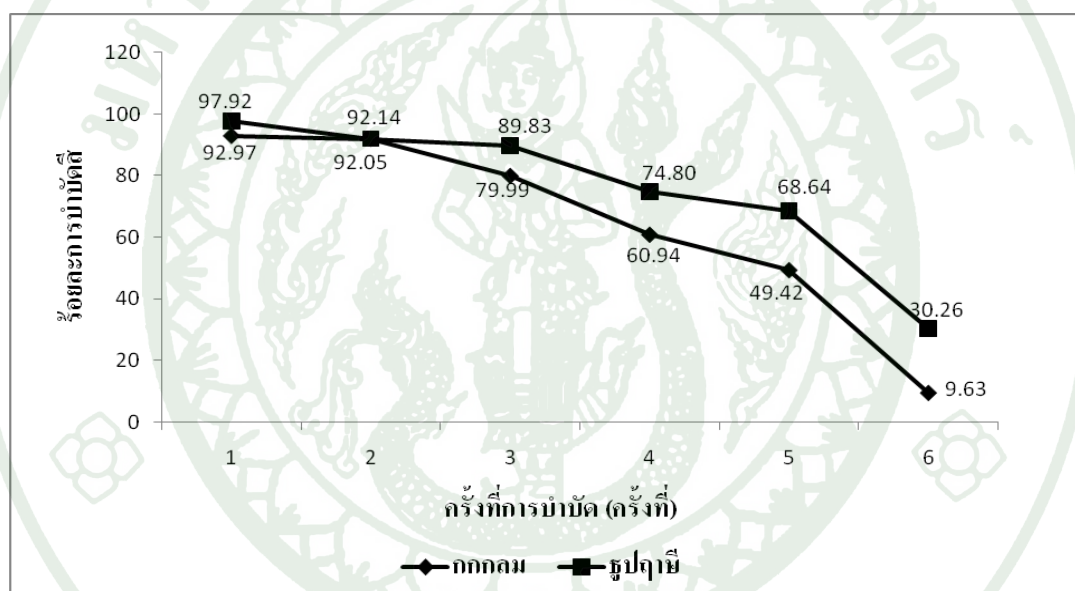


ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่ปลูกธูปฤาษีโดยที่ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน กับที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว

8.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างกกกลม และรูปฤาษีโดยใช้ดินผสมถ่าน กะลามะพร้าวเป็นวัสดุปลูก

8.3.1 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

ผลการทดลองพบว่ากกกลม และรูปฤาษีมีประสิทธิภาพการบำบัด สีดีที่สุดที่ร้อยละ 92.97 และ 97.92 จากนั้นประสิทธิภาพลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถบำบัดได้ 3 ครั้ง หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 54 จะเห็นว่ารูปฤาษีมีประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่ากกกลมในทุกครั้งที่บำบัด

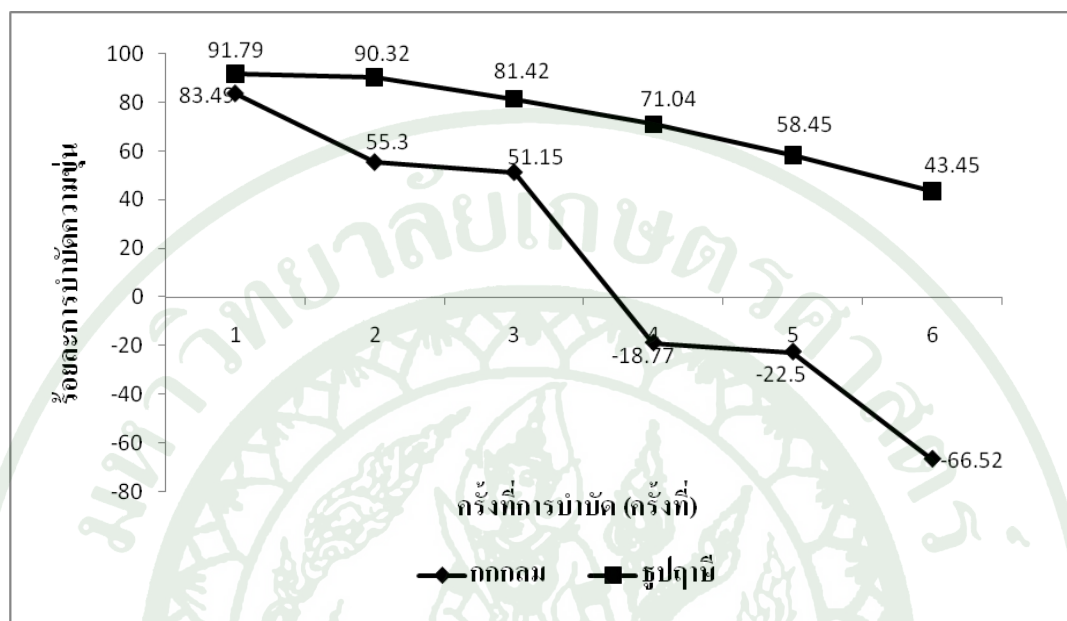


ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหล้ากรอง
น้ำเสียที่ปลูกกกกลมและรูปฤาษี

8.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่น

ผลการทดลองพบว่าใน การบำบัด ครั้งที่ 1 รูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการบำบัดความขุ่นสูงได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 91.79 หลังจากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนเหลือร้อยละ 43.45 โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดที่เหมาะสมประมาณ 5 ครั้ง ในขณะที่กกกลมมี

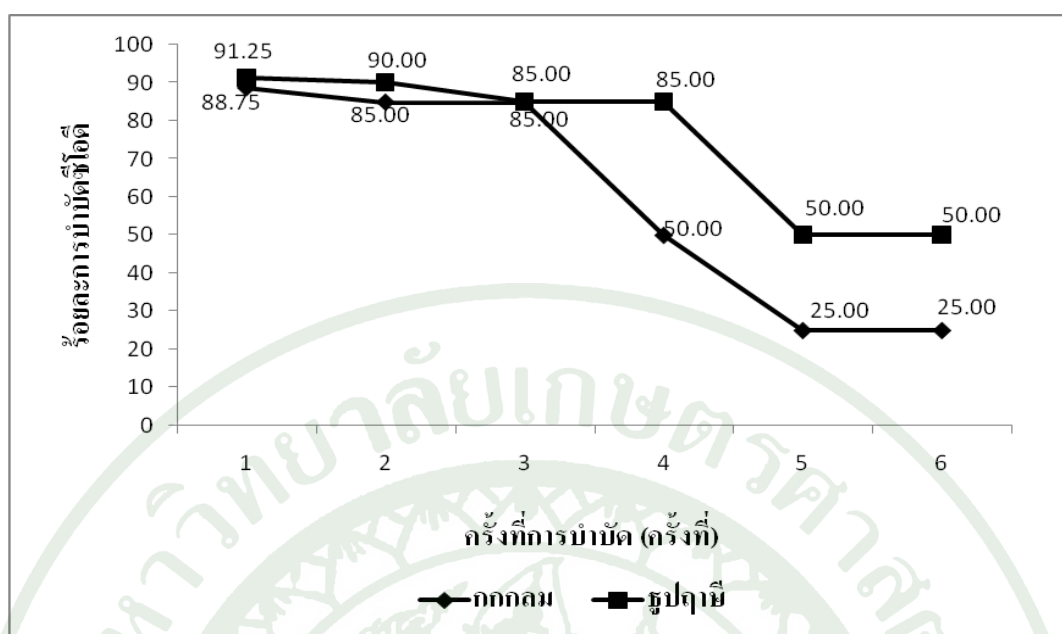
ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดที่ร้อยละ 83.49 และจะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วกว่ารูปถ่าย ดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ
หน่วยกรองน้ำเสียที่ปลูกกกกลมและรูปถ่าย

8.3.3 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีระหว่างกกกลมและรูปถ่าย

ผลการทดลองพบว่ารูปถ่ายให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุดในการครั้งที่ 1 ที่ร้อยละ 91.25 และมีประสิทธิภาพลดลงเล็กน้อยตั้งแต่ครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 4 และสามารถบำบัดได้ประมาณ 5 ครั้ง ในขณะที่กกกลมให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุดร้อยละ 88.75 และสามารถบำบัดได้เพียง 3 ครั้งเท่านั้น ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 56 ดังนั้นรูปถ่ายจึงมีประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดีได้ดีกว่ากกกลม เนื่องจากใบอ่อนของรูปถ่ายมีความสามารถในการลำเลียงออกซิเจนจากบรรยากาศ ผ่านกาบใบมาปล่อยบริเวณรากอ่อน ทำให้บริเวณรอบรากมีออกซิเจนแพร่ออกมา ส่งผลให้มีปริมาณจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ย่อยสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียให้เป็นสารอนินทรีย์ที่พืชสามารถดูดไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เพื่อสร้างเนื้อเยื่อให้เจริญเติบโตได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับครั้งที่การบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหมุนเวียนน้ำเสียที่ปลูกกกกลมและรูปทแยง

8.4 ชุดควบคุม

การทดลอง 8.4 เป็นการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียจากโรงงานฝัก กาดคองในระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อศึกษาว่า มีการชะสี ความขุ่นและชีโอดีออกมาจากวัสดุปลูกหรือไม่ พบว่า น้ำกลั่นที่ผ่านชั้นวัสดุเพาะปลูกจากการทดลองไม่ได้ชะสี สารที่ทำให้เกิดสีออกมา แต่ชะสารอินทรีย์บางชนิดออกมาทำให้ชีโอดีเพิ่มขึ้นเป็น 28.8 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ด้วยข้อดีของระบบบำบัดนี้ ชั้นวัสดุเพาะปลูกของการทดลองเป็นดินนา ทราบและกรวด ทำให้เกิดการชะสีเจือปนทั้งที่เป็น สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ออกมา จึงส่งผลให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความขุ่น พิเศษ ค่าการนำไฟฟ้าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้และความเค็มสูงกว่าผลวิเคราะห์น้ำกลั่นเริ่มต้น ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยชุดควบคุม

พารามิเตอร์	ผลวิเคราะห์น้ำ กลั่น	ผลวิเคราะห์น้ำหลังผ่านระบบบำบัด	
		การบำบัดร่วมกับกกกลม	การบำบัดร่วมกับ รูปถ่าย
pH	7.00	7.70	7.60
Color (Pt-Co Unit)	0.001	0.026	0.021
EC ($\mu\text{S}/\text{cm.}$)	404.00	756.00	714.00
TDS (mg/L)	274.00	923.00	849.00
Sal (ppt.)	0.00	1.20	0.90
Turbidity (NTU)	0.20	1.66	1.52
COD (mg/L)	0.00	28.80	28.80

9. คุณภาพน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูนร่วมกับระบบ หล้ำกรองน้ำเสีย

เมื่อนำน้ำเสียจากโรงงานฝักกาดอง มาปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน และมาบำบัดต่อด้วยระบบหล้ำกรองน้ำเสียที่ปลูกพืชบำบัดคือ กกกลม และ รูปถ่าย และเปรียบเทียบระหว่างการ
ใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วน 1:10 กับใช้ดินเพียงอย่างเดียวเป็นวัสดุปลูก เมื่อนำน้ำที่
ผ่านการบำบัดดังกล่าวมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำได้ผล ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบหมักกรองน้ำเสียด้วยกก
กลมและรูปถ่าย

พารามิเตอร์	คุณภาพ	คุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัด				ค่ามาตรฐาน
	น้ำ	กระบะที่ใช้ดินเพียง		กระบะที่ใช้ดินผสม		น้ำทิ้งโรงงาน
	โรงงาน	อย่างเดียว		ถ่านกะลามะพร้าว		อุตสาหกรรม
	ผักกาด	กกกลม	รูปถ่าย	กกกลม	รูปถ่าย	และนิคม
	ดอง เริ่มต้น	อุตสาหกรรม				
pH	4.50	7.00	7.20	7.10	7.30	5.5 – 9.0
Color (Pt-Co Unit)	497.42	84.08	39.54	34.96	14.52	5-15*
EC (μS/cm.)	25,500	18,100	18,910	15,510	16,760	-
TDS (mg/L)	26,400	15,420	15,970	13,470	14,270	ไม่เกิน 3,000
Sal (mg/L)	22	11.10	15.10	9.10	8.85	2,000
Turbidity (NTU)	1,148	27.91	47.09	15.91	7.91	5-20*
COD (mg/L)	5,840	240.00	196.32	90.00	70.00	ไม่เกิน 120
Temperature (C°)	28.5	27.80	28.50	28.80	28.20	ไม่เกิน 40

* ค่ามาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภค

จากผลการศึกษาพบว่ากระบะที่ใช้ดินผสมถ่านกะลามะพร้าวให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่ากระบะที่ใช้ดินเพียงอย่างเดียว และรูปถ่ายสามารถบำบัดได้ดีกว่ากกกลม สรุปได้ว่ากระบะที่ใช้ดินผสมถ่านกะลามะพร้าวและปลูกรูปถ่ายให้ประสิทธิภาพการบำบัดดีที่สุด โดย น้ำที่ผ่านการบำบัดเมื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพน้ำ พบว่าเกือบทุกพารามิเตอร์ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 6 ยกเว้น ค่า TDS อาจเนื่องมาจากในน้ำดิบมีค่า TDS ที่สูงมากเกินกว่าระบบบำบัดจะบำบัดได้หมด และสามารถบำบัดได้ EC TDS ความเค็ม ความขุ่น และซีโอดีได้ร้อยละ 97.08, 34.28, 45.95, 59.77, 99.30 และ 91.25 ตามลำดับ ส่วนกกกลมจะมีข้อด้อยในการบำบัดได้ต่ำกว่ารูปถ่าย เนื่องจากรูปถ่ายมีการเจริญเติบโตและแตกหน่อได้ดีกว่ากกกลม ส่งผลให้การกรองด้วยรากพืชสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้ดี

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผักกาดคองพบว่าคุณภาพน้ำเสียของโรงงาน ผักกาดคองก่อนได้รับการบำบัดมีค่าพีเอช ของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ และค่าซีโอดี เกินเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม มากและมีค่าความเค็ม การนำไฟฟ้า สีและความขุ่นสูง เมื่อนำมาปรับ ลดความเป็นกรดด้วยหินปูนพบว่าที่อัตราส่วนหินปูน 60 กิโลกรัมต่อน้ำเสีย 60 ลิตรในระยะเวลา 9 วันสามารถลดความเป็นกรด ในน้ำเสียได้เหมาะสมที่สุดโดยมี พีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 6.70 และการ ทดลองแบบแบคซ์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการบำบัด พบว่าปริมาณถ่านกะลามะพร้าว 12 กรัม ต่อ ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการปรับลดความเป็นกรดด้วยหินปูน 50 มิลลิลิตร และระยะเวลาการสัมผัส 5 วันมีประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่นและ ซีโอดี ได้ดีที่สุดที่ร้อยละ 70.80, 78.28 และ 70.00 ตามลำดับ โดยมีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และแบบฟรุนดลิช นอกจากนี้ที่อัตราส่วน 1:10 ของถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดิน ให้ประสิทธิภาพการ ลด สี ความขุ่น และซีโอดี ได้ที่ร้อยละ 75.00, 72.05 และ 73.00 ส่วนผลการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการจำลอง ชั้นวัสดุปลูกของ ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม และระบบบ่อกำจัดน้ำเสีย และเมื่อทำการบำบัดน้ำเสียแบบ ระบบบ่อกำจัดน้ำเสีย พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัด ที่ดีกว่าวิธีการบำบัดแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

การทดลองในหน่วยย่อยขนาดเล็กด้วยระบบบ่อกำจัดน้ำเสียโดยมี ชุดทดลองที่เป็นถ่านกะลามะพร้าวผสมดินในอัตราส่วน 1:10 กับชุดทดลองที่มีดินเพียงอย่างเดียว พบว่า ชุดทดลองที่มีถ่านกะลามะพร้าวผสมดินมีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดี ได้ดีกว่าชุดทดลองที่มีดินเพียงอย่างเดียว แสดงว่าถ่านกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารต่างๆ ได้ดี และเมื่อนำดินผสมถ่านกะลามะพร้าวมา ปลูกพืชบำบัด 2 ชนิด คือ กกกลม และ ฐปญายี จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด น้ำเสีย ได้ดียิ่งขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสี ความขุ่น และซีโอดีของพืชทั้งสองชนิด คือ กกกลมและฐปญายี พบว่า ฐปญายีมีประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีที่ร้อยละ 97.92, 91.79 และ 91.25 ตามลำดับ และในส่วนของกกกลมให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสี ความขุ่นและซีโอดีได้ดีที่สุด คือ ร้อยละ 92.97, 83.49 และ 88.75 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การบำบัดน้ำเสียที่รวมกับการปลูกฐปญายี ให้ ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าการปลูกกกกลม แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพน้ำที่ผ่านการบำบัดไม่ว่าจะปลูกต้น

กกกลมหรือรูปทรงแบบพารามิเตอร์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม แต่กกกลมไม่สามารถบำบัดสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำเพื่อการบริโภคได้

จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฝักกาดอง โดยการปรับสภาพด้วยหินปูน ร่วมกับระบบบำบัดแบบธรรมชาติในระดับห้องปฏิบัติการนี้ สามารถนำไปใช้ กับโรงงานฝักกาดองในระดับครัวเรือน ได้จริง เนื่องจาก น้ำที่ผ่านการบำบัดมีคุณภาพที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน น้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม และเป็นเทคโนโลยีธรรมชาติที่สามารถประยุกต์ให้เข้ากับท้องถิ่นได้

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาอัตราส่วนของหินปูน กับปริมาณน้ำเสียที่เหมาะสม
2. ควรมีการปรับขนาดของหินปูนให้มีความสม่ำเสมอเพื่อลดระยะเวลาในการเพิ่มพีเอช
3. ชั้นวัสดุปลูกที่หมดยุการใช้งานควรนำมาตากแดด หรือนำไปฝังกลบ
4. เมื่อพีชที่ใช้ในการบำบัดมีการเจริญเติบโตเต็มที่ควรมีการเก็บเกี่ยวเพื่อนำไปใช้ในการจักสานงานหัตถกรรม หรือนำไปตกแต่งซุ้มงานพิธีมงคลต่างๆ หรือนำไปตัดแปลงเพื่อสร้างรายได้
5. โครงสร้างของดินแต่ละชนิดมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและการดูดซับน้ำเสียที่แตกต่างกันดังนั้นถ้าจะหาดินที่จะนำมาปลูกในท้องถิ่นนั้นๆต้องมีการทดลองหาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียและผลต่อการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละพื้นที่นั้นๆด้วย
6. ความเต็มของน้ำเสียของโรงงานฝักกาดองมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชทำให้การเจริญเติบโตของพืชไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นควรมีการศึกษาหาพืชที่เจริญเติบโตที่ทนต่อความเต็มได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรมและสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. 2545. **ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.
- กองสำรวจดิน. 2519. **งานสำรวจดิน**. กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- กิตติ เอกอำพน และ ลำอาน หอมชื่น. 2529. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้กกกลมและผักตบชวา. ใน **เอกสารการประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 4**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2534. **สถิติการปลูกผักทั่วประเทศปีเพาะปลูก 2530/31-2533/34**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- จรงค์ ผลประเสริฐ. 2543. ระบบบำบัดแบบธรรมชาติ สำหรับการควบคุมมลพิษ และการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่. **วารสารวิทยาศาสตร์** 54(5): 272-287.
- จิตติมา เชื้อกุล. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ต้นพุทธรักษาในพื้นที่ชุ่มน้ำประดิษฐ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- จุฑามาศ พุ่มศิริ. 2554. **ผลการใช้กกกลม กล้วย และพุทธรักษา ในการบำบัดคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงไฟฟ้าราชบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ฐปนา ชื่นบาล. 2548. **โครงการการคัดแยกและผลิตเบคทีเรียทนเค็มที่สามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผักและผลไม้ดอง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ดวงพร คันธโชติ. 2542. **อนุกรมวิธานของแบคทีเรียและปฏิบัติการ**. โอ.เอส.พรินติ้ง, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บุษยา มากกลด. 2555. การดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำทิ้งจากโรงงานย้อมผ้า โครงการพัฒนาโดย
ด้วยผงบิผักตบชวาและถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัฒน์ จันทร์โรทัย. 2536. ข้อพิจารณาในการใช้พืชน้ำปรับปรุงคุณภาพน้ำ.
วารสารวิทยาศาสตร์ 11(3): 154-157.

เพ็ญจันทร์ คำบาง. 2553. การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลายด้วยถ่านกกกลมและถ่าน
กะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มูลนิธิชัยพัฒนา. 2543. คู่มือเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียตามแนวพระราชดำริ.
วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รอยพิมพ์ อินตะยศ. 2549. การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการหมักดอกผักโดยสาหร่ายสไปรูลินา
(*Spirulina platensis*). วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

รัตนา ตีร์รัตนกรณ. 2542. การกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ระบบบำบัดบึงประดิษฐ์แบบน้ำขัง
ใต้ดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อวยพร บัวใบ. 2531. การศึกษาประสิทธิภาพของถังกรองที่ใช้ทรายและถ่านกะลามะพร้าว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,

Amuda, O.S., A.A. Giwa and I.A. Bello. 2007. Removal of heavy metal from industrial
wastewater using modified activated coconut shell carbon. **Biochemical Engineering
Journal**. 36: 174-181.

- Boyde, C.E. 1970. Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Waters. **Econ. Bot.** 2444: 94-103.
- Buckley, C.A. 1992. Membrane Technology for the Treatment of Dyehouse Effluents. **Wat Sci.Tech.** 25: 203-209.
- Hawer, W.D.S. 1993. **Changes in taste and flavour compound of kimchi during fermentation.** Korean. J.Food Sci and Technol. 25(5) : 118-222.
- Johnson, A.T. 1989. The theory of Coloration of Textiles. **Society of Dyes and Colorist.** 90: 912-920.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. **Treatment Wetlands, Lewis Publishers.** Boca Raton, FL.
- Kubo, M., J. Hiroe, M. Murakami, H. Fukami and T. Tachiki. 2001. Treatment of hypersaline-containing wastewater with salt-tolerant microorganisms. **Journal of Bioscience & Bioengineering.** 91: 222-224.



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าวที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
7	1.56	1.55	1.56	1.56	36.00
8	1.41	1.33	1.34	1.36	44.00
9	1.17	1.17	1.16	1.17	52.00
10	0.94	0.99	0.98	0.97	60.00
11	0.80	0.80	0.79	0.80	67.00
12	0.73	0.73	0.73	0.73	70.00
13	0.75	0.73	0.71	0.73	70.00
14	0.80	0.80	0.79	0.80	67.00
15	0.91	0.93	0.92	0.92	62.00
16	0.92	0.92	0.92	0.92	62.00

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ การบำบัดความชุ่ม กับปริมาณถ่านกะลามะพร้าว ที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดความ ชุ่ม
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
7	6.30	6.29	6.25	6.28	34.81
8	6.04	6.04	6.03	6.04	37.35
9	5.96	5.96	5.96	5.96	38.19
10	5.53	5.49	5.48	5.50	42.99
11	5.04	5.04	5.03	5.04	47.73
12	4.83	4.83	4.80	4.82	49.98
13	4.79	4.79	4.80	4.79	50.35
14	4.59	4.55	4.57	4.57	52.55
15	4.45	4.49	4.50	4.48	53.55
16	4.36	4.37	4.35	4.36	54.76

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับปริมาณ ถ่านกะลามะพร้าว ที่เหมาะสม

ปริมาณถ่านกะลามะพร้าว (กรัม)	ร้อยละ การบำบัดชีโอดี
7	25
8	25
9	25
10	25
11	25
12	50
13	48
14	45.75
15	45
16	32.5

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละ การบำบัดชีโอดี
1	54.73
2	60.00
3	67.08
4	67.08
5	70.80
6	50.62

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่ม กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละ การบำบัดความชุ่ม
1	39.20
2	52.50
3	63.08
4	67.43
5	78.28
6	72.86

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาที่เหมาะสม (วัน)

ระยะเวลาสัมผัส (วัน)	ร้อยละของการบำบัดชีโอดี
1	30
2	40
3	40
4	50
5	70
6	50

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดินใน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1:10	2.72	2.71	2.72	2.72	75.00
1:20	3.49	3.52	3.51	3.51	68.00
1:30	4.06	4.06	4.05	4.06	60.00
1:40	5.43	5.45	5.46	5.45	50.00
1:50	5.98	5.99	5.99	5.99	45.00
1:60	5.98	6.20	6.10	6.10	44.00
1:70	7.41	7.41	7.41	7.41	32.00

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัด ความขุ่น ของถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน ในอัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ร้อยละ การบำบัดความขุ่น
1:10	72.05
1:20	68.84
1:30	65.07
1:40	60.99
1:50	56.39
1:60	50.06
1:70	45.50

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี ของ ถ่านกะลามะพร้าวผสมดิน ใน อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ถ่านกะลามะพร้าว : ดิน	ร้อยละของการบำบัดชีโอดี
1:10	73.00
1:20	73.00
1:30	74.60
1:40	74.60
1:50	73.90
1:60	74.00
1:70	74.00

ตารางผนวกที่ 10 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกะลามะพร้าว

ปริมาณ ถ่าน กะลามะพร้าว (กรัม)	Co	C	V	q	1/q	1/C	log q	log C
7	10.9	1	0.05	0.070	14.14	1	-1.15	0
8	10.9	0.8	0.05	0.063	15.84	1.25	-1.19	-0.096
9	10.9	0.7	0.05	0.056	17.64	1.42	-1.24	-0.154
10	10.9	0.7	0.05	0.051	19.60	1.42	-1.29	-0.154
11	10.9	0.6	0.05	0.046	21.35	1.66	-1.32	-0.221
12	10.9	0.6	0.05	0.04	23.30	1.66	-1.36	-0.221
13	10.9	0.5	0.05	0.037	25.00	2	-1.39	-0.301
14	10.9	0.5	0.05	0.035	26.92	2	-1.43	-0.301
15	10.9	0.4	0.05	0.032	28.57	2.5	-1.45	-0.397
16	10.9	0.4	0.05	0.033	30.47	2.5	-1.48	-0.397

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	3.25	3.25	3.25	3.25	70.19
2	3.80	3.78	3.80	3.80	65.08
3	5.38	5.38	5.37	5.38	50.62
4	10.31	10.35	10.32	10.31	5.35
5	-12.09	-12.10	-12.12	-12.11	-11.11
6	-17.02	-17.04	-17.03	-17.04	-56.38

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดความขุ่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	3.26	3.24	3.25	3.26	66.14
2	7.88	7.89	7.89	7.89	18.07
3	8.24	8.24	8.24	8.24	14.45
4	8.47	8.45	8.46	8.47	12.04
5	9.64	9.64	9.64	9.64	-15.66
6	14.05	14.03	14.04	14.05	-45.78

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (ชั่วโมง)	ร้อยละของการบำบัดชีโอดี
1	60
2	50
3	40
4	30
5	20
6	20

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดชีโอดี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	3.13	3.11	3.14	3.14	71.19
2	3.58	3.56	3.57	3.58	67.08
3	5.38	5.37	5.38	5.38	50.62
4	5.93	5.91	5.94	5.93	45.55
5	6.59	6.58	6.59	6.59	39.45
6	8.15	8.15	8.15	8.15	25.15

ตารางผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัด ความขุ่น กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดความขุ่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	3.26	3.26	3.26	3.26	66.14
2	3.97	3.95	3.98	3.97	58.74
3	3.76	3.70	3.70	3.76	60.99
4	3.99	3.89	4.09	3.99	58.51
5	4.45	4.50	4.43	4.46	53.68
6	4.83	4.80	4.86	4.83	49.83

ตารางผนวกที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับระยะเวลาการเก็บน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัดซีโอดี
1	85
2	75
3	62.5
4	50
5	50
6	37.5

ตารางผนวกที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสีกับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.20	0.21	0.20	0.21	92.97
2	0.22	0.23	0.23	0.23	92.05
3	0.52	0.52	0.51	0.52	79.99
4	0.99	0.95	0.97	0.97	60.94
5	1.29	1.23	1.20	1.24	49.42
6	2.23	2.19	2.18	2.20	9.63

ตารางผนวกที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่นกับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสมกับดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดความขุ่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	15.90	15.93	15.90	15.91	83.49
2	43.12	43.07	43.08	43.09	55.30
3	44.19	50.01	47.07	47.09	51.15
4	114.27	114.48	114.75	114.50	-18.77
5	118.27	118.01	117.99	118.09	-22.50
6	160.00	160.55	160.50	160.53	-66.52

ตารางผนวกที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ถ่านกะลามะพร้าวผสม
กับดินร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัดชีโอดี
1	88.75
2	85
3	85
4	50
5	25
6	25

ตารางผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดี กับการใช้ดินอย่างเดียวร่วมกับการ
ปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดชีโอดี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.42	0.41	0.49	0.44	83.09
2	0.84	0.85	0.85	0.85	66.09
3	0.97	0.97	0.97	0.97	60.77
4	1.00	0.99	1.00	1.00	59.80
5	2.35	2.34	2.35	2.35	2.93
6	3.90	3.89	3.90	3.90	-61.81

ตารางผนวกที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความชุ่มชื้น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	27.91	27.91	27.90	27.91	71.04
2	69.99	71.40	72.66	71.35	25.98
3	102.25	102.20	102.30	102.25	-6.07
4	162.54	162.50	162.49	162.51	-68.58
5	316.01	316.02	316.00	316.01	-227.81
6	452.51	452.50	452.52	452.52	-369.42

ตารางผนวกที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดชีโอดีกับการใช้ดินเพียงอย่างเดียวร่วมกับการปลูกพืช (กกกลม)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัดชีโอดี
1	70.00
2	33.33
3	29.69
4	18.75
5	13.54
6	13.21

ตารางผนวกที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดสี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดสี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.11	0.11	0.11	0.11	97.92
2	0.20	0.23	0.21	0.22	92.14
3	0.28	0.28	0.28	0.28	89.83
4	0.65	0.67	0.60	0.64	74.80
5	0.79	0.78	0.79	0.79	68.64
6	0.98	0.99	0.99	0.99	60.26

ตารางผนวกที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความขุ่น กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าวร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าความขุ่น			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดความขุ่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	7.91	7.91	7.90	7.91	91.79
2	9.33	9.33	9.34	9.33	90.32
3	17.91	17.92	17.90	17.91	81.42
4	27.90	27.93	27.90	27.91	71.04
5	40.12	40.04	39.99	40.05	58.45
6	54.54	54.49	54.50	54.51	43.45

ตารางผนวกที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดี กับดินผสมถ่านกะลามะพร้าว
รวมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัดซีโอดี
1	91.25
2	90
3	85
4	85
5	50
6	50

ตารางผนวกที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซี กับการใช้ดินอย่างเดียรรวมกับการปลูก
พืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ค่าการดูดกลืนแสง			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การบำบัดซี
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.23	0.23	0.23	0.23	92.05
2	0.27	0.27	0.27	0.27	90.29
3	0.73	0.72	0.73	0.73	71.20
4	0.97	0.97	0.97	0.97	60.73
5	1.91	1.92	1.92	1.92	21.36
6	3.89	3.91	3.90	3.90	-61.60

ตารางผนวกที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดความชุ่มชื้นกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละ การบำบัดความชุ่มชื้น
1	51.15
2	-16.18
3	-78.76
4	-123.02
5	-167.63
6	-225.38

ตารางผนวกที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบำบัดซีโอดีกับการใช้ดินอย่างเดียรร่วมกับการปลูกพืช (รูปถ่าย)

ระยะเวลาสัมผัส (สัปดาห์)	ร้อยละของการบำบัดซีโอดี
1	75.46
2	60.00
3	0
4	0
5	-90.00
6	-107.50

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวพัชรณัฐ ชูดวงแก้ว
วัน เดือน ปี ที่เกิด	28 ธันวาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดฉะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต(เคมี) มหาวิทยาลัยบูรพา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-