



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับรูปถายีผสมกับดิน
เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำกรองน้ำเสีย

The Effective Removal of Formaldehyde in Wastewater by the Mixture of
Typha Angustifolia Adsorbent and Soil as Growing Materials in the Grass Filtration
Treatment System

นามผู้วิจัย นางสาวสุรางคนางค์ ทุมรัตน์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับรูปถาวยี่
ผสมกับดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสีย

The Effective Removal of Formaldehyde in Wastewater by the Mixture of *Typha Angustifolia*
Adsorbent and Soil as Growing Materials in the Grass Filtration Treatment System

โดย

นางสาวสุรางคนางค์ ทุมรัตน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุรางคนางค์ ทุมรัตน์ 2556: ประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับ
รูปถาวยีผสมกับดินเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสีย ปรินญาวิทยาศาสตร์
มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม.
72 หน้า

งานวิจัยนี้พัฒนาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ใน
น้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสีย รูปถาวยีตากแห้งและถาวยีเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลอง
แบบแบตช์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ, ระยะเวลาบำบัด และ
อัตราส่วนของตัวดูดซับต่อดินที่สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์เข้มข้น 20
มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า รูปถาวยีตากแห้งและถาวยี ปริมาณ 3 และ 4 กรัม ตามลำดับ ที่ระยะเวลา
บำบัด 60 และ 45 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 53.84 และ 71.74 ตามลำดับ

ในการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องพบว่า อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถาวยีต่อดินที่
เหมาะสมคือ 8:400 ให้ร้อยละของการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ 97.99 และ ไม่มีการคายซับหลังจากการแช่แข็ง
5 วัน นอกจากนี้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก เพื่อบำบัดน้ำเสีย
สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 40 ลิตร การทดลองในกระเบทรง
สี่เหลี่ยมขนาด 51x51x54 เซนติเมตร โดยบรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทราวยหยาบ 3 เซนติเมตร ทราวย
ละเอียด 2 เซนติเมตร และถาวยีผสมกับดิน(8:600) พบว่า สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ
98.36 ดังนั้นถาวยีผสมกับดินมีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัด
น้ำเสียสำหรับกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์

Surangkanang Tumrat 2013: The Effective Removal of Formaldehyde in Wastewater by the Mixture of *Typha Angustifolia* Adsorbent and Soil as Growing Materials in the Grass Filtration Treatment System. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananurak, M.Sc. 72 pages.

This aim of this research was to develop an effective adsorbent to enhance the removal efficiency of formaldehyde in wastewater by the grass filtration treatments system. Dried *Typha Angustifolia* and *Typha Angustifolia* charcoal were used as adsorbent. A batch experiment were conducted and the effecting parameters of adsorbent dosage, removal time and the ratio of adsorbent to soil on formaldehyde removal from 20mg/L of the formaldehyde solution were investigated. The results of dried *Typha Angustifolia* and *Typha Angustifolia* charcoal 53.84% and 71.74% of formaldehyde were removed respectively at 3 and 4 g of adsorbent dosage respectively and 60 and 45 min of removal time respectively.

A continuous flow experiment was performed and found that the suitable ratio by weight of *Typha Angustifolia* charcoal to soil was 8:400 for obtaining the percent removal of formaldehyde at 97.99% and no desorption after 5 days. In addition, the filtrated lysimeter techniques experiment with 40L of 20 ppm of the synthetic wastewater and growing *Typha Angustifolia* was carried out in square plastic tank size 51x51x54 cm that packed with gravel 7cm, coarse sand 3 cm, fine sand 2 cm and *Typha Angustifolia* charcoal with soil(8:600) found that 98.36% of formaldehyde were removed. Therefore, the mixture of *Typha Angustifolia* charcoal and soil has a high potential for utilizing as growing material in the grass filtration wastewater treatment system for removal of formaldehyde.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์คณิดา ตังคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ และสละเวลาในการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์วิทยาลัยสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและคำสั่งสอนแก่ผู้วิจัย เพื่อนำความรู้ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ รวมถึงขอขอบพระคุณวิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ วัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม รุ่น 34 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายและกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสหัส คุณแม่กัญญาพร ทุมรัตน์ รวมถึงคุณอรนุช เจียวก๊ก (น้ำสาว) และครอบครัวมโนศรี ผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับผู้วิจัย

สุรางคนางค์ ทุมรัตน์

มกราคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	55
สรุป	55
ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	60
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์	3
2 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์จากอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	50
3 ตารางค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ต่อจำนวนครั้งที่บำบัดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	51
 ตารางผนวกที่	
1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อปริมาณรูปฤาษิตากแห้ง	61
2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อปริมาณถ่านรูปฤาษี	61
3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อระยะเวลาสัมผัสของรูปฤาษิตากแห้ง	62
4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อระยะเวลาสัมผัสของถ่านรูปฤาษี	62
5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ของรูปฤาษิตากแห้ง	63
6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ต่อความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านรูปฤาษี	63
7 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปฤาษีต่อดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 1	64
8 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปฤาษีต่อดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 2	64
9 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปฤาษีต่อดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 3	65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
10 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 1	65
11 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 2	66
12 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 3	66
13 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 1	67
14 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 2	67
15 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 3	68
16 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 400 กรัม ครั้งที่ 1	68
17 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 400 กรัม ครั้งที่ 2	69
18 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 400 กรัม ครั้งที่ 3	69
19 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 600 กรัม ครั้งที่ 1	70
20 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 600 กรัม ครั้งที่ 2	70
21 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดิน 8: 600 กรัม ครั้งที่ 3	70
22 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาญี ต่อดินแบบผสมในกระเบะทดลองปลูก	71
23 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของดินในกระเบะควบคุม	71

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ	11
2	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	12
3	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว	13
4	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	13
5	การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้นและสี่ชั้น	15
6	การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	15
7	การเคลื่อนย้ายโมเลกุล	18
8	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	20
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง	21
10	กราฟความชันระหว่าง $\log q$ และ $\log c$	23
11	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรูนดิช	24
12	แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์	24
13	การดูดซับของแลงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว	25
14	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	26
15	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบท	27
16	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท	28
17	รูปถ่าย <i>Typha angustifolia</i> Linn.	29
18	ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับกรดโครโมโทปิก	37
19	กระบะปลูกและชั้นของกรวด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด และถ่านรูปถ่ายผสมดิน	40
20	ตัวดูดซับรูปถ่ายตากแห้งและถ่านรูปถ่าย	41
21	กราฟมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์	42
22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของรูปถ่ายตากแห้ง และถ่านรูปถ่าย	43
23	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาบำบัดกับร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของรูปถ่ายตากแห้ง และถ่านรูปถ่าย	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอร์มัลดีไฮด์กับร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของรูปถ่ายติดแห้ง และถ่านรูปถ่าย	45
25	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยรูปถ่ายติดแห้ง	46
26	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยรูปถ่ายติดแห้ง	46
27	ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านรูปถ่าย	47
28	ไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านรูปถ่าย	48
29	คอลัมน์บรรจุถ่านรูปถ่ายและดินในอัตราส่วน 8: 50, 8: 100, 8: 200, 8: 400 และ 8: 600	49
30	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับอัตราส่วนต่างๆของถ่านรูปถ่ายต่อดิน	50
31	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์จากอัตราส่วนต่างๆ	51
32	ความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ต่อจำนวนครั้งที่บำบัดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน	52
33	ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านรูปถ่ายต่อดินผสมในกระบะและกระบะควบคุมจำลองระบบหมุนเวียนน้ำเสีย	53
34	กระบะพลาสติกจำลองระบบหมุนเวียนน้ำเสียพร้อมต้นรูปถ่าย	54

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

LC_{50}	=	Median lethal concentration ความเข้มข้นของยาหรือสารที่ทำให้สัตว์ทดลองตายเป็นจำนวน 50% ของจำนวนเริ่มต้น
pH	=	ค่าความเป็นกรด-เบส
RSD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (Relative Standard Deviation)
SD	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับรูปถ่ายผสมกับดิน
เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดน้ำเสีย

The Effective Removal of Formaldehyde in Wastewater by the Mixture of *Typha*
Angustifolia Adsorbent and Soil as Growing Materials in
the Grass Filtration Treatment System

คำนำ

ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde) จัดเป็นมลพิษประเภทสารอินทรีย์ระเหยง่าย ไอระเหยของสารฟอर्मัลดีไฮด์เกิดผลเสียต่อสุขภาพอย่างรุนแรง โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจ ระบบประสาท อีกทั้งยังเป็นสารก่อเกิดมะเร็ง เช่นการระคายเคืองต่อการหายใจส่วนบน เคืองดวงตา จมูก ลำคอ อาจจะทำให้เกิดการติดขัดในการหายใจ ทำให้เกิดอาการน้ำมูกไหล น้ำตาไหล อีกทั้งยังส่งผลที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังด้วย ซึ่งจะเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ก่อให้เกิดโรคหอบหืด ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบประสาททำให้ผู้ที่ได้รับสารพิษนี้เข้าไปนั้น เกิดอาการวิงเวียน อ่อนเพลีย สมาธิและความทรงจำอาจจะเกิดความบกพร่อง และอารมณ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ฟอर्मัลดีไฮด์สามารถปนเปื้อนได้ทั้งในน้ำทิ้งและอากาศ โดยเฉพาะจากแหล่งอุตสาหกรรม เนื่องจาก มีการใช้ฟอर्मัลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้น ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์และสารเคมี ใช้เป็นตัวทำละลาย ตลอดจนเป็นผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์พลาสติก เช่น กระบวนการผลิตเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญที่ใช้ผลิตพอลิเมอร์ชนิด PET

ผู้วิจัยมีความสนใจนำวิธีธรรมชาติช่วยธรรมชาติ ในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำทิ้ง โดยจะนำตัวดูดซับชีวภาพ ที่เป็นวัสดุเหลือทิ้ง และต้องกำจัด ของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในระบบบำบัดน้ำเสีย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ ด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย โดยใช้วัสดุดูดซับรูปถาฐเป็นวัสดุปลูกผสมกับดิน
2. เพื่อนำผลการวิจัยในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของรูปถาฐของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนฟอร์มัลดีไฮด์



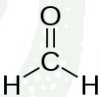
การตรวจเอกสาร

1. ฟอर्मัลดีไฮด์

1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

คุณสมบัติสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ หรือเรียกทั่วไปว่า “ฟอर्मาลิน” หมายถึง สารละลายที่ประกอบด้วยแก๊สฟอर्मัลดีไฮด์ประมาณ 37-50% โดยปริมาตร และมีเมทานอล ปนอยู่ด้วยประมาณ 10-15% ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde หรือ methanal) HCHO จัดเป็นแอลดีไฮด์ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยที่สุด สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟอर्मัลดีไฮด์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟอर्मัลดีไฮด์

สมบัติทางกายภาพและเคมี	รายละเอียด
1. ลักษณะทั่วไป	แก๊ส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน
2. สูตรโมเลกุล	CH_2O
3. สูตรโครงสร้าง	
4. มวลโมเลกุล	30.03 g/mol
5. ความหนาแน่น	0.815 g/L ที่ -20 องศาเซลเซียส
6. จุดเดือด	-19.1 องศาเซลเซียส
7. จุดหลอมเหลว	-92 องศาเซลเซียส
8. ความดันไอ	220 kPa ที่ 0 องศาเซลเซียส หรือ 5185 hPa ที่ 25 องศาเซลเซียส
9. การละลาย	ละลายได้ในน้ำ เอทานอล อีเทอร์ และอะซิโตน
10. แฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วย	1 มิลลิกรัม/ลิตร = 1.23-1.25 mg/m ³ ที่ 25 องศาเซลเซียส
11. ครึ่งชีวิต	1.71 วัน
12. CAS Number	50-0-0
13. ชื่อทางเคมี	Formaldehyde

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพและเคมี	รายละเอียด
14. ชื่ออื่นๆ	Formaldehyde solution, Formalin, Formalith, Formol, Formic aldehyde, Methadehyde, Morbicid, Oxomethane, Paraform, Methanal, Methylene oxide, Oxymethylene

หมายเหตุ CAS ย่อมาจาก Chemical Abstract Service

ที่มา: Office of Environmental Health Hazard Assessment [OEHHA] (2007); United Nations Environment Program [UNEP] (2002)

ในอุตสาหกรรมเตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับแก๊สออกซิเจน ภายใต้ อุณหภูมิสูง มีโลหะเงิน เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการ



ฟอร์มัลดีไฮด์มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง (จุดเดือด -21°C) มีกลิ่นฉุน ละลายในน้ำ ได้ดีมาก ไม่สามารถเก็บอยู่ในสภาพแก๊สได้ เนื่องจากมันจะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ $(\text{CH}_2\text{O})_n$ จึงเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายเข้มข้นร้อยละ 37-40 โดยปริมาตร เรียกสารละลายฟอร์มาลิน ใช้ฉีดศพเพื่อรักษา สภาพไม่ให้เน่าเปื่อย ใช้ดองพืชและสัตว์เพื่อการศึกษาทางชีววิทยาการแพทย์ ใช้ฆ่าเชื้อโรคและแมลง ใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์สำหรับผลิตสิ่งทอ ฉนวน พรม วัสดุที่ใช้แทนไม้และใช้เป็นตัวทำลายพลาสติก สารละลายฟอร์มาลินมีพิษ โดยก่อให้เกิดอาการระคายเคืองต่อตา จมูก ผิวหนัง ทำให้ปวดศีรษะและมึนงงได้ ถ้าให้สารละลายฟอร์มาลินค่อยๆ ระเหยออกไปอย่างช้าๆ โดยการลด ความดัน จะได้พอลิเมอร์สีขาวที่เรียกว่า พาราฟอร์มัลดีไฮด์ และจะถูกเปลี่ยนกลับเป็นฟอร์มัลดีไฮด์เมื่อ ได้รับความร้อน จึงสะดวกในการเก็บและขนส่งฟอร์มัลดีไฮด์ สารละลายฟอร์มาลินทำปฏิกิริยากับ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์แล้วทำให้เกิดการระเหยอย่างช้าๆ จะได้ผลึกที่เรียกว่า hexamethylenetetramine $((\text{CH}_2)_6\text{N})$ สารนี้ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในท่อปัสสาวะอักเสบ ในทางการค้าจะใช้ชื่อว่า Urotropin การปล่อยน้ำเสียที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ หาก

ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำที่มนุษย์ใช้อุปโภคบริโภค จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ดังนั้น การบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนจึงเป็นเรื่องสำคัญ

1.2 แหล่งกำเนิดฟอร์มาลดีไฮด์

การแพร่กระจายฟอร์มาลดีไฮด์ในบรรยากาศ สาเหตุหลักมาจากปฏิกิริยาโฟโตเคมี ออกซิเดชัน (photochemical oxidation) และการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แหล่งกำเนิดฟอร์มาลดีไฮด์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1.2.1 แหล่งกำเนิดฟอร์มาลดีไฮด์จากธรรมชาติ ฟอร์มาลดีไฮด์ปรากฏขึ้นจากกระบวนการธรรมชาติในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของมวลชีวภาพ เช่น ป่าและการเผาป่า ในแหล่งน้ำ ฟอร์มาลดีไฮด์เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์จากการได้รับแสงอาทิตย์

1.2.2 แหล่งกำเนิดฟอร์มาลดีไฮด์จากกิจกรรมของมนุษย์ การปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ จากกิจกรรมของมนุษย์สามารถจำแนกได้ 2 ชนิด คือทางตรง และทางอ้อม ดังนี้

ก. การปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ทางตรง

- 1) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น การเผาไหม้ของไม้ บุหรี่ แก๊สธรรมชาติ และการเผาไหม้ในห้องปฏิบัติการ
- 2) จากการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น ผลิตภัณฑ์ไม้ โดยเฉพาะการใช้ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบในการผลิตแผ่นกระดาน ฝ้าฉาบ และตู้

ข. การปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ทางอ้อม การปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ทางอ้อมนั้นอาจเกิดจากการใช้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการบริโภค ได้แก่

- 1) จากกระบวนการผลิตผ้าและกระดาษเนื้อแข็ง
- 2) จากเครื่องสำอางค์ สี สารเคลือบกระดาษกันน้ำ

1.3 การแพร่กระจายของฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อม ฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ 3 ทาง ได้แก่ อากาศ น้ำ และดิน

1.3.1 ทางอากาศ ฟอร์มาลดีไฮด์แพร่กระจายสู่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ด้วยกระบวนการโฟโตเคมี หรือด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ นั้น ประกอบด้วยปฏิกิริยาร่วมกับไนเตรต ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ โอโซน และคลอรีน โดยที่ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกขนส่งผ่านฝน ฝุ่น และก้อนเมฆ ทั้งนี้ปฏิกิริยาร่วมกับไฮดรอกซิลนั้นมี ความสำคัญต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน (photo oxidation) เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราความ เข้มข้นของปฏิกิริยา ทั้งนี้ช่วงชีวิตของฟอร์มาลดีไฮด์ในบรรยากาศนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 7.1-71.3 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับกับความเข้มแสง และอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนครึ่งชีวิตของฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ที่ 1.6 ชั่วโมง ที่ต่ำกว่าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

1.3.2 ทางน้ำ ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นไฮเดรต (hydrate) (มีน้ำมา ล้อมรอบโมเลกุลฟอร์มาลดีไฮด์) อยู่ในรูปของไกลคอล และส่วนน้อยที่ไม่ใช่ไฮเดรตอยู่ร้อยละ 0.04 โดย มวลในรูปสารละลายให้ความเข้มข้นสูงในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ทั้งนี้ฟอร์มาลดีไฮด์ยังสามารถสลายตัวได้ ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งฟอร์มาลดีไฮด์ในแม่น้ำจะสลายตัวภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ 20 องศา เซลเซียส ที่ 30 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ 48 ชั่วโมง โดยที่มีครึ่งชีวิตที่ 24-168 ชั่วโมงใน น้ำผิวดิน และ 48-336 ชั่วโมงในน้ำใต้ดิน

1.3.3 ทางดิน ฟอร์มาลดีไฮด์ไม่สามารถถูกดูดซับในเม็ดดินได้ แต่สามารถเคลื่อนที่ ในดินได้ด้วยการไหลบ่าไปกับน้ำผิวดิน และการชะลงสู่ น้ำใต้ดิน ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความถี่ของ การตกของฝน ความลึกของน้ำใต้ดิน และการย่อยสลายของฟอร์มาลดีไฮด์ โดยที่การย่อยสลายของ ฟอร์มาลดีไฮด์ในดินนั้นยังขึ้นอยู่กับความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน ครึ่งชีวิตของฟอร์มาลดีไฮด์ ในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 24-168 ชั่วโมง ในสภาวะการย่อยสลายด้วยออกซิเจน

1.4 ความเป็นพิษของฟอร์มาลดีไฮด์

1.4.1 ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารพิษปานกลาง มีค่า ความเป็นพิษ LD50 ต่อหนูขาว (rat) ทางกระเพาะอาหารเท่ากับ 385+ 28.72 มิลลิกรัม/กิโลกรัม สำหรับ ปริมาณที่ทำให้คนตาย (lethal dose) อยู่ระหว่าง 0.5-5.25 กิโลกรัม

อาการที่เกิดจากความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีต่อสัตว์ทดลอง โดยการฉีดเข้าในกระเพาะอาหาร (intragastric administration) พบว่าหลังจากที่สัตว์ทดลองได้รับสารเข้าไปจะแสดงอาการตื่นตระหนก ตามด้วยอาการง่วงซึม อ่อนเพลีย หายใจขัดและจะตายภายใน 2-3 ชั่วโมงแรกที่ได้รับสาร ส่วนสัตว์ทดลองที่รอดชีวิตพบว่ามีอาการเหนื่อยชา ง่วงเหงา และเบื่ออาหาร

ทดลองให้หนูอายุ 2 สัปดาห์กินน้ำที่มีฟอร์มาลดีไฮด์รับต่างๆเป็นเวลา 6 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า หนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 1.5 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนัก พฤติกรรมและการแสดงออกภายนอก ไม่แตกต่างจากหนูกลุ่มควบคุม แต่หนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของตับและม้าม (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่มนุษย์ได้กลิ่น (olfactory threshold) เท่ากับ 0.05 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ส่วนปริมาณในน้ำที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

จากการศึกษาผู้ดื่มฟอร์มาลีนร้อยละ 5 จำนวน 100 มิลลิกรัม พบว่า หลังจากดื่มฟอร์มาลีนเข้าไปจะเกิดการอาเจียน จากนั้นเกิดการระคายเคืองกระเพาะอาหารตอนบนและเกิดอาการคลื่นเหียน ผู้ป่วยจะเสียชีวิตภายใน 40 วัน ด้วยอาการเลือดออกในกระเพาะอาหารและลำไส้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.4.2 ความเป็นพิษเฉพาะด้าน เป็นที่ทราบกันว่าฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมตัวหนึ่งในปัจจุบัน การทดลองในแมลงวันทองแบคทีเรียและพืช แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันระหว่างความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์และการกลายพันธุ์ การที่ฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อระบบพันธุกรรมของเซลล์ เกี่ยวข้องกับผลกระทบของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ และนิวคลีโอไทด์ และ depurination ของ DNA

1.5 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในสิ่งแวดล้อม

1.5.1 ความเข้มข้นที่มีผลทำให้ปลาตายหมด (LC_{100}) เท่ากับ 0.2 กรัม/ลิตร ดาวยร้อยละ 50 (LC_{50}) เท่ากับ 0.1 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดที่ปลาทนได้ เท่ากับ 0.06 กรัม/ลิตร

1.5.2 ฟอर्मัลดีไฮด์ มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งความเข้มข้นนี้ก่อให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงสูงสุดไม่เกินร้อยละ 10

1.5.3 ฟอर्मัลดีไฮด์มีผลต่อแบคทีเรียอย่างรุนแรง พบว่าดินบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมปนเปื้อนฟอर्मัลดีไฮด์มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าบริเวณอื่น กล่าวคือดินในแหล่งอุตสาหกรรมพบแบคทีเรีย 28,000 ถึง 40,000 เซลล์/กรัม ขณะที่ดินไม่ได้รับการปนเปื้อน พบแบคทีเรีย 900,000 เซลล์/กรัม

1.5.4 ถ้าฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำมีความเข้มข้น เกินกว่า 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร กระบวนการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายทางชีวภาพจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.5.5 ฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำมีความเข้มข้นเกินกว่า 0.001 มิลลิกรัม/ลิตรจะยับยั้งการเจริญเติบโตของระบบการหายใจของ microflora

1.6 มาตรการทางกฎหมาย

1.6.1 มาตรฐานน้ำ ประเทศไทยโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดความเข้มข้นของฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.6.2 ประเทศสหภาพแห่งสาธารณรัฐสังคมนิยมโซเวียต กำหนดมาตรฐานน้ำคือ

(1) ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มและน้ำใช้เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจเท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร

(2) ปริมาณสูงสุดที่ยอมรับให้มีในแหล่งน้ำที่ใช้ในการประมงเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

2. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก 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 (landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า โมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

2.1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

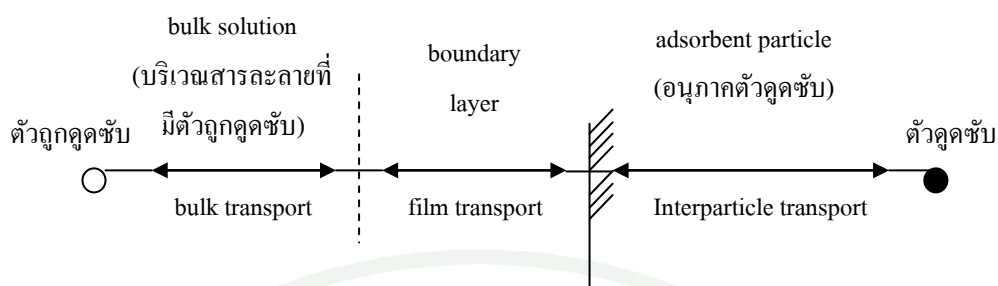
2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

2.2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

การยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้นซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ

2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (intermolecular force)

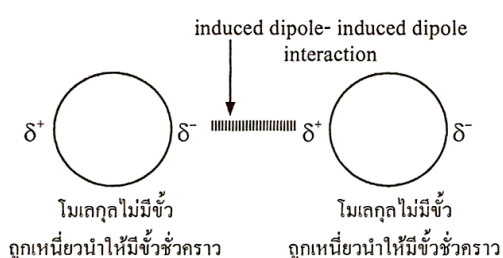
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

2.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal force) คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โควาเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุล (โควาเลนต์) ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

(1) แรงแวนเดอร์วาลส์ ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้วซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราว (induce dipole) ขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงมีขั้วขึ้นมา ถ้า

โมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทาง โมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

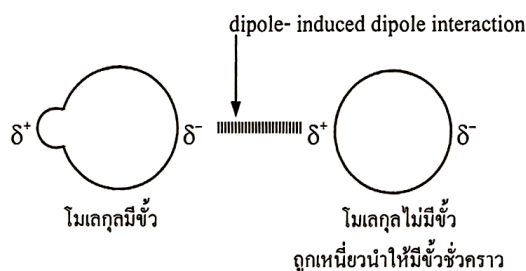
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นไปด้วย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



ภาพที่ 2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

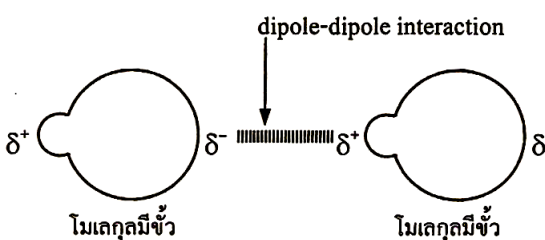
(2) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction)



ภาพที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้วที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขั้วชั่วคราว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

(3) แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole attraction)



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะสภาพมีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

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) อันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

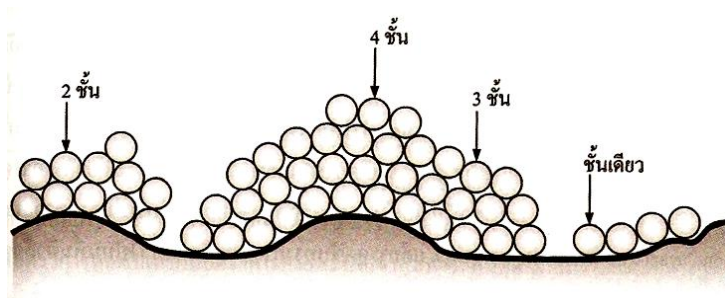
2.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน โดยเกิดสมมูลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible process) จึงไม่เกิดการคาย

2.4 รูปแบบของการดูดซับ

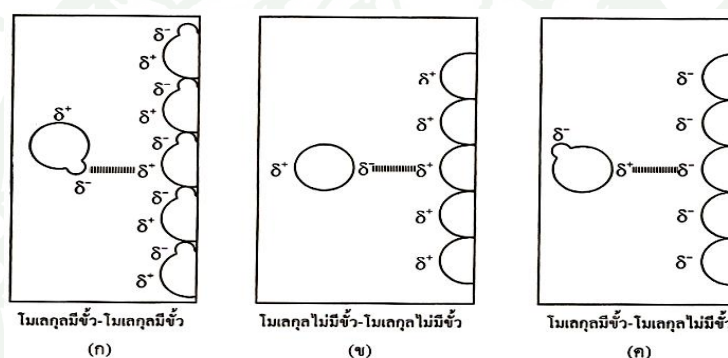
สำหรับรูปแบบของการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption หรือ physical adsorption หรือ van der waals adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะ หรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล – ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่ บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้นดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



หมายเหตุ ภาพ (ก) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ข) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ภาพ (ค) ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

ภาพที่ 6 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.4.2 การดูดซับทางเคมี จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโควาเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูง

กว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณจำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าว จะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ 10 หรือน้อยกว่า 10 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมลของตัวถูกดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้างถึง Maron and Prutton (1961))

2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.5.1 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ film diffusion หรือ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2.5.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และอัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

2.5.3 ขนาดและลักษณะของตัวถูกดูดซับ ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอดิ (พอดิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะ

แปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.5.4 ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ในที่นี้คือ น้ำ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดซับได้ดี

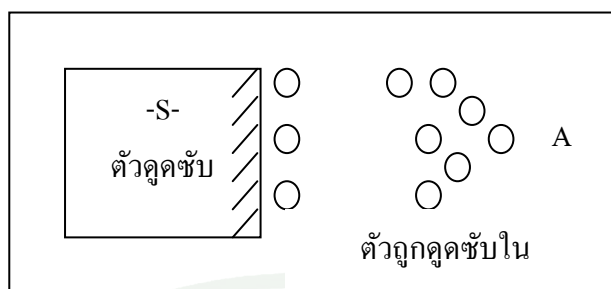
2.5.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ดี

2.5.6 อุณหภูมิ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.5.7 เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

2.6 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา พบว่าอัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย สถานะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0 โมลต่อลิตรในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

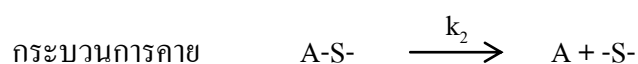
$(1-q)$ เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



r_1 แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



r_2 แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลที่ถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$

ณ สภาวะสมดุล $r_1 = r_2$

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

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

$$q = \frac{K[C]}{1 + K[C]} \quad (2)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ณ สภาวะสมดุล $K = \frac{q}{C} \quad (3)$

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_i - C_e) \quad (4)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับหน่วย เป็นปริมาณตัวถูกละลายต่อมวลตัวดูดซับเป็นโมลต่อกิโลกรัม (mol/kg) หรือ โมลต่อกรัม (mol/g)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น มิลลิกรัม (mg) กรัม (g) หรือ กิโลกรัม (kg)

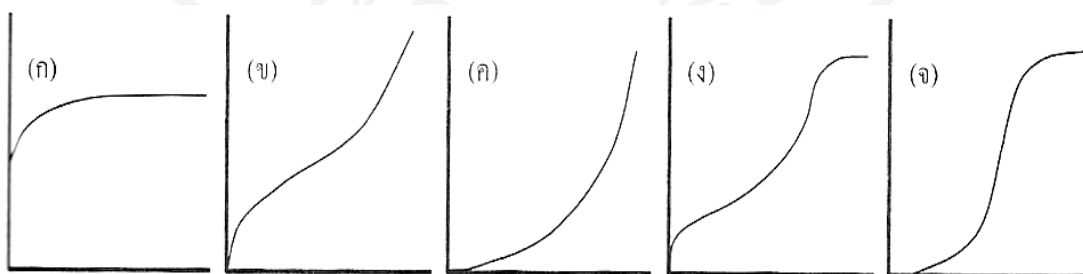
V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกละลายละลายอยู่ หน่วยเป็นลูกบาศก์ เซนติเมตรหรือลิตร

C_i เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลายหน่วยเป็นความเข้มข้นเป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

C_e เป็นความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย หน่วยเป็นความเข้มข้น เป็นโมลต่อลิตร (mol/l)

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกละลาย บนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ใน สารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกน นอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของ ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550) อ้างถึง Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 8 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

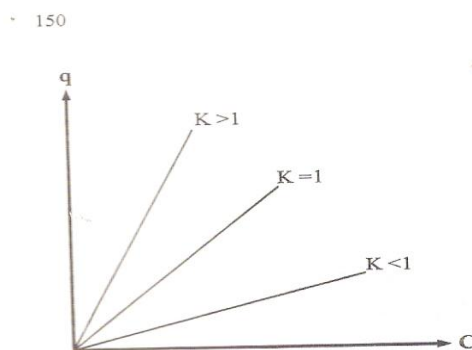
สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.7.1 สมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation) จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C

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

$$q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสถานะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำดังภาพที่ 9



หมายเหตุ $K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ
 $K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยกว่าบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ
 $K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสถานะสมดุล

ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.7.2 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (freundlich adsorption isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอรั่มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad (5)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอรั่มของการดูดซับ โดยทั่วไป $1/n$ จะมีค่ามากกว่าหนึ่งเมื่อจัดรูปสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (6)$$

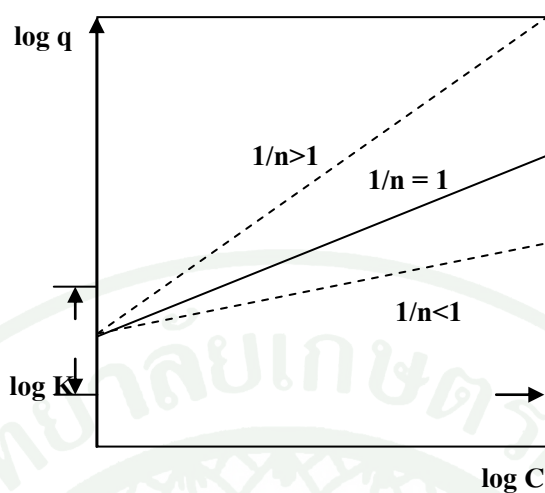
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัมต่อกรัม)

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 10



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

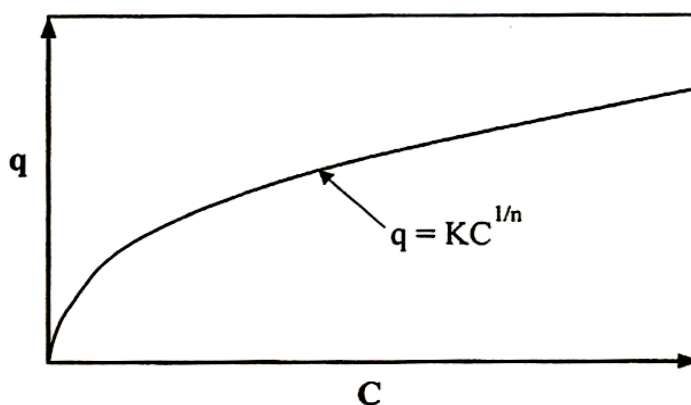
ที่มา: นิพนธ์ และกณิดา (2550)

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

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

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

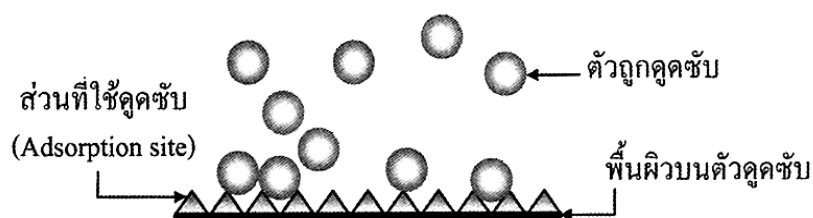
เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (5) จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการซ้อนทับกันได้



ภาพที่ 11 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดิช

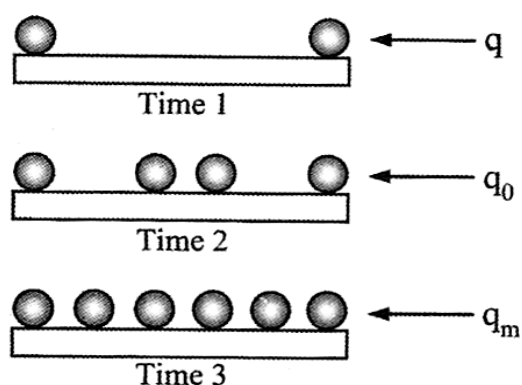
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.7.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ ไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือ เปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 13 การดูดซับของแก๊สเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิดา (2550)

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

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

เมื่อจัดรูปสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad (8)$$

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

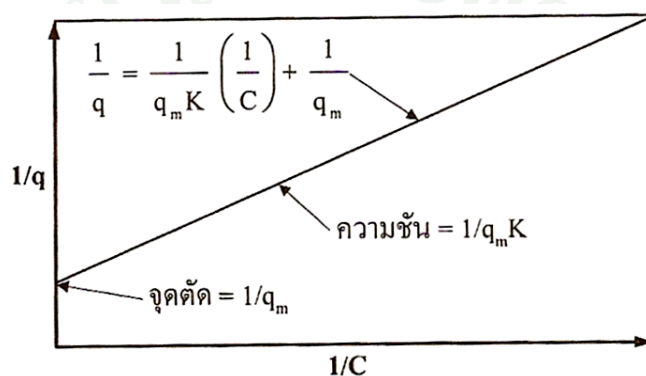
q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

C คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

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

และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

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

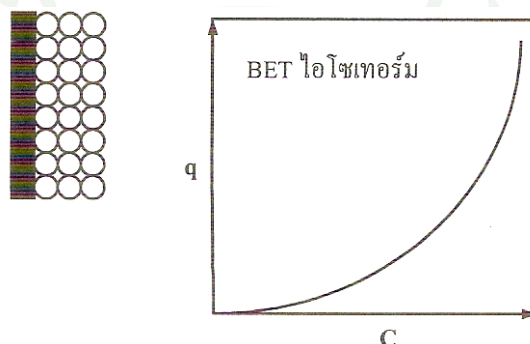
- (1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer Adsorption)
- (2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- (3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- (4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับ

ต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบตส์ถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{(C_0 - C)[1 + (K - 1)C/C_0]} \quad (9)$$

กราฟที่เขียนระหว่าง q กับ C เป็นดังนี้



ภาพที่ 15 ไอโซเทอรัมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของเบต

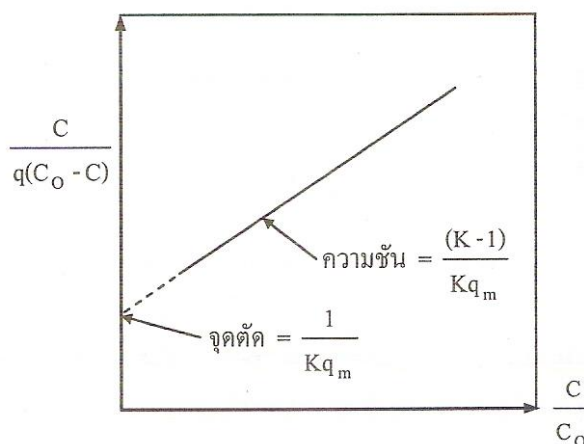
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อจัดรูปสมการที่ (9) ใหม่จะได้สมการดังนี้

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{K - 1}{q_m K} \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับ ค่า $\left(\frac{C}{C_0} \right)$ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชัน

เท่ากับ $\frac{K - 1}{K q_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{K q_m}$



ภาพที่ 16 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของเบท

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)

2.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

2.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวเตดซีลิคา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

2.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม

2.8.3 ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน(เรซิน, risin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

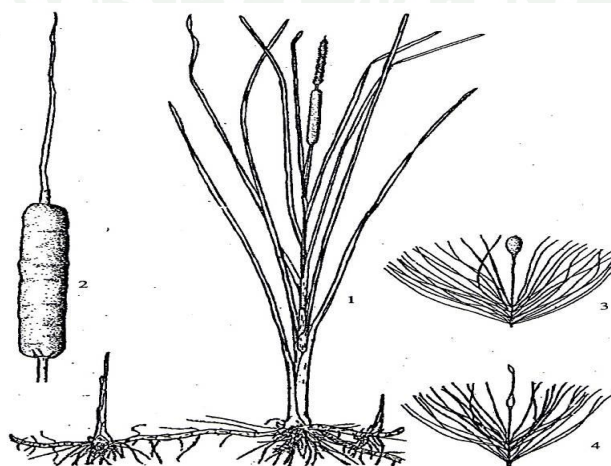
2.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จีเลื้อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช่แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช่แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) ถั่วกลบดำ เป็นต้น

2.8.5 สารดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

3. ตัวดูดซับ

3.1 ต้นธูปฤาษี

ธูปฤาษี ถือเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่ทำให้ความเสียหายต่อสถานะแวดล้อมและการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลง ทำให้น้ำมีกลิ่นเหม็น หรือน้ำที่เก็บกักไว้ใช้มีสีผิดปกติเป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำและการพักผ่อนหย่อนใจ การควบคุมและกำจัดวัชพืชชนิดนี้ทำได้หลายวิธี เช่น ตัด เผา ควบคุมและใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามการควบคุมและกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำให้ต้นธูปฤาษีหมดไปจากพื้นที่ได้ เนื่องจากกำจัดได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือน้ำเท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการนำ ธูปฤาษีมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้แก่ ใช้เป็นอาหารสัตว์ทำเครื่องจักรสาน บำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นเชื้อเพลิงและปุ๋ยหมัก เป็นต้น



ภาพที่ 17 ธูปฤาษี *Typha angustifolia* Linn.

ที่มา: สุชาดา (2542)

ชื่อเรียกสามัญคือ Narrow-leaved cattail, Lesser reedmace, Bulrush, Cattail, Flag, Reedmace tule, Elephant-Grass และ Indian Leedmace

ชื่อท้องถิ่นคือ ฐปถาญี (กรุงเทพฯ), กกช้าง (กลาง), หญ้าสลาบลวง (เหนือ), เพื่อ, หญ้าเพื่อ, ปรีอ, หญ้าปรีอ และหญ้ากกช้าง (ดวงพร และรังสิต, 2544)

ฐปถาญีเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งมีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Subclass Commelinidae

Order Typhales

Family Typhaceae

Genus *Typha*

Species *angustifolia*

พืชในสกุล *Typha* มีอยู่ทั่วโลกประมาณ 15 ชนิด (สุชาติ, 2542) ได้แก่ *Typha angustifolia*, *Typha angustata*, *Typha anstralis*, *Typha capensis*, *Typha crientalis*, *Typha davidians*, *Typha domingensis*, *Typha elephantine*, *Typha glauca*, *Typha javanica*, *Typha latifolia*, *Typha laxmannii*, *Typha minima*, *Typha muelleri*, *Typha orientalis*

3.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ฐปถาญีเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี ขึ้นในที่ลุ่มมีน้ำขัง เจริญตั้งตรงเป็นกอสูงประมาณ 1-2 เมตร มีลำต้นใต้ดินเรียกว่า เหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ ใบเป็นใบเดี่ยวแบนเรียบเรียวยาวแหลม ความกว้างของใบประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ยาวมากกว่า 1 เมตร กลางใบมีลักษณะเซลล์ที่มีความยืดหยุ่นเหมือนฟองน้ำ โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกัน กาบใบด้านในมีเมือกเหนียว ดอกออกเป็นช่อแบบสไปค์ (spike) ช่อดอกกลมคล้ายรูป ดอกตัวผู้กับดอกตัวเมียจะแยกกันอยู่คนละส่วนในช่อดอกเดียวกัน คือส่วนที่เป็นดอกตัวผู้อยู่ด้านบนของช่อดอก ดอกย่อยอยู่กันหลวมๆ รอบก้านช่อดอก มีความยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่างเป็นดอกตัวเมีย ดอกย่อยเรียงตัวอัดกันแน่น ความยาวช่อดอก 7-28 เซนติเมตร เมล็ดขนาดเล็กกว้าง 0.2-0.3 มิลลิเมตร ยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร เมล็ดมีขนสั้นละเอียด สีขาวคล้ายไหม (silky) ปกคลุม ปลายทั้งสองด้านเรียวยาวโดยปลายด้านหนึ่ง มีหางหรือเส้นยาวยื่นออกมาจากเมล็ด มีลักษณะเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยุ่น (สุรัชย์, 2538; ดวงพรและรังสิต, 2544; อำพล, 2544)

3.2 นิเวศวิทยาและการแพร่กระจาย

ธูปฤาษีจัดเป็นวัชพืชในกลุ่มวัชพืชชายตลิ่ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา แพร่กระจายทั่วไปในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และยังพบได้ในอเมริกาเหนือและชายฝั่งแปซิฟิก สำหรับประเทศไทยนั้นพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น ในบริเวณหนองน้ำ บึง นาข้าว ร่องน้ำข้างถนน และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ต้นธูปฤาษีที่อยู่ในเขตที่ลุ่มจะมีการเจริญเติบโตได้ตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์โดยเหง้าและเมล็ด ออกดอกตั้งแต่เดือนสิงหาคมเป็นต้นไปช่ดอกมีลักษณะคล้ายกัน รูปขนาดใหญ่สีน้ำตาล (อำไพ, 2538; อำพล, 2544) มีเมล็ดประมาณ 20,000-700,000 เมล็ด (Grace and Harrison, 1986) เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตกเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนและปลิวกระจายทั่วไป ในสภาพที่มีแสงจัดเมล็ดสามารถงอกและเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนมีจำนวนหนาแน่นทำให้ลดปริมาณแสงที่ส่องลงมาด้านล่าง เป็นการขัดขวางการเจริญของพืชชนิดอื่น (Grace and Wetzel, 1982) นอกจากนั้นยังสามารถเจริญเติบโตในสภาพดินและน้ำที่มีความเค็มสูงได้ (Wilcox, 1986)

4. ระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญ้ากรอง (grass filtration) เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบการบำบัดน้ำเสียในธรรมชาติ และดัดแปลงระบบของพื้นที่ชุ่มน้ำ และระบบนิเวศน้ำจืดมาประยุกต์ใช้ โดยนำน้ำเสียมาไหลผ่านพื้นที่ที่มีความลาดเอียงที่ทำการปลูกหญ้าหรือพืช ซึ่งเป็นการเลียนแบบจากสภาพธรรมชาติของพื้นที่ที่มีสภาพเป็นทุ่งหญ้า ซึ่งมีหญ้า ไม้พุ่ม วัชพืชต่างๆ ขึ้นเต็มไปหมด และมีความลาดเอียงของพื้นที่ตามธรรมชาติ เมื่อน้ำเสียได้ไหลผ่านพื้นที่ที่มีลักษณะเช่นนี้ จะเกิดกระบวนการทางธรรมชาติที่ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย โดยหญ้าหรือพืชจะชะลอความเร็วและความแรงของน้ำ ขณะเดียวกันน้ำเสียก็จะถูกดักหญ้าหรือพืชนำสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียไปใช้ ลำต้นและใบของต้นหญ้าหรือพืชจะทำงานร่วมกับดิน และจุลินทรีย์เกิดกลไกที่เปรียบเสมือนเป็นการกรองเอาสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้สิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำเสียลดน้อยลงตามระยะทางที่น้ำเสียได้ไหลผ่าน น้ำเสียเหล่านั้นจึงค่อยๆ ได้รับการบำบัดให้มีคุณภาพดีขึ้นตามกระบวนการทางธรรมชาติ

4.1 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญ้ากรอง

หลักการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญ้ากรอง ได้ใช้หลักการระบายน้ำแบบการขังสลับแห้ง (flooding and drying) ซึ่งเป็นการนำหลักของระบบนิเวศดินนามาประยุกต์ใช้ในการบำบัด คือ สภาพที่มีออกซิเจน (aerobic) เมื่อมีการระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้ง และสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobic)

เมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าแปลงแล้วขังน้ำไว้ ในการเกิดสภาพไม่มีออกซิเจน จะมีผลดีและผลเสียต่อระบบนิเวศน์เมื่อดินมีการขังน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของดิน และปัจจัยที่ควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อมีการขังน้ำและระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้งบางส่วน (สิทธิชัย, 2538) ซึ่งการขังน้ำดังกล่าวทำให้เกิดการบำบัดได้ดังนี้

4.1.1 การเกิดสภาพที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อดินมีน้ำขังการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจนระหว่างอากาศในดินและบรรยากาศจะถูกยับยั้ง ซึ่งโดยปกติออกซิเจนในบรรยากาศจะเข้าไปสู่ดินได้โดยการแพร่กระจาย (diffusion) แต่เมื่อดินถูกขังน้ำ การแพร่กระจายของออกซิเจนจะต้องผ่านชั้นของน้ำที่อยู่เหนือดิน ทำให้อัตราการแพร่กระจายผ่านเข้ามาช้ามาก ($1/1,000$ เท่าของในบรรยากาศ) จากนั้นดินก็จะอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ออกซิเจนที่มีอยู่เดิมซึ่งถูกกักเก็บไว้ตามช่องว่างในดินที่ถูกน้ำขังจะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) นำมาใช้ในการหายใจจนหมดไปอย่างรวดเร็ว และเกิดการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอื่นๆในดิน โดยการสะสม และค่อยๆเพิ่มความกดดันจนเกิดเป็นฟองสูญหายไปจากดิน องค์ประกอบของแก๊สที่เปลี่ยนไปในดินที่ขังน้ำย่อมทำให้เกิดการแปลงจลน์ทางเคมี และชีวภาพของระบบได้ (ไพบุลย์, 2528; ทศนีย์, 2534)

4.1.2 การเกิดรีดักชันที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย

ภายหลังจากการขังน้ำ ทำให้ออกซิเจนในดินถูกใช้หมดโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน หลังจากนั้นจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนจะหยุดกิจกรรม ชะงักการเจริญเติบโตและจะตายไป ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งพวกที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจนจะเริ่มหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยสารประกอบต่างๆ ในดินซึ่งมีระดับออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุ ก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน สารประกอบที่มีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินนั้น ได้แก่ ไนเตรต แอมโมเนีย ไนตริก ซัลเฟต และสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆ ตามลำดับทาง thermodynamic โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชันชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันขึ้นอยู่กับปัจจัย 5 ประการคือ ธรรมชาติและปริมาณของอาหารจุลินทรีย์ (อินทรีย์วัตถุ) หรือตัวให้อิเล็กตรอน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณและชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน และระยะเวลาที่มีน้ำแช่ขัง (สิทธิชัย, 2538) ผลจากการขังน้ำที่มีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของดิน ทำให้คาดว่า เมื่อใช้การระบายน้ำเสียในลักษณะการขังน้ำสลับกับการระบายน้ำออกให้ดินแห้ง ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันและออกซิเดชันสลับกัน จะสามารถนำมาใช้ร่วมกับพืชในระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหมุนเวียน เพื่อลดปริมาณสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ ไม่ว่าจะเป็น บีโอดี ซีโอดี โลหะหนัก ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส เป็น

ตัน ซึ่งจากการศึกษาของ (ปกรณ, 2540) ถึงการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินในสภาพขังน้ำสลั้บแห้งร่วมกับพืช พบว่า ธาตุอาหารพืชได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ในน้ำที่ออกจากแปลงมีปริมาณลดลงจากเดิม โดยธาตุอาหารส่วนที่ลดลงนั้นพบสะสมอยู่ในดินและพืช แต่โลหะหนักที่ลดลงพบสะสมอยู่เฉพาะในพืช

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุชาดา และคณะ (2537) เสนอแนะว่า การบำบัดน้ำเสียโดยใช้ระบบดินร่วมกับพืชน่าจะใช้กก กลม กกสามเหลี่ยม หัวกระดาน และรูปฤาษี เป็นพืชทดลอง เพราะมีการเจริญเติบโตดีมาก และมีโอกาสใช้ประโยชน์จากพืชทั้งสามชนิดนี้ โดยไม่มีโอกาสเข้ามาเกี่ยวข้องกับห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ หลังจากนั้น สิทธิชัย (2538) ได้ทำการศึกษาวิจัย พบว่า กกกลมมีความเหมาะสมต่อระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ดินร่วมกับพืชในสภาพน้ำขังสลั้บแห้งมากที่สุด

อุไรวรรณ (2545) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ที่ผ่านการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสาน พบว่า รูปฤาษีสามารถสะสมไนโตรเจนได้ดีกว่ากกสามเหลี่ยม โดยการสะสมของไนโตรเจนจะพบที่ใบ ต้น และรากตาลำดับ

วัชรพงศ์ (2551) จากผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนสามารถดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน ที่ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ไหลผ่านคอลัมน์เท่ากัน

สโรชา (2552) ทำการศึกษาการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเอทีลีน ออกไซด์และเอทีลีนไกลคอล ด้วยถ่านรูปฤาษี โดยทำการทดลองแบบเบตซ์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านรูปฤาษี มีสภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ความเร็วรอบปั่นกววน 100 รอบ/นาที ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ถ่านรูปฤาษีสามารถดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 21.26 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวยังแสดงสภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์อีกด้วย

คัทเลีย (2555) ทำการศึกษาการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกระดาษโดยใช้ ถ่านซังข้าวโพดแบบผงและถ่านซังข้าวโพดแบบเกล็ดในการทดลองแบบแบทช์ พบว่า สามารถ บำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ถึงร้อยละ 84.62 และ 81.54

Gellman and Heukelekian (1950) ศึกษาเรื่อง Biological oxidation of formaldehyde ที่ระดับ ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ช่วง 45-175 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้นจาก 135-175 มิลลิกรัม/ลิตร จุลินทรีย์บางส่วนที่แข็งแรงและสามารถปรับตัวรองรับฟอร์มาลดีไฮด์มาเป็น อาหารได้ ยังคงดำรงชีพอยู่ได้

Vida *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์และยูเรียในน้ำทิ้งด้วย กระบวนการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงการ บำบัดฟอร์มาลดีไฮด์และยูเรียในน้ำทิ้ง ในสภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์สูงถึง 2 กรัม/ ลิตร และใช้กลูโคสเป็นตัว co-substrate ในระบบบำบัด UASB สามารถลดซีโอดีได้ร้อยละ 90-95 และ สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์และยูเรียได้อย่างสมบูรณ์

Hidalgo *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำ ทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย *Rhodococcus erythropolis* พบว่า *Rhodococcus erythropolis* สามารถ กำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยที่ ปริมาณการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น และความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ทั้งนี้วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพนี้ยังเป็นอีกรูปแบบหนึ่งในการบำบัดน้ำทิ้ง สังเคราะห์ และน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนฟีนอลิก และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเมลามีน เรซิน

Loffy and Reshed (2002) ทำการศึกษาเรื่อง วิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนโดย ศึกษาถึงการย่อยสลายด้วยกระบวนการชีวภาพใช้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ระหว่าง 31.5-125 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ภายใน 16 วัน แต่บำบัดได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้น ฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 ตู้อบ รุ่น OF – 11E ยี่ห้อ JEIO TECH
- 1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รุ่น WB-0250003 บริษัท Mettler Toledo รุ่น PB-1501
- 1.4 ตู้ดูดความชื้น (desicater)
- 1.5 เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.6 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแคมป์และขาตั้ง
- 1.7 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน ของ whatman
- 1.8 กรวยกรอง
- 1.9 กระบะปลูก

2. สารเคมี

- 2.1 ฟอรั้มัลดีไฮด์ (Formaldehyde; HCHO)
- 2.2 กรดโครโมโทรปิก (Chromotropic acid; $C_{10}H_8O_2S_2$)
- 2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid; H_2SO_4)

3. วัสดุชุดขับและวัสดุปลูก

3.1 ต้นรูปถ่าย จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย

3.2 ดินผสมทราย จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย

4. พืชที่ใช้ร่วมกับวัสดุปลูก

4.1 ต้นรูปถ่าย

วิธีการ

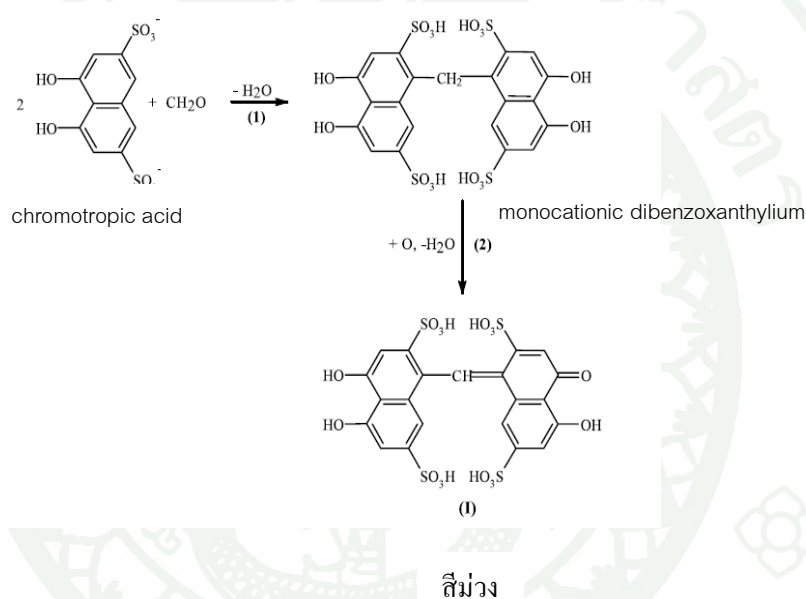
1. การเตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1000.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตฟอร์มาลดีไฮด์มาตรฐานร้อยละ 38 มา 2.63 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1.0 ลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1.0 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1000.0 มิลลิกรัม/ลิตร

1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์จากข้อ 1.1 มา 10.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100.0 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร

1.3 เตรียมกราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์จากข้อ 1.2 มา 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 ลงในขวดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100.0 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร

1.4 นำสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร จากข้อ 1.3 ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับกรดโครโมโทรปิกน้ำหนัก 0.15 กรัม และกรด ซัลฟิวริกเข้มข้น 12.063 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 10 นาที จะได้สารละลายสีม่วง ดังปฏิกิริยาในภาพที่ 18 หลังจากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาว คลื่น 575 นาโนเมตร นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ในแกนตั้ง และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ใน แกนนอนจะได้กราฟมาตรฐานเพื่อใช้เทียบหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์



ภาพที่ 18 ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับกรดโครโมโทรปิก

ที่มา: Fagnani et al. (2003)

2. การเตรียมตัวดูดซับ

นำต้นรูปถาญมาหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีความยาวประมาณ 1-2 นิ้ว นำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3-4 วัน จะได้รูปถาญตากแห้ง จากนั้นนำมาเผาจนเป็นถ่านสีดำ นำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์จะได้ถ่านรูปถาญ

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร มา 20.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100.0 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ใช้เป็นน้ำเสียสักระยะที่ตลอดการทดลอง

4. การวางแผนการทดลอง

4.1 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมต่อการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยรูปถ่ายตากแห้งและถ่านรูปถ่าย

4.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ ทำการทดลองโดยซึ่งรูปถ่ายตากแห้งและถ่านรูปถ่ายชนิดละ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ต่อน้ำเสียสักระยะที่ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยเขย่า ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

4.1.2 ศึกษาอิทธิพลระยะเวลาบำบัด ทำการทดลองโดยซึ่งรูปถ่ายตากแห้งปริมาณเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อที่ 4.1.1 ต่อน้ำเสียสักระยะที่ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปกรวยแต่ละใบ ตั้งทิ้งไว้โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

นำถ่านรูปถ่ายปริมาณเท่ากับที่ศึกษาได้จากข้อที่ 4.1.1 มาทำการทดลองเช่นเดียวกับรูปถ่ายตากแห้ง กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

4.1.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ ทำการทดลองโดยนำปริมาณรูปถ่ายตากแห้งและถ่านรูปถ่ายที่ศึกษาได้จากข้อ 4.1.1 ต่อน้ำเสียสักระยะที่ 100.0 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในขวดรูปกรวยแต่ละใบ ตั้งทิ้งไว้ตามเวลาที่ศึกษาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2 หลังจากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน วิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

4.1.4 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช นำผลการทดลองของรูปถ่ายติดแห้งและถ่านรูปถ่ายจากข้อ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 มาคำนวณตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

4.2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยบรรจุคอลัมน์ด้วยตัวดูดซับคือถ่านรูปถ่ายผสมกับดิน และศึกษาอัตราส่วนของดินที่เหมาะสมด้วยอัตราส่วน 8: 50, 8: 100, 8: 200, 8: 400 และ 8: 600 กรัม ทำการทดลองโดยนำตัวดูดซับผสมกับดินในอัตราส่วน 8:50, 8:100, 8:200, 8:400 และ 8:600 กรัม มาบรรจุใส่คอลัมน์ขนาด 5x30 เซนติเมตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ สูงเหนือชั้นดิน 10 เซนติเมตร จากนั้นแช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปิดปากคอลัมน์ด้วยฟรอยด์ เพื่อป้องกันการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ หลังจากครบ 5 วัน ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ออกจากคอลัมน์โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ครั้งแรก 20.0 มิลลิลิตร และครั้งต่อไปเก็บครั้งละ 50.0 มิลลิลิตร จนกระทั่งน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ไหลออกจากคอลัมน์ แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ ปล่อยให้คอลัมน์แห้ง 2 วันแล้วทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

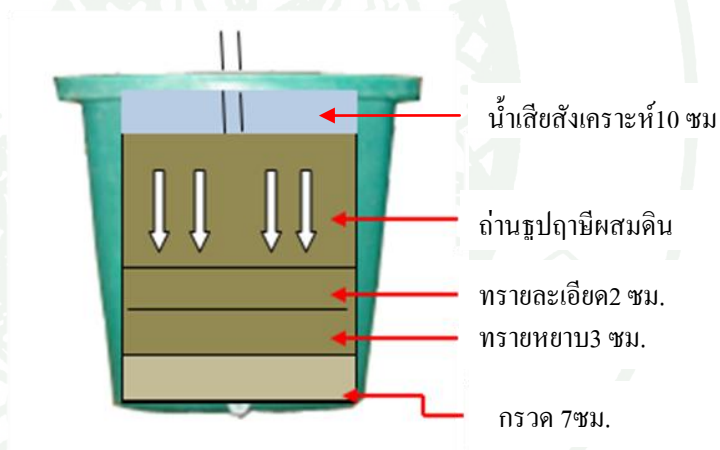
4.3 ศึกษาประสิทธิภาพบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

4.3.1 การทดลองเป็นการจำลองระบบบำบัดหยาบกรองน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในกระเบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร ภายในกระเบะบรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร, ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ่านรูปถ่ายผสมกับดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 4.2.1 และปลูกต้นรูปถ่ายเจริญเติบโตสูงประมาณ 1 เมตร (ดังภาพที่ 19) จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 40.0 ลิตร แช่ทิ้งไว้ 5 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ โดยเก็บตัวอย่างมาครั้งละ 1000.0 มิลลิลิตร จนน้ำในกระเบะพลาสติกแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

4.3.2 กระบะควบคุม เป็นการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริในกระบะพลาสติกขนาด $51 \times 51 \times 54$ เซนติเมตร ภายในกระบะบรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทราวยหยาบ 3 เซนติเมตร, ทราวยละเอียด 2 เซนติเมตร และดินสูง 30 เซนติเมตร จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 40.0 ลิตร แช่ทิ้งไว้ 5 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ โดยเก็บน้ำตัวอย่างมาครั้งละ 1,000.0 มิลลิลิตร จนน้ำในกระบะพลาสติกแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์

5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 กระบะปลูกและชั้นของกรวด, ทราวยหยาบ, ทราวยละเอียด และถ่านรูปทรงแผ่นดิน

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ.2554 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ.2555

ผลและวิจารณ์

การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์(สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร) ด้วยรูปถ่ายที่ผสมกับดินที่ใช้เป็นวัสดุปลูกในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยทำการทดลองแบบเบตซ์เพื่อศึกษา ปริมาณของตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ รูปถ่ายตากแห้ง และถ่านรูปถ่าย และระยะเวลาบำบัด และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช รวมทั้งนำสภาวะที่เหมาะสมที่ศึกษาได้ไปใช้ในการทดลองการดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง และเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่จำลองระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป โดยนำตัวดูดซับมาผสมกับดินเป็นวัสดุปลูก ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

1. ผลการเตรียมตัวดูดซับ

1.1 การเตรียมตัวดูดซับ

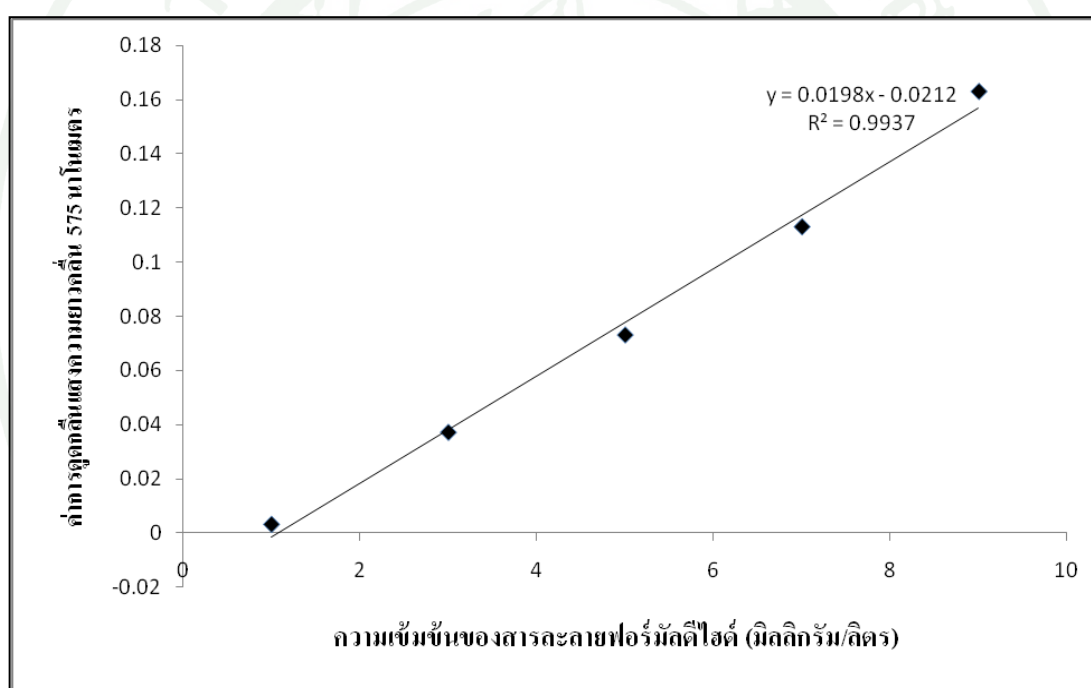
จากการทดลองข้อ 2.1 ตัวดูดซับที่เตรียมได้คือ รูปถ่ายตากแห้งมีลักษณะเป็นชิ้น มีสีเหลืองอมน้ำตาลและถ่านรูปถ่ายมีลักษณะเป็นท่อนผสมกับผงละเอียด สีดำ



ภาพที่ 20 ตัวดูดซับรูปถ่ายตากแห้งและถ่านรูปถ่าย

2. กราฟมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์

กราฟมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์เตรียมได้จาก สารละลายฟอร์มัลดีไฮด์มาตรฐาน เข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำปฏิกิริยากับกรดโครโมโทปิกสภาวะที่เป็นกรดและ วัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer) ที่ค่าความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร เมื่อเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (แกนตั้ง) และความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ (แกนนอน) พบว่า ได้สมการเชิงเส้นถดถอย คือ $y = 0.0198x - 0.0212$ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Square) ของสารละลายสี่ข้อผสม มีค่าเท่ากับ 0.9937 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



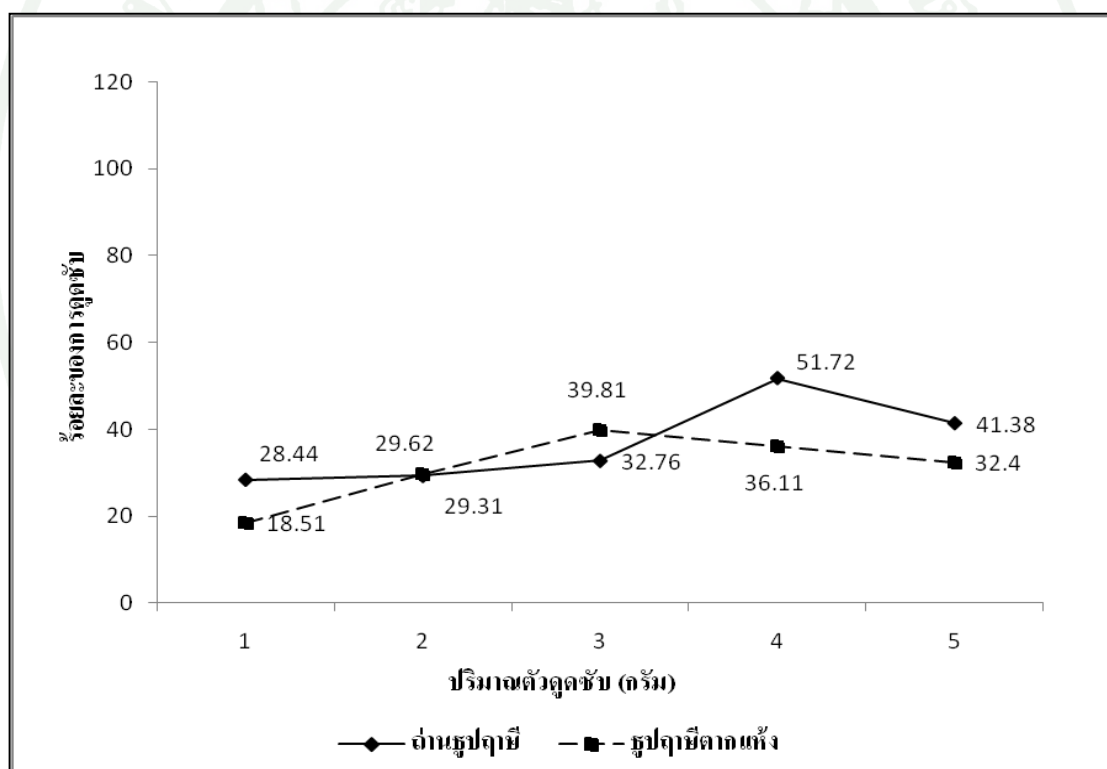
ภาพที่ 21 กราฟมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์

3. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์โดยวิธีแบบเบตซ์

ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือปริมาณตัวดูดซับ (รูปถ่ายติดแห้งและถ่านรูปถ่าย) และระยะเวลา บำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ที่เหมาะสม

3.1 ปริมาณตัวดูดซับ

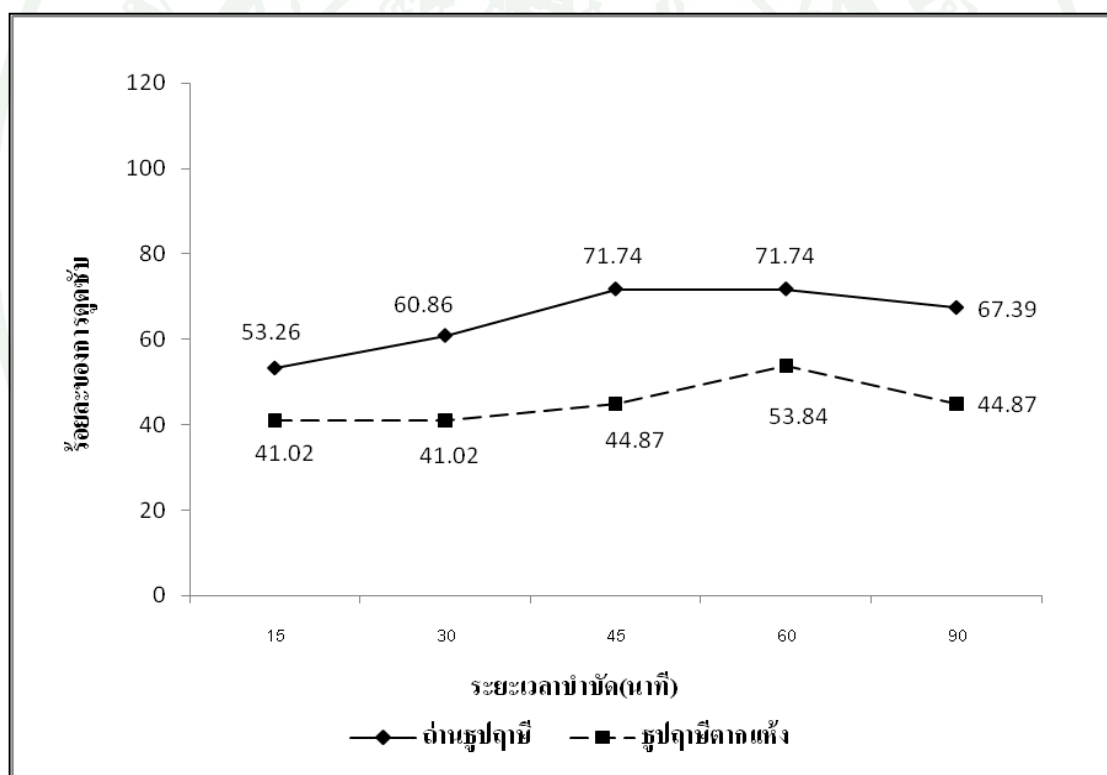
จากการทดลองที่ 4.1.1 ทำการทดลองโดยแปรผันปริมาณรูปถ่ายียากแห้งและถ่านรูปถ่ายียเป็น 1,2,3,4 และ 5 กรัม พบว่า รูปถ่ายียากแห้งปริมาณ 3 กรัม มีความสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด ให้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 39.81 ส่วนถ่านรูปถ่ายียปริมาณ 4 กรัม เป็นปริมาณที่บำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีที่สุด ให้ร้อยละของการดูดซับเท่ากับ 51.72 จากภาพที่ 22 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณรูปถ่ายียากแห้งหรือถ่านรูปถ่ายียประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวใหม่ให้กับตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และต่อจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก พื้นที่ตัวดูดซับมีจำกัด และเมื่อตัวดูดซับเกิดกระบวนการดูดซับจนอิ่มตัวและเข้าสู่สภาวะสมดุลจะเกิดกระบวนการคายซับร่วมด้วย(นิพนธ์และคณะ, 2550)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของรูปถ่ายียากแห้ง และถ่านรูปถ่ายีย

3.2 ระยะเวลาบำบัด

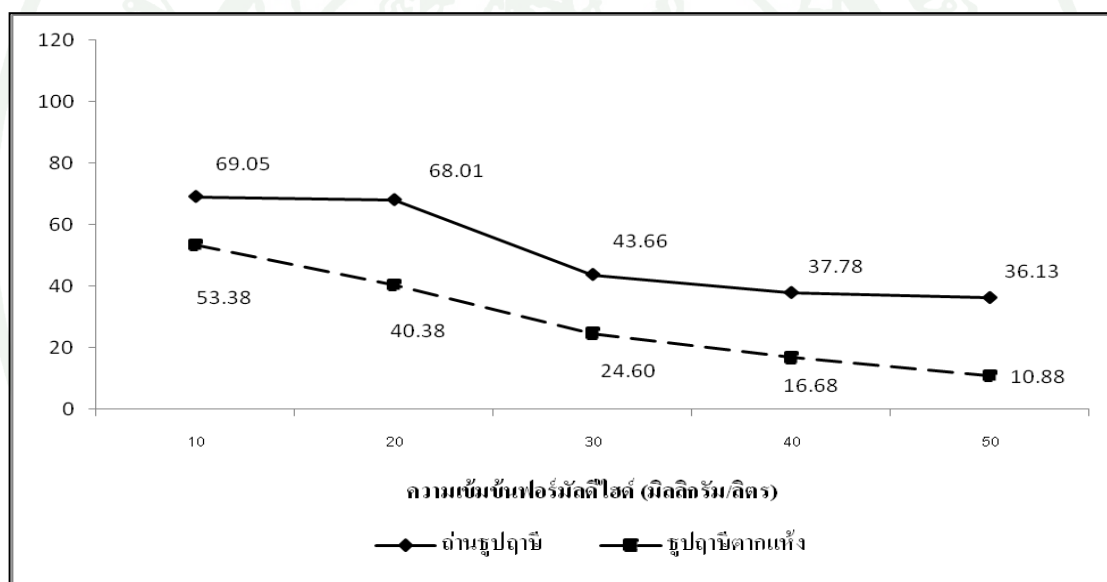
จากการทดลองที่ 4.1.2 มีการแปรผันระยะเวลาดำบัดเป็น 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที พบว่า รูปถ่ายีตากแห้งที่ปริมาณ 3 กรัม สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 60 นาที และ ถ่านรูปถ่ายีปริมาณ 4 กรัม สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุดที่ระยะเวลา 45 นาที ร้อยละของการดูดซับคือ 53.84 และ 71.74 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการบำบัดมีแนวโน้มลดลง เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 23 อธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาดำบัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับมีระยะเวลาการยึดเกาะติดที่ผิวตัวดูดซับ หลังจากนั้นจนถึงระยะเวลาหนึ่ง ประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะคงที่และเริ่มลดลง เนื่องจากการดูดซับจะเริ่มเข้าสู่สมดุล จนทำให้ตัวดูดซับเกิดการอิ่มตัวมีผลให้ประสิทธิภาพลดลง (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดำบัดกับร้อยละของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของรูปถ่ายีตากแห้ง และถ่านรูปถ่ายี

3.3 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์

จากการทดลองที่ 4.1.3 มีการแปรผันความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 10,20,30,40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จะมีความลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยพบว่า รูปฤาษีตากแห้งและถ่านรูปฤาษีสามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้สูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 53.38 และ 69.05 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ จนมีผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (นิพนธ์ และกณิดา, 2550)



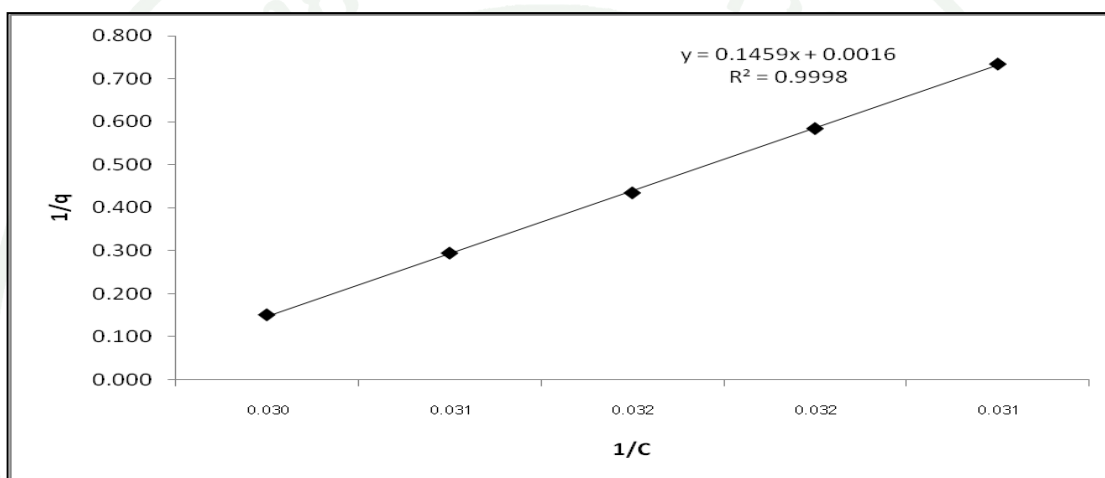
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์กับร้อยละของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของรูปฤาษีตากแห้ง และถ่านรูปฤาษี

4. ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์

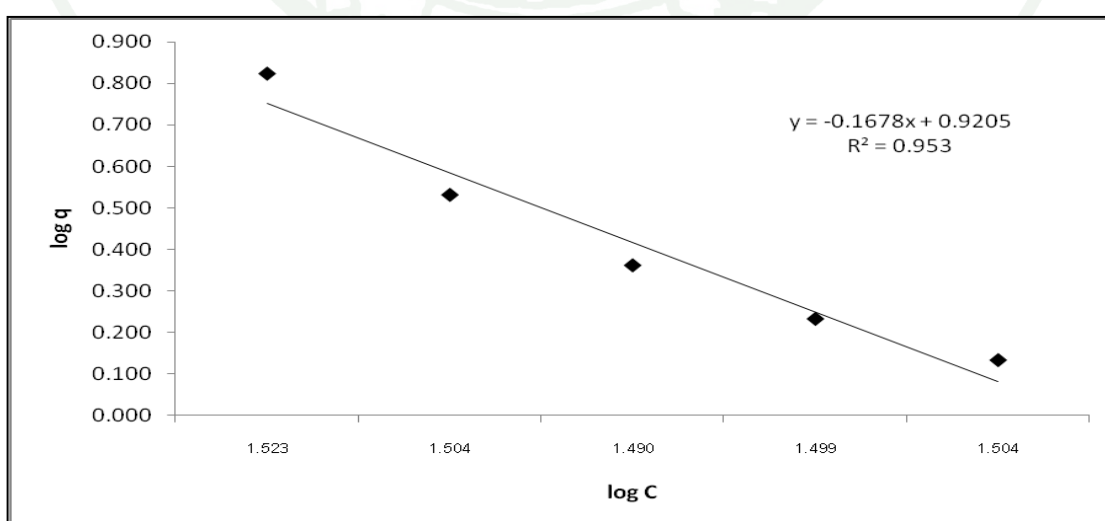
4.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยรูปฤาษีตากแห้ง

จากการทดลองในข้อที่ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 ทำการแปรผันปริมาณรูปฤาษีตากแห้งเป็น 3 กรัม และทำการบำบัดระยะเวลา 60 นาที ที่ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำผลที่

ได้มาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยปริมาณรูปถ่าย พบว่า ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิชของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยรูปถ่ายตากแห้ง ได้กราฟดังภาพที่ 24 และ 25 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (R-square) ในการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 2 แบบ มีค่าเท่ากับ 0.9998 และ 0.953 ตามลำดับ ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชนั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงว่า การดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์



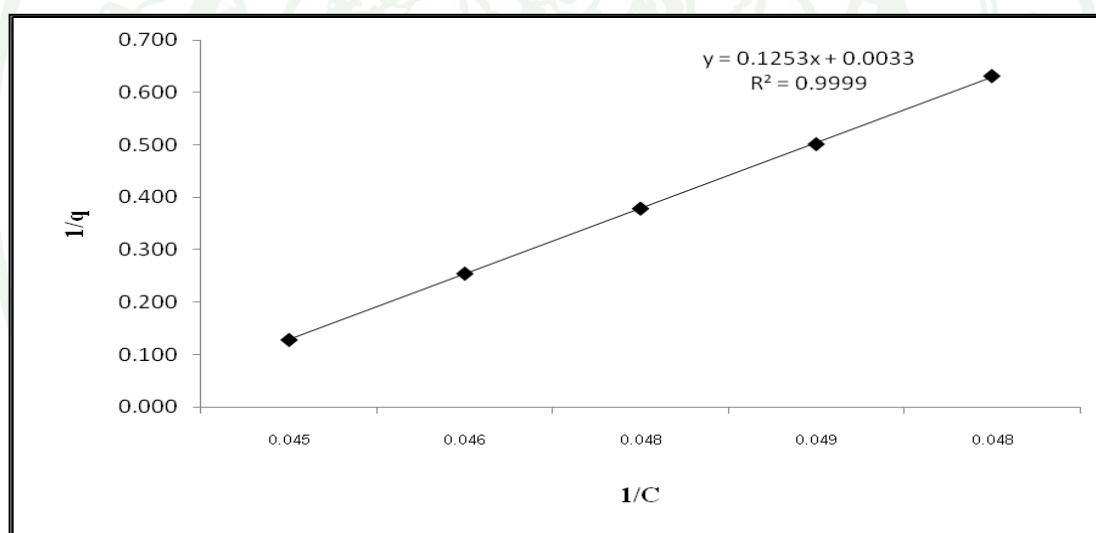
ภาพที่ 25 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยรูปถ่ายตากแห้ง



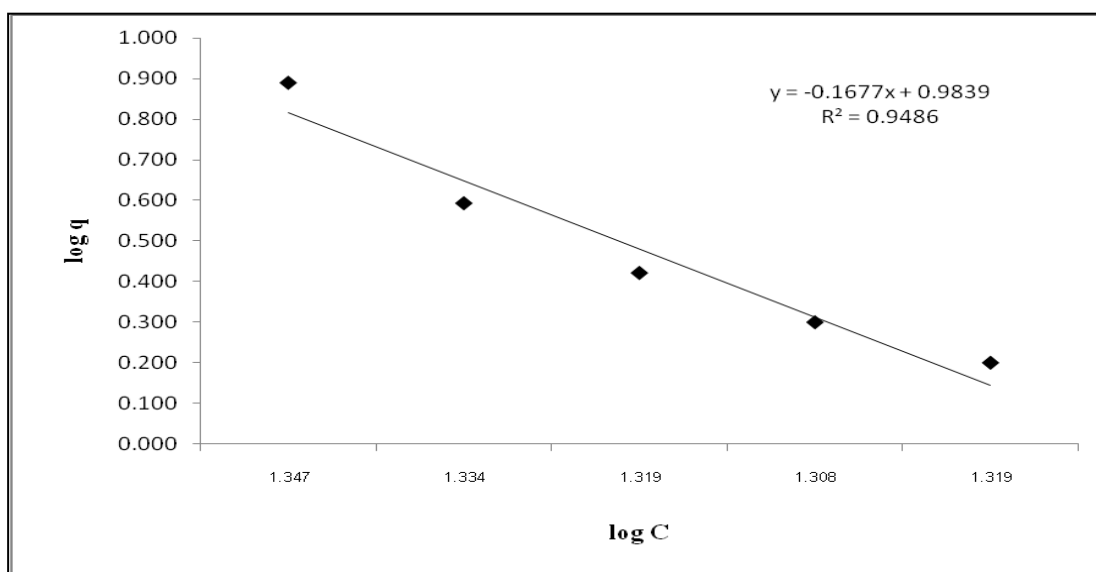
ภาพที่ 26 ไอโซเทอร์มฟรุนดลิชของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยรูปถ่ายตากแห้ง

4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยถ่านรูปถั่ว

จากการทดลองในข้อที่ 4.1.1, 4.1.2 และ 4.1.3 ทำการแปรผันปริมาณถ่านรูปถั่วเป็น 4 กรัม และทำการบำบัดระยะเวลา 45 นาที ที่ความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดิช พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยปริมาณถ่านรูปถั่วต่างกันพบว่า ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดิชของการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านรูปถั่ว ได้กราฟดังภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (R-square) มีค่าเท่ากับ 0.9999 และ 0.9486 ตามลำดับ ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิชนั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จึงสอดคล้องการสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์



ภาพที่ 27 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยถ่านรูปถั่ว



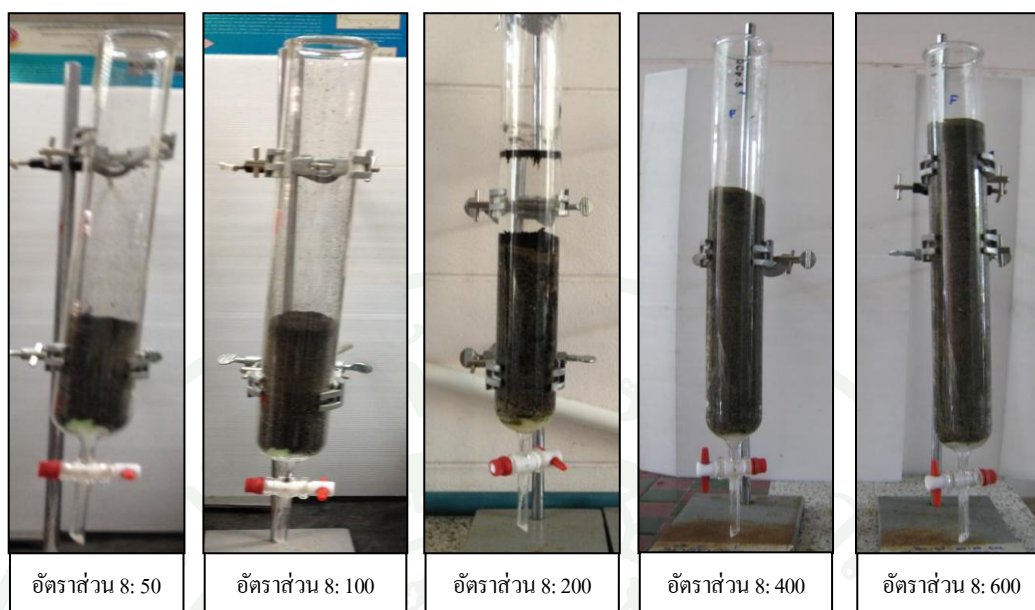
ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มฟรอนดิชของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยถ่านรูปถาวยี่

จากผลการทดลองในข้อ 4.1 และ 4.2 จะเห็นว่า กลไกการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของรูปถาวยี่ตากแห้งและถ่านรูปถาวยี่สอคล้ายกับกลไกการดูดซับแบบเลงเมียร์มากกว่า นั่นคือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัดและเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้ว จะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (นิพนธ์ และคณิตา, 2550)

5. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

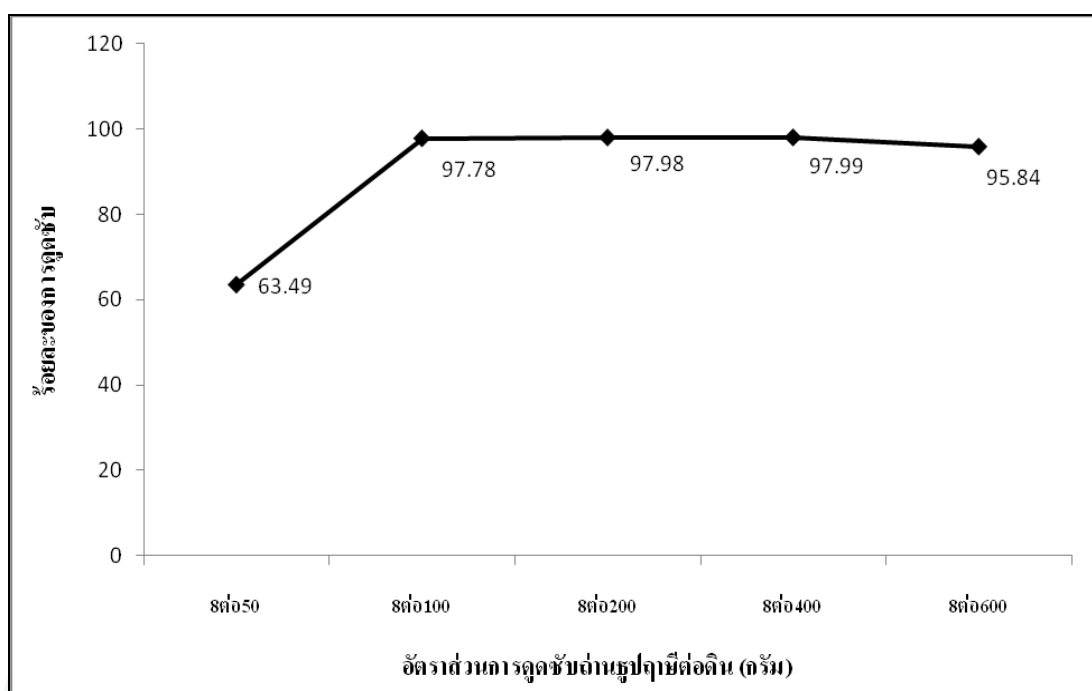
5.1 ศึกษาปริมาณดินที่เหมาะสมในการดูดซับ

โดยบรรจุคอลัมน์ด้วยตัวดูดซับคือถ่านรูปถาวยี่ต่อดินอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 8: 50, 8: 100, 8: 200, 8: 400, 8: 600 กรัม ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 29 คอลัมน์บรรจุถ่านรูปทรงแฉะและดินในอัตราส่วน 8: 50, 8: 100, 8: 200, 8: 400 และ 8: 600

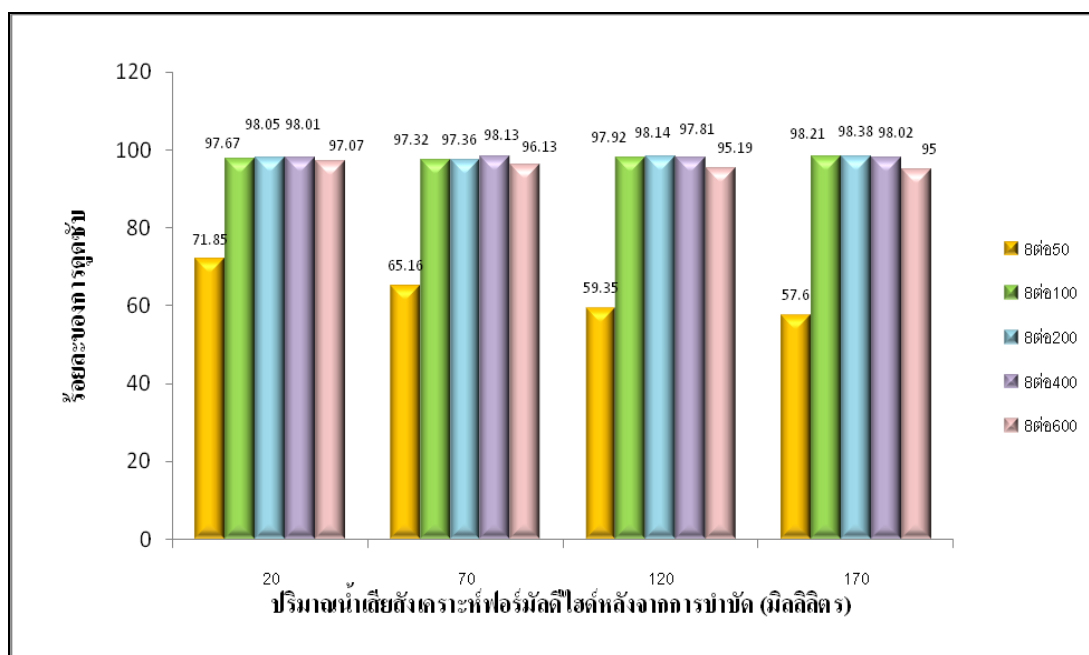
จากการทดลอง 4.2.1 ทำการศึกษาปริมาณดินที่เหมาะสมมีความแตกต่างกันที่ 8: 50, 8: 100, 8: 200, 8: 400 และ 8: 600 กรัม โดยใช้ถ่านรูปทรงแฉะที่ปริมาณ 8 กรัม ผลการทดลองทั้ง 5 อัตราส่วนนี้ สามารถดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ค่าเฉลี่ยร้อยละ 63.49, 97.78, 97.98, 97.99 และ 95.84 ตามลำดับ ดังภาพที่ 30, 31 และตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนทั้ง 5 ในปริมาณดินที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์จะเพิ่มขึ้นและค่อยๆคงที่ อธิบายได้ว่า ดินสามารถดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในปริมาณที่มากขึ้น ดินสามารถดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้มากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (สโรชา, 2552)



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับอัตราส่วนของถ่านรูปยาเสพติด

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์จากอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

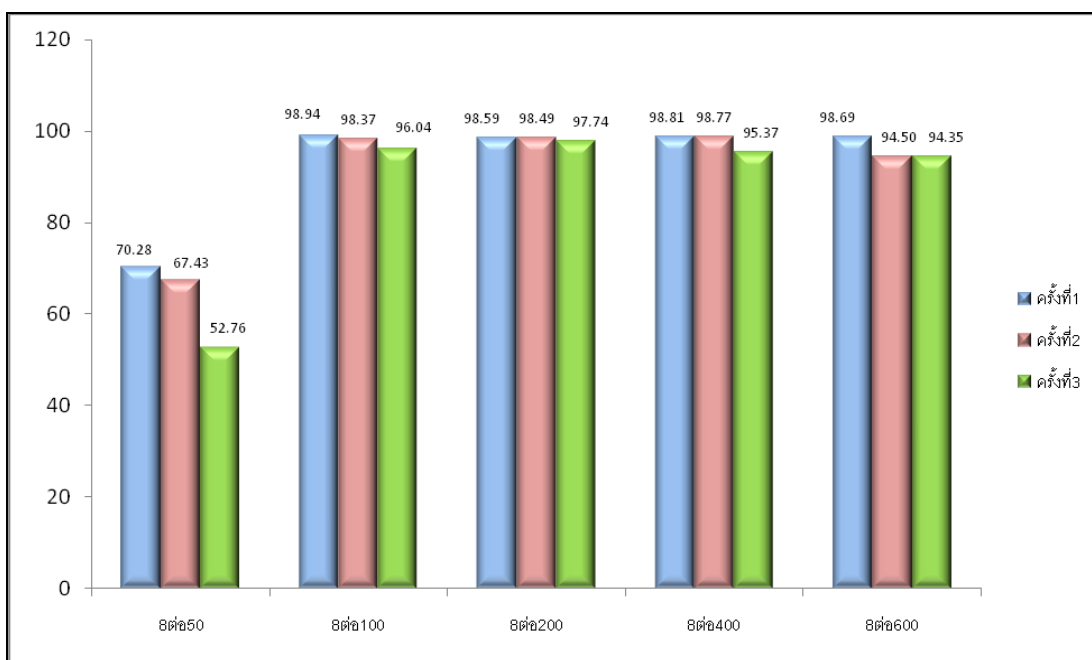
ปริมาณน้ำตัวอย่างที่เก็บหลังจาก ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในแต่ละอัตราส่วน				
	8: 50	8: 100	8: 200	8: 400	8: 600
20	71.85	97.67	98.05	98.01	97.07
70	65.16	97.32	97.36	98.13	96.13
120	59.35	97.92	98.14	97.81	95.19
170	57.60	98.21	98.38	98.02	95.00
ค่าเฉลี่ย	63.49	97.78	97.98	97.99	95.84



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์จากอัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 3 ตารางค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ต่อจำนวนครั้งที่บำบัดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

การทดลองครั้งที่	ร้อยละของการดูดซับ				
	อัตราส่วนถ่านรูปยาสูบต่อดิน (กรัม)				
	8:50	8:100	8:200	8:400	8:600
ครั้งที่ 1	70.28	98.94	99.07	98.81	98.69
ครั้งที่ 2	67.53	98.37	98.27	98.77	94.50
ครั้งที่ 3	52.76	96.04	96.61	96.39	94.35



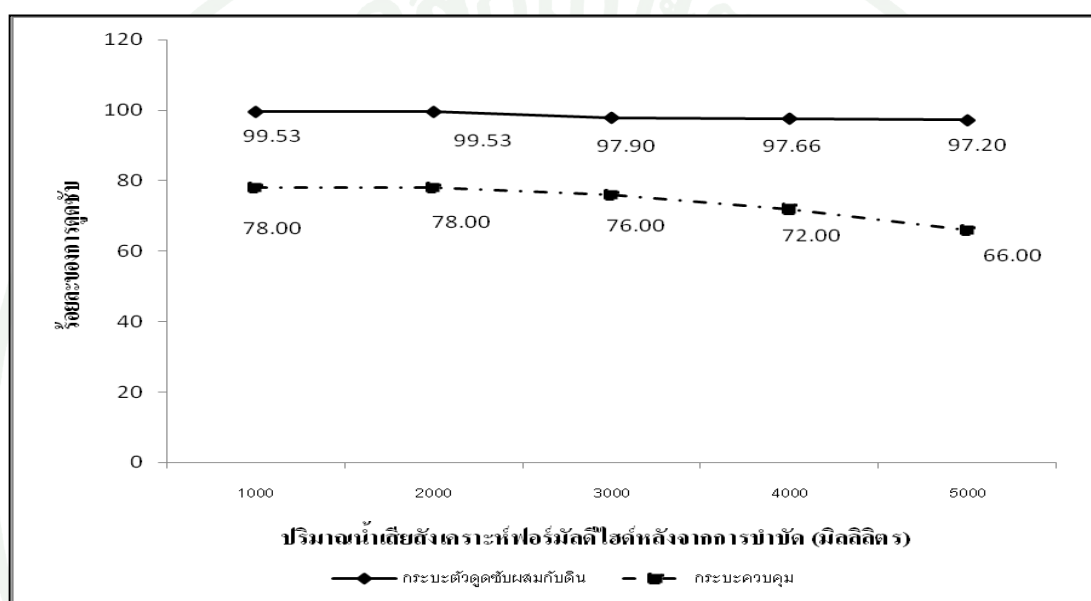
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์จากน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ต่อจำนวนครั้งที่บำบัดในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถุ่ยัสมกับดินในอัตราส่วนต่างๆ โดยการทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ในคอลัมน์ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ดังภาพที่ 32 จึงอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณดินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวใหม่ให้กับตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และต่อจากนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก พื้นที่ตัวดูดซับมีจำกัด และเมื่อตัวดูดซับเกิดกระบวนการดูดซับจนอิ่มตัวและเข้าสู่สภาวะสมดุลจะเกิดกระบวนการคายซับร่วมด้วย (นิพนธ์ และกณิศา, 2550)

6. ศึกษาประสิทธิภาพบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

จากการทดลอง โดยการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยใช้กระบอกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร, ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ่านรูปถุ่ยัสมกับดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้คือ 8:600 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบอกควบคุมที่ไม่ผสมตัวดูดซับถ่านรูปถุ่ยัสมและปลูกต้นรูปถุ่ยัสม บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 40 ลิตร แซ่่งไว้ 5 วัน ปล่อยน้ำเสียออกจากกระบอกพร้อมเก็บตัวอย่างน้ำครั้งละ 1.0 ลิตร

จนกระทั่งไม่มีน้ำไหลออกมา พบว่า เก็บน้ำตัวอย่างได้ 5 ครั้ง และนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดฟอรัลดีไฮด์ สามารถบำบัดได้ร้อยละ 98.36 ในขณะที่ ถังควบคุมสามารถบำบัดฟอรัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 74.00 อธิบายได้ว่า ดินมีความสามารถในการดูดซับฟอรัลดีไฮด์ได้ แต่หากมีการนำตัวดูดซับเข้าไปผสมกับดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรัลดีไฮด์ หรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้ตัวดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรัลดีไฮด์มีมากขึ้น ดังภาพที่ 33 และสามารถปลูกต้นรูปถ่ายให้เจริญเติบโตได้ ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 33 ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรัลดีไฮด์ของถ่านรูปถ่ายต่อดินผสมในกระบะและกระบะควบคุมจำลองระบบหญ้ากรองน้ำเสีย



ภาพที่ 34 กระบะพลาสติกจำลองระบบหญ้ากรองน้ำเสียพร้อมต้นหญ้า

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับรูปถาวยัผสมกับดินที่ใช้เป็นวัสดุเพาะปลูก โดยใช้วิธีแบบเบดช์ และศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยวิธีการไหลต่อเนื่อง และใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ (สารละลายมาตรฐานฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร) ด้วยกระบวนการดูดซับรูปถาวยัตากแห้งและถาวยัรูปถาวยั พบว่ารูปถาวยัตากแห้ง 3 กรัม สามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอर्मัลดีไฮด์เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาบำบัด 60 นาที ได้ร้อยละ 53.85 ส่วนถาวยัรูปถาวยั 4 กรัม สามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอर्मัลดีไฮด์เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ระยะเวลาบำบัด 45 นาที ได้ร้อยละ 71.74 เห็นได้ว่าถาวยัรูปถาวยัสามารถดูดซับได้ดีกว่ารูปถาวยัตากแห้ง และนอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการดูดซับดังกล่าวสอดคล้องกับสมการไอโซเทอรั่มของแลงเมียร์

การทดลองแบบไหลต่อเนื่องตามแรงโน้มถ่วงในคอลัมน์แก้ว บรรจุตัวดูดซับถาวยัรูปถาวยัผสมกับดินในอัตราส่วนของดินที่เหมาะสม อัตราส่วนทั้ง 5 คือ 8:50, 8:100, 8:200, 8:400 และ 8:600 มีความสามารถในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ค่าเฉลี่ยร้อยละ 63.49, 97.78, 97.98, 97.99 และ 95.84 ตามลำดับ พบว่า อัตราส่วน 8:400 สามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุด แต่หากนำไปประยุกต์ใช้จริงอัตราส่วนดังกล่าวอาจจะปลูกพืชไม่ได้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้อัตราส่วน 8:600 ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดไม่แตกต่างกันมากเพื่อต้นพืชจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี

การทดลองจำลองการบำบัดน้ำเสียแบบหญาักรองน้ำเสียโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ทำการทดลองในกระบะปลูกขนาด 51×51×54 ซม. ที่บรรจุกรวด 7 เซนติเมตร ทราຍหยาบ 3 เซนติเมตร ทราຍละเอียด 2 เซนติเมตร และถาวยัรูปถาวยัผสมดินในอัตราส่วน 8:600 พร้อมปลูกรูปถาวยัจนกระทั่งต้นรูปถาวยัเจริญเติบโตจนมีความสูง 1.0 เมตร แบบจำลองระบบหญาักรองน้ำเสีย สามารถ

บำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้เฉลี่ยร้อยละ 98.36 ซึ่งสามารถบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้สูงกว่ากระบวนการบำบัดที่ไม่
มีตัวดูดซับ

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ถ่านรูปถ่านและถ่านรูปถ่านผสมดินเป็นวัสดุปลูกสามารถ
เพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาอัตราการคายระเหยของฟอร์มัลดีไฮด์ในการลงแปลงปลูกในระบบหมุนเวียนน้ำ
เสีย
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคายระเหยของสารลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์
- 3 ศึกษาการประยุกต์เพื่อใช้งานจริงกับน้ำเสียประเภทอื่นๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2541. **ฟอร์มัลดีไฮด์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย
กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

คัทลียา เงินจั่น. 2555. การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ จังหวัด
สมุทรสาครด้วยซังข้าวโพดและถ่านซังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดวงพร สุวรรณกุล และรังสิต สุวรรณเขตนิกม. 2544. **วัชพืชในประเทศไทย**.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทัศนีย์ อัดตะนันท์. 2534. **ดินที่ใช้ปลูกข้าว**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. **หลักการการตรวจวิเคราะห์
คุณภาพทางเคมี**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ปกรณ์ ประดิษฐ์ทอง. 2540. **การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในระบบ
บำบัดน้ำเสีย จังหวัดเพชรบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ไพบุลย์ ประพฤติธรรม. 2528. **เคมีของดิน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรพงศ์ วาระรัมย์. 2551. การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทีลินออกไซด์
และเอทีลินไกลคอลด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สโรชา หนูยัง. 2552. การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียด้วยถ่านรูปถั่วและตะกอนดิน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิทธิชัย ดันธนะสฤงค์. 2538. การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพขังน้ำสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุชาดา ศรีเพ็ญ. 2542. **พรรณไม้น้ำในประเทศไทย**. อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, กรุงเทพฯ.

สุชาดา ศรีเพ็ญ, สายัณห์ ทัดศรี, จันทนา สุขปริดี, สุวพงษ์ สวัสดิ์พานิช, สุมณ มาสุรณ และสมบัติ ชินะวงศ์. 2537. การคัดเลือกพืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธี grass filtration, น 1-7. ใน เอกสารการประชุมเชิงปฏิบัติการโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ วันที่ 2-3 พฤษภาคม 2537. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุรัช มัจฉาชีพ. 2538. **วัชพืชในประเทศไทย**. สำนักพิมพ์แพร่พิทยา, กรุงเทพฯ.

อุไรวรรณ เอกสินทร์. 2545. การกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ผ่านการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนในระบบบึงประดิษฐ์แบบผสมผสานด้วยรูปถ่ายและกกสามเหลี่ยม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อำพล เสนาณรงค์. 2544. รูปถ่าย. **ชีวปริทรรศน์** 3 (6): 2-3.

อำไพ ขงบุญเกิด. 2538. **อนุกรมวิธานพืชอักษร ก. ฉบับราชบัณฑิตยสถาน**. เพื่อนพิมพ์, กรุงเทพฯ.

Gellman, Isaih and H. Heukelekian. 1950. Biological oxidation of formaldehyde. **Sewage and Industrial Wastes** 22 (1): 1,321-1,325.

Grace, J.B. and J.S. Harrison. 1986. The biology of Canadian weeds. **Canadian Journal of Plant Science** 66 (1): 361-379.

Grace, J.B. and R.G. Wetzel. 1982. Effect of size and growth rate on vegetative reproduction in *Typha* **Oecologia** 50 (1): 158-161.

- Fagnani, E., C.B. Melios, L. Pezza and H.R. Pezza. 2003. Chomotropic acid formaldehyde reaction in strongly acidic media. The role of dissolved oxygen and replacement of concentrated suiphuric acid. **Talanta** 60 (1): 171-176.
- Hildalgo A., A. Lopategi, M. Prieto and J.L. Serra. 2002. Formaldehyde removal in synthetic and industrial wastewater by *Rhodococcus erythropolis* UPV-1. **Appl Microbiol Biotechnol** 58 (1): 260-263.
- Lotfy H.R. and I.G. Rashed. 2002. A method for treating wastewater containing formaldehyde. **Water Research** 36 (1): 633-637
- Office of Environmental Health Hazard AssessMent. 2007. **Chornic toxicity summary formaldehyde**. Office of Environmental Health Hazard AssessMent, California.
- United Nation Environmental Program. 2002. Formaldehyde, pp. 57-65. *In* **SIDS Initial Assessment Report For SIAM 14th**. United Nation Environmental, USA.
- Vidal G., Z.P. Jiang, F. Omil, F. Thalasso, R. Mendez and J.M. Lema. 1999. Continuous anaerobic treatment of wastewaters containing formaldehyde and urea. **Bioresource Technology** 70 (1): 283-291.
- Wilcox, D.A. 1986. The effect of deicing salts on vegetation in Pinhook Bog, Indiana. **Canadian Journal of Botany** 64 (1): 865-874.



ตารางผนวกที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อปริมาณรูปถ่ายติดแห้ง

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ
1	18.51
2	29.62
3	39.81
4	36.11
5	32.40

ตารางผนวกที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อปริมาณถ่านรูปถ่าย

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับ
1	28.44
2	29.31
3	32.76
4	51.72
5	41.38

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อระยะเวลาสัมผัสของรูปถ่ายตากแห้ง

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละของการดูดซับ
15	41.02
30	41.02
45	44.87
60	53.84
90	44.87

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อระยะเวลาสัมผัสของถ่านรูปถ่าย

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละของการดูดซับ
15	53.26
30	60.86
45	71.74
60	71.74
90	67.39

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ของรูปถ่ายตากแห้ง

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละของการดูดซับ
10	53.38
20	40.38
30	24.60
40	16.68
50	10.88

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์
ต่อความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถ่าย

ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ร้อยละของการดูดซับ
10	69.05
20	68.01
30	43.66
40	37.78
50	36.13

ตารางผนวกที่ 7 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ต่ออัตราส่วนตัวดูดซับถ่าน
รูปฤาษีต่อดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 1

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.016	0.019	0.016	0.017	63.36
70	0.018	0.018	0.023	0.019	56.81
120	0.027	0.019	0.027	0.024	45.45
170	0.022	0.027	0.025	0.024	45.45

ตารางผนวกที่ 8 ประสิทธิภาพของการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปฤาษีต่อ
ดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 2

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.013	0.012	0.015	0.013	75.47
70	0.014	0.015	0.015	0.014	73.58
120	0.014	0.018	0.017	0.016	69.81
170	0.020	0.021	0.019	0.020	62.26

ตารางผนวกที่ 9 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดิน 8: 50 กรัม ครั้งที่ 3

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.010	0.009	0.011	0.010	76.74
70	0.015	0.017	0.013	0.015	65.11
120	0.014	0.017	0.017	0.016	62.79
170	0.015	0.016	0.016	0.015	65.11

ตารางผนวกที่ 10 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่าน
รูปถ่านต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 1

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.017	0.017	0.019	0.017	95.66
70	0.019	0.017	0.022	0.019	95.15
120	0.014	0.014	0.012	0.013	96.68
170	0.012	0.013	0.014	0.013	96.68

ตารางผนวกที่ 11 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่าน
รูปถ่านต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 2

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.008	0.000	0.003	0.003	99.20
70	0.009	0.012	0.002	0.007	98.15
120	0.004	0.003	0.004	0.004	98.94
170	0.003	0.003	0.001	0.002	99.47

ตารางผนวกที่ 12 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ต่ออัตราส่วนตัวดูดซับถ่าน
รูปถ่านต่อดิน 8: 100 กรัม ครั้งที่ 3

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.005	0.015	0.014	0.011	98.16
70	0.009	0.009	0.007	0.008	98.66
120	0.009	0.012	0.013	0.011	98.16
170	0.011	0.013	0.015	0.009	98.50

ตารางผนวกที่ 13 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่าน
รูปถ่านต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 1

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.011	0.011	0.019	0.013	96.68
70	0.015	0.020	0.015	0.016	95.91
120	0.014	0.013	0.011	0.012	96.93
170	0.012	0.012	0.013	0.012	96.93

ตารางผนวกที่ 14 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 2

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.006	0.000	0.002	0.002	99.47
70	0.003	0.011	0.011	0.008	97.88
120	0.005	0.003	0.001	0.003	99.20
170	0.001	0.000	0.002	0.001	99.73

ตารางผนวกที่ 15 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาวยี่
ต่อดิน 8: 200 กรัม ครั้งที่ 3

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.014	0.011	0.012	0.012	98.00
70	0.010	0.012	0.010	0.010	98.30
120	0.013	0.009	0.010	0.010	98.30
170	0.011	0.010	0.007	0.009	98.50

ตารางผนวกที่ 16 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาวยี่
ต่อดินแบบผสม 8: 400 กรัม ครั้งที่ 1

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.010	0.009	0.009	0.009	97.17
70	0.001	0.001	0.004	0.002	99.37
120	0.003	0.002	0.004	0.003	99.05
170	0.000	0.003	0.002	0.001	99.68

ตารางผนวกที่ 17 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดินแบบผสม 8: 400 กรัม ครั้งที่ 2

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.003	0.003	0.003	0.003	99.08
70	0.001	0.005	0.009	0.005	98.47
120	0.004	0.005	0.005	0.004	98.77
170	0.005	0.004	0.005	0.004	98.77

ตารางผนวกที่ 18 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดินแบบผสม 8: 400 กรัม ครั้งที่ 3

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.008	0.007	0.008	0.007	97.80
70	0.009	0.011	0.015	0.011	96.55
120	0.015	0.012	0.015	0.014	95.61
170	0.015	0.015	0.012	0.014	96.51

ตารางผนวกที่ 19 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดินแบบผสม 8: 600 กรัม ครั้งที่ 1

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.009	0.007	0.011	0.009	97.17
70	0.015	0.022	0.019	0.018	94.35
120	0.019	0.025	0.025	0.023	92.78
170	0.021	0.020	0.021	0.020	93.73

ตารางผนวกที่ 20 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดินแบบผสม 8: 600 กรัม ครั้งที่ 2

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.002	0.005	0.002	0.003	99.08
70	0.004	0.002	0.005	0.003	99.08
120	0.002	0.004	0.005	0.003	99.08
170	0.011	0.005	0.009	0.008	97.55

ตารางผนวกที่ 21 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถ่าน
ต่อดินแบบผสม 8: 600 กรัม ครั้งที่ 3

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
20	0.015	0.015	0.020	0.016	94.98
70	0.012	0.015	0.022	0.016	94.98
120	0.020	0.025	0.015	0.020	93.73
170	0.015	0.022	0.025	0.020	93.73

ตารางผนวกที่ 22 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาวยี่
ต่อดินแบบผสมในกระเบะทดลองปลูก

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
1000	0.003	0.001	0.004	0.002	99.53
2000	0.004	0.001	0.001	0.002	99.53
3000	0.008	0.011	0.010	0.009	97.90
4000	0.013	0.011	0.007	0.010	97.66
5000	0.013	0.011	0.013	0.012	97.20

ตารางผนวกที่ 23 ประสิทธิภาพร้อยละของการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์อัตราส่วนตัวดูดซับถ่านรูปถาวยี่
ต่อดินในกระเบะควบคุม

ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ ของการดูดซับ
	1	2	3		
1000	0.015	0.010	0.010	0.011	78.00
2000	0.010	0.014	0.011	0.011	78.00
3000	0.010	0.012	0.015	0.012	76.00
4000	0.014	0.015	0.013	0.014	72.00
5000	0.018	0.018	0.017	0.017	66.00

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวสุรางคนางค์ ทุมรัตน์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	14 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกระบี่
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (การจัดการทรัพยากรดินและ สิ่งแวดล้อม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-