



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้กกกลมเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบ
บำบัดน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Formaldehyde Removal by Adsorption with *Cyperus Corymbosus* Rottb as Growing-
Materials in Grass Filtration Treatment System and Constructed Wetland

นามผู้วิจัย นางสาวสายรุ้ง กุญเมืองคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์คณิดา ตั้งคนานุรักษ์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคนานุรักษ์, Ph D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสถิตี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้กกกลมเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัด
หญ้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Formaldehyde Removal by Adsorption with *Cyperus Corymbosus Rottb* as Growing-Materials in
Grass Filtration Treatment System and Constructed Wetland

โดย

นางสาวสายรุ้ง กุญเมืองคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2556

สายรุ้ง กุญเมืองคำ 2556: การกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้กกกลม เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบำบัดห้ำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ปรินญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์, วท.ม. 97 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียของตัวดูดซับกกกลมตากแห้ง และถ่านกกกลม และวัสดุปลูกในระบบบ้ำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม จากการทดลองแบบเบดซ์ โดยใช้สารละลายฟอर्मัลดีไฮด์มาตรฐาน เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิตร พบว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 45 นาที กกกลมตากแห้ง 6 กรัม และ ถ่านกกกลม 5 กรัม มีร้อยละการดูดซับ เท่ากับ 31.50 และ 32.50 ดังนั้นถ่านกกกลมจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบบ้ำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม นอกจากนั้นได้ทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องในคอลัมน์แก้ว ซึ่งบรรจุวัสดุเพาะปลูกเหมือนระบบบ้ำกรองน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ผลการทดลอง พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านกกกลมต่อดิน เท่ากับ 1:60 มีร้อยละการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 97.93. นอกจากนั้นได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ในกระเบะพลาสติกขนาด 51x51x54 เซนติเมตร ที่บรรจุชั้นวัสดุเพาะปลูกเหมือนการทดลองแบบไหลต่อเนื่องและปลูกต้นกกกลม จากนั้นบ้ำดน้ำเสียสังเคราะห์ตามหลักการของระบบบ้ำกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ ผลการทดลอง พบว่าระบบบ้ำดห้ำกรองน้ำเสีย สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 96.35 และระบบบ้ำดน้ำเสียแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 37.88

Sairung Kuymoungkam 2013: Formaldehyde Removal by Adsorption with *Cyperus Corymbosus Rottb* as Growing-Materials in Grass Filtration Treatment System and Constructed Wetland. Master of Science (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science. Thesis Advisor: Associate Professor Kanita Tungkananuruk, M.Sc. 97 pages.

The objective of this research was to study the efficiency of dried *Cyperus Corymbosus Rottb* and *Cyperus Corymbosus Rottb* charcoal as adsorbent and growing materials in the grass filtration treatment system and constructed wetland for removal of formaldehyde from wastewater. From batch experiment, by using 100 mL of the synthetic wastewater contained with formaldehyde 20 mg/L, it has been found that at 45 min removal time the percent removal from dried *Cyperus Corymbosus Rottb* 5 g and *Cyperus Corymbosus Rottb* charcoal 6 g was 31.5 and 32.50 respectively. Therefore, *Cyperus Corymbosus Rottb* charcoal were appropriate for growing materials in the grass filtration treatment system and Constructed wetland. Furthermore, the gravity continuous flow experiment was investigated by using glass column which was packed with growing material as the grass filtration system of The King's Royally Initiated Laem Phak Bia Environmental Research and Development Project (LERD Project). The results demonstrated that the optimum by weight ratio of *Cyperus Corymbosus Rottb* charcoal to soil was 1:60, and the removal performance of formaldehyde in the synthetic waste water was 97.93%. In addition, the filtrated lysimeter technique was carried out in square plastic tank with size 51x51x54 cm that containing the growing material layer as the continuous flow experiment with growing *Cyperus Corymbosus Rottb*. Then the synthetic wastewater was treated as the grass filtration treatment system and constructed wetland of LERD Project. The results demonstrated formaldehyde removed in grass filtration was 96.35 % and constructed wetland was 37.88 %.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบของพระคุณรองศาสตราจารย์คณิดา ดังคนานุรักษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาที่
สละเวลาในการช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนช่วยแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ
ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์อาจารย์ ดร. นิพนธ์ ดังคนานุรักษ์ กรรมการร่วมที่ได้กรุณา
ให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำการ
ศึกษาวิจัยทดลอง รวมทั้งอุปกรณ์ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม
แหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ได้สนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณวัชรพงษ์
วาระรัมย์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณพ่อจำลอง คุณแม่พุดซ้อน กุญเมืองคำ ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจ
เสมอมา รวมถึงขอบคุณเพื่อนๆ สิ่งแวดล้อม 34 ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังใจและกำลังใจในการ
ศึกษาวิจัย จนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สายรุ้ง กุญเมืองคำ

มกราคม 2556

สารบัญ

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายศัพท์	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ภาคผนวก	81
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟอร์มัลดีไฮด์	3
2	ความเป็นพิษเฉียบพลันของฟอร์มัลดีไฮด์ในหนูและกระด่ายทดลอง	10
3	ความเป็นพิษเรื้อรังของฟอร์มัลดีไฮด์ในหนูทดลอง	11
4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และปริมาณกกกลมตากแห้ง	52
5	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และปริมาณถ่านกกกลม	51
6	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้งและระยะเวลาสัมผัส	55
7	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลมและระยะเวลาสัมผัส	57
8	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์	58
9	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์	59
10	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมกับดิน	67
11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการบำบัด ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมกับดิน	69
12	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ และวัสดุเพาะปลูกในกระบะทดลองการบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย	71
13	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระบะพลาสติกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	73

ตารางผนวกที่	หน้า
1 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับกกกลมตากแห้งที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์	82
2 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับถ่านกกกลมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์	82
3 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้ง	83
4 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม	83
5 อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้ง	84
6 อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม	84
7 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้ง	85
8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม	85
9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 กรัมโดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	86
10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 20 กรัมโดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	86
11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 30 กรัมโดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	87
12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 40 กรัมโดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	87
13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 50 กรัมโดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	88

ตารางผนวกที่	หน้า
14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 60 กรัม โดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	88
15 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 กรัม โดยทดลอง การไหลแบบต่อเนื่อง	89
16 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 20 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	90
17 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 30 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	91
18 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 40 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	92
19 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 50 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	93
20 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอर्मัลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอर्मัล ดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 60 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง	94

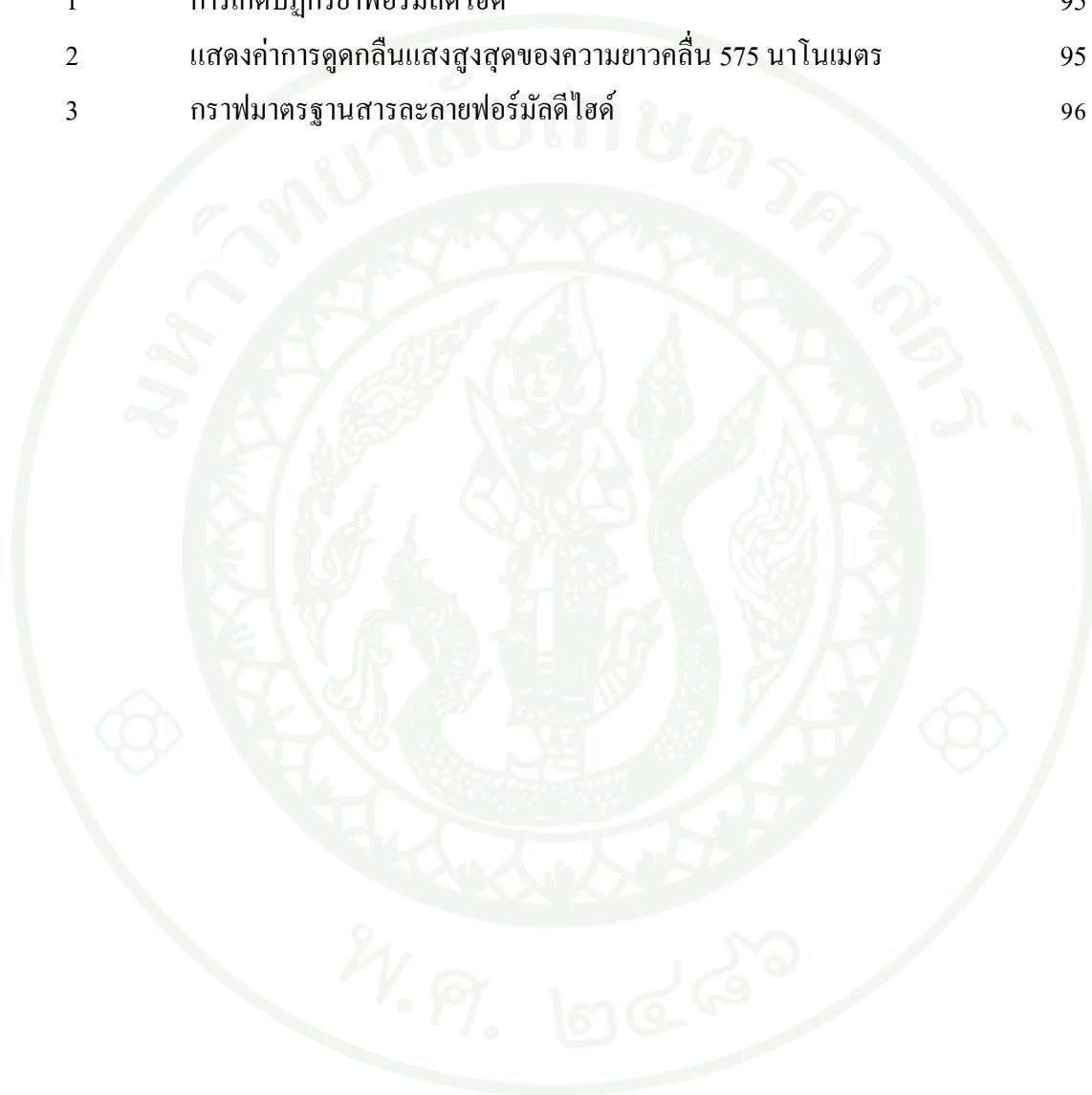
สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปฏิบัติการเปลี่ยนรูปของฟอร์มัลดีไฮด์	7
2	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ	15
3	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	17
4	แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ	17
5	แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว	18
6	การดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น	19
7	การยืดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ	20
8	การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวดูดซับไปยังตัวดูดซับ	23
9	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน	24
10	กกกกลม <i>Cyperus corymbosus</i> Rottb.	26
11	กกกกลม (กกจันทบูรณ) <i>Cyperus corymbosus</i> Rottb.	28
12	กกกกลมก่อนตากแห้ง	30
13	โครงสร้างภายในและภายนอกของระบบหล้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	31
14	พืชที่อยู่ในระบบที่ลุ่มชื้นแฉะ สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงที่ระบบรากในสภาวะที่ไร้อากาศ	39
15	กกกกลมตากแห้ง	44
16	เตาเผา	45
17	ถ่านกกกกลม	45
18	การศึกษาอิทธิพลของปริมาณกกกกลมตากแห้งและถ่านกกกกลม โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	47
19	การศึกษาอิทธิพลระยะเวลาสัมผัสของกกกกลมตากแห้งและถ่านกกกกลม โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์	47
20	กระเพาะพลาสติกบรรจุชั้นวัสดุปลูกในระบบหล้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วย ย่อยขนาดเล็ก	50
22	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และปริมาณกกกลม ตากแห้ง	52
23	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และปริมาณถ่านกกกลม	23
24	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้งและ ระยะเวลาสัมผัส	55
25	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของถ่านกกกลมและ ระยะเวลาสัมผัส	56
26	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และความเข้มข้นของ สารละลายฟอर्मัลดีไฮด์	58
27	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และความเข้มข้นของ สารละลายฟอर्मัลดีไฮด์	59
28	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยใช้กกกลมตากแห้ง	61
29	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรุณดิชโดยใช้กกกลมตากแห้ง	62
30	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยใช้ถ่านกกกลม	64
31	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรุณดิชโดยใช้ถ่านกกกลม	65
32	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ ค่าเฉลี่ย ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน	68
33	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการบำบัด ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ ฟอर्मัลดีไฮด์และอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน	69
34	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระเบ ร้อยละ การดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระเบพลาสติก แบบหุ้มกรองน้ำเสีย	71
35	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระเบ ร้อยละ การดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระเบพลาสติก แบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม	73

ภาพผนวกที่		หน้า
1	การเกิดปฏิกิริยาฟอร์มัลดีไฮด์	95
2	แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร	95
3	กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์	96

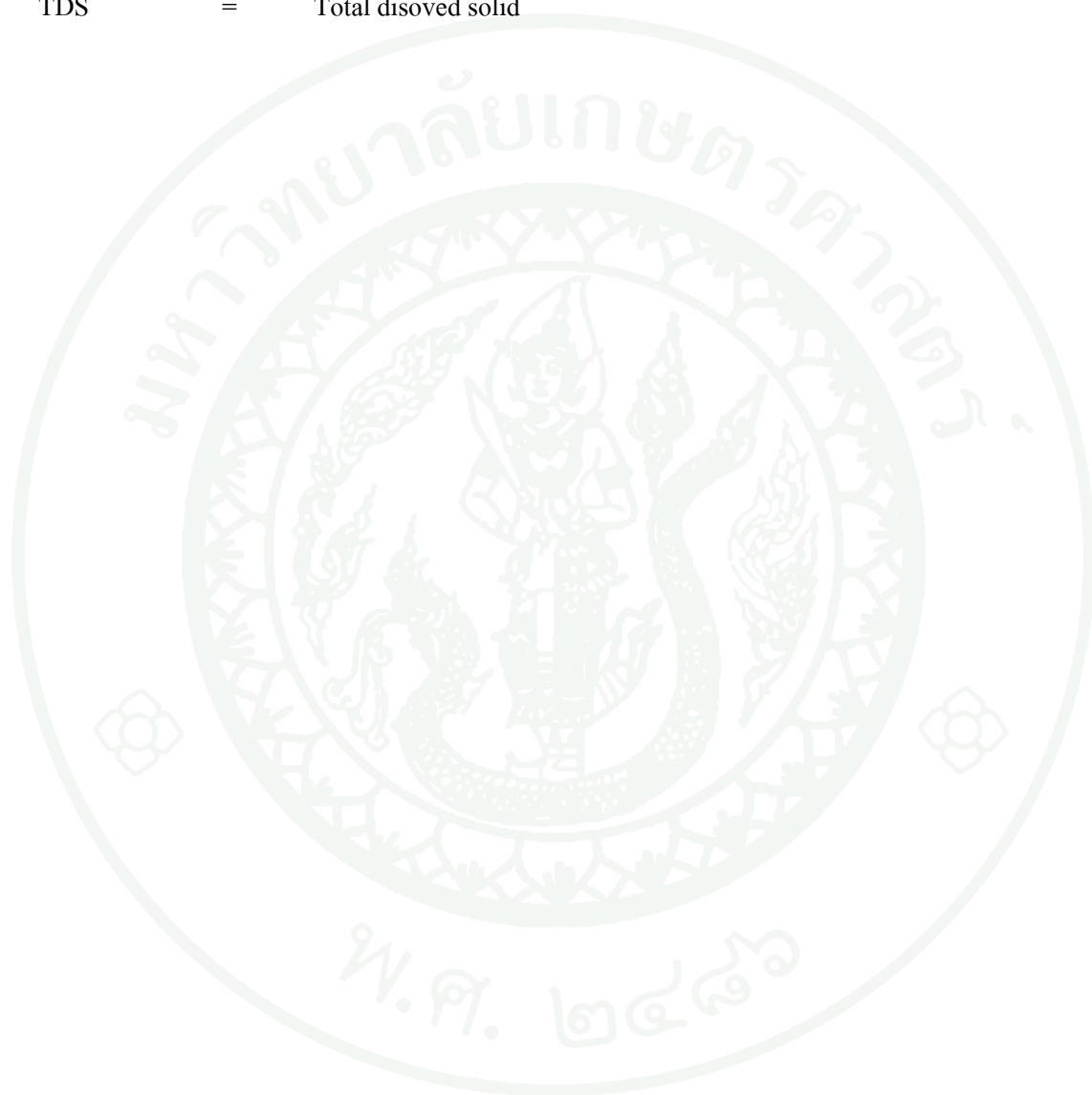


คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BOD = Biochemical oxygen demand

TSS = Total suspended demand

TDS = Total dissolved solid



การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้กกกลมเป็นวัสดุเพาะปลูก ในระบบบำบัดน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Formaldehyde Removal by Adsorption with *Cyperus Corymbosus* Rottb as Growing-Materials in Grass Filtration Treatment System and Constructed Wetland

คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทย มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมมากขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกในประเทศไทยมีการขยายตัวตามเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งมีการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิต ฟอร์มาลดีไฮด์มีประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นในการเตรียมสารอื่น เช่น กรดฟอร์มิก ที่ใช้ทำพลาสติกที่เรียกว่า ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ และถ้าทำปฏิกิริยากับฟีนอลจะได้ฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ที่ใช้เป็นกาวสำหรับการทำเฟอร์นิเจอร์ และบางอุตสาหกรรมก็ได้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นผลพลอยได้ตามออกมา นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารพิษที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตหลายชนิด ดังนั้นหากมีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำ พืชน้ำ และมนุษย์ โดยเฉพาะระบบทางเดินหายใจและเป็นสารก่อเกิดมะเร็ง ค่ามาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมคือ ไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร

ในงานวิจัยนี้ ได้ประยุกต์ใช้กกกลมซึ่งเป็นพืชที่เหลือทิ้งและต้องกำจัดหลังจากใช้บำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ มาทำเป็นวัสดุเพาะปลูก โดยทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียอุตสาหกรรม กกกลมเป็นวัชพืชน้ำ พบได้ตามแหล่งน้ำทั่วไปที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อสถานะแวดล้อมและการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำ ทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์มีพิษ เมื่อกกกลมมีความหนาแน่นมากทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำไม่เพียงพอต่อการหายใจของสัตว์น้ำ นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยวัสดุดูดซับกกกลมยังเป็นวิธีการที่ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี ค่าไฟฟ้า ในการเติมอากาศ ไม่มีผลกระทบต่อสารเคมีตกค้าง และไม่ต้องเสียค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ในการดำเนินการ และยังเป็นการใช้ประโยชน์จากพืชซึ่งเป็นทรัพยากรทางธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ ด้วยระบบหม้อกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้วัสดุดูดซับกักกมลเป็นวัสดุปลูกผสมกับดิน
2. เพื่อนำผลการวิจัยในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของกักกมลของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนฟอर्मัลดีไฮด์

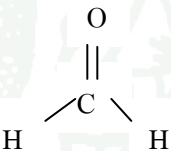
การตรวจเอกสาร

1. ฟอर्मัลดีไฮด์

1.1 คุณสมบัติ

สารละลายฟอर्मัลดีไฮด์หรือเรียกทั่วไปว่า “ฟอर्मาลิน” หมายถึง สารละลายที่ประกอบด้วย ก๊าซฟอर्मัลดีไฮด์ประมาณร้อยละ 37-50 โดยน้ำหนักในน้ำ และมีเมทานอล ปนอยู่ด้วยประมาณ 10-15% ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ลักษณะทั่วไปของฟอर्मาลินเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของฟอर्मัลดีไฮด์

สมบัติทางกายภาพและเคมี	รายละเอียด
ลักษณะทั่วไป	ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น
สูตรโครงสร้าง (Structure formula)	
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	: 30.03 g/mol
การระเบิด (explosion)	lower explosive limit 7.0% upper explosive limit 73.0%
อุณหภูมิที่ติดไฟเอง (autoignition temp)	: 806°F
ความหนาแน่น (density)	: 1.0 g/m ³
จุดเดือด (boiling point)	: -3 °F

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สมบัติทางกายภาพและเคมี	รายละเอียด
จุดวาบไฟ (flash point)	สูตร 37.0% (methanol free) 185 °F สูตร 15% (methanol free) 122 °F
ชื่ออื่นๆ (synonyms)	- ฟอर्मิก อัลดีไฮด์ (Formic aldehyde) - เมทานอล (Methanal) - ออกโซมีเทน (Oxomethane) - ฟอर्मาลีน (Formalin) ประกอบด้วย ฟอर्मัลดีไฮด์ร้อยละ 35-40 ละลายในน้ำ

1.2 ปฏิบัติการเปลี่ยนรูปฟอर्मัลดีไฮด์

การกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานพลาสติก-เรซิน ด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศนั้น ฟอर्मัลดีไฮด์จะถูกย่อยด้วยแบคทีเรีย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เมทานอลและ กรดฟอर्मิก

1.3 การผลิต (production)

ฟอर्मัลดีไฮด์ ผลิตขึ้นโดยการออกซิเดชันของ methanol กับออกซิเจนในอากาศ หรือโดยการออกซิเดชันของมีเทน (CH_4)

1.4 การใช้ (Use)

1.4.1 ด้านอุตสาหกรรม ใช้ในการผลิตเรซินและพลาสติก เช่น urea-formaldehyde, melamine-formaldehyde, phenol-formaldehyde และอื่นๆ การสังเคราะห์ urotropine, propagul alcohol ยา และวัตถุระเบิดต่างๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะคริลิก รวมถึงการฟอกหนัง และสีตกแต่งอาหาร การย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่นขึ้น การฟอกสีและการพิมพ์ เช่น การเตรียม rongalite, Heraldite และ Decroline อุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้ การผสมโลหะเพื่อระงับ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อผลิตผลที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลง

ลักษณะน้ำหนักและความแข็งแรงของไหมสังเคราะห์ ใช้ในกระบวนการล้างฟิล์มเพื่อให้เก็บฟิล์มรักษาได้นาน

1.4.2 ด้านการเกษตร ใช้สำหรับการทำลายและป้องกันจุลินทรีย์และต้นไม้ที่เป็นโรค ป้องกันผลิตผลเกษตรจากการเสียหายระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา ฆ่าเชื้อโรคในดิน ทำความสะอาดสถานที่เก็บอุปกรณ์ เช่น ถังไม้ เป็นส่วนผสมของสารละลายที่ใช้เคลือบผัก ผลไม้ จำพวกส้ม ระหว่างการเก็บเกี่ยวเพื่อชะลอการเน่าเสีย

1.4.3 ด้านการแพทย์ ใช้ในการเก็บรักษา anatomical specimens, ดอกศพ ทำความสะอาดห้องผู้ป่วย เครื่องมือเครื่องใช้ในการเตรียมและสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยา วัคซีน

1.4.4 เครื่องสำอาง ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อไม่ให้เหงื่อออกมาก ใช้ในยาสีฟัน ยาบ้วนปาก สบู่ ครีมโกนหนวด เพื่อฆ่าเชื้อ และใช้น้ำยาคัดกลิ่นตัวและอื่นๆ

1.5 การแพร่กระจายของฟอร์มัลดีไฮด์สู่สิ่งแวดล้อม

1.5.1 ทางอากาศ

ฟอร์มัลดีไฮด์แพร่กระจายสู่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ด้วยกระบวนการโฟโตเคมี หรือด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ นั้น ประกอบด้วย ปฏิกิริยาร่วมกับไนเตรต ไฮโดรเปอร์ออกซิล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซนและคลอรีน โดยที่ฟอร์มัลดีไฮด์ถูกขนส่งผ่านฝน ฝุ่น และก้อนเมฆ ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่ร่วมกับไฮดรอกซิลนั้น มีความสำคัญต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน(photooxidation) เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราความเข้มข้นของปฏิกิริยา ทั้งนี้ช่วงชีวิตของฟอร์มัลดีไฮด์ในบรรยากาศนั้นมีค่าระหว่าง 7.1-71.3 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนครึ่งชีวิตของฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ที่ 1.6 ชั่วโมงต่ำกว่าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซล ฟอร์มัลดีไฮด์เข้าสู่บรรยากาศในลักษณะของสารมลพิษทุติยภูมิ จากไอเสียรถยนต์จากปฏิกิริยาโฟโตเคมีที่มีความสลับซับซ้อนซึ่งถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยรังสีอัลตราไวโอเลต

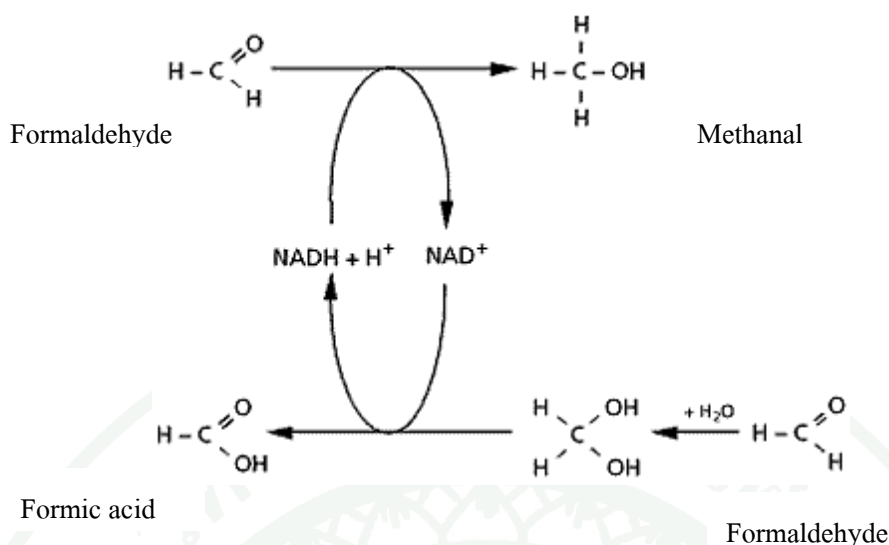
1.5.2 ทางน้ำ

ฟอर्मัลดีไฮด์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นไฮเดรต (hydrate) คือมีน้ำล้อมรอบ โมเลกุลของฟอर्मัลดีไฮด์ อยู่ในรูปไกลคอลและส่วนน้อยที่ไม่ใช่ไฮเดรตอยู่ร้อยละ 0.04 โดยมวล ในรูปของสารละลายให้ความเข้มข้นสูงในน้ำผิวดิน ทั้งนี้ฟอर्मัลดีไฮด์ยังสามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งฟอर्मัลดีไฮด์ในแม่น้ำจะสลายตัวภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ 20 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ 48 ชั่วโมง โดยที่มีครึ่งชีวิตที่ 24-168 ชั่วโมงในน้ำผิวดิน และ 48-336 ชั่วโมงในน้ำใต้ดิน

แหล่งมลพิษของฟอर्मัลดีไฮด์อีกแหล่งหนึ่งได้แก่ น้ำทิ้ง ปัญหามลพิษจากฟอर्मัลดีไฮด์จะเกิดขึ้นกับน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำเมื่อดินใน hydraulic structure เกิดการเสถียร (stabilize) กับสารที่มีฟีนอลแอลกอฮอล์และฟีนอลเป็นองค์ประกอบ ทำให้ฟอर्मัลดีไฮด์อาจจะถูกชะล้างมาเป็นปริมาณ 4-64.7 มิลลิกรัม/ลิตร

1.5.3 ทางดิน

ฟอर्मัลดีไฮด์ไม่สามารถถูกดูดซับในเม็ดดินได้ แต่สามารถเคลื่อนที่ในดินได้ด้วยการไหลบ่าไปกับน้ำผิวดิน และการชะล้างสู่ น้ำใต้ดิน ขึ้นกับชนิดของดิน ความถี่ของการตกของฝน ความลึกของน้ำใต้ดินและการย่อยสลายของฟอर्मัลดีไฮด์ โดยที่การย่อยสลายฟอर्मัลดีไฮด์ในดินนั้นยังขึ้นอยู่กับความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน ครึ่งชีวิตของฟอर्मัลดีไฮด์ในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 24-168 ชั่วโมง ในสภาวะการย่อยสลายด้วยออกซิเจน (WHO, 2002)



ภาพที่ 1 ปฏิกริยาการเปลี่ยนรูปของฟอร์มัลดีไฮด์

ที่มา: Chen and Shieh (1985)

การผลิต (production) ฟอร์มัลดีไฮด์ ผลิตขึ้นโดยการออกซิเดชันของ methanol กับออกซิเจนในอากาศ หรือโดยการออกซิเดชันของมีเทน (CH_4)

การใช้ (Use)ด้านอุตสาหกรรม ใช้ในการผลิตเรซินและพลาสติก เช่น urea-formaldehyde, melamine-formaldehyde, phenol-formaldehyde และอื่นๆ การสังเคราะห์ urotropine, propagul alcohol ยา และวัตถุระเบิดต่างๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะคริลิก รวมถึงการฟอกหนัง และสีตกแต่งอาหาร การย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่นขึ้น การฟอกสีและการพิมพ์ เช่น การเตรียม rongalite, Heraldite และ Decroline อุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้ การผสมโลหะเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อผลิตผลที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำหนักและความแข็งแรงของไหมสังเคราะห์ ใช้ในกระบวนการล้างฟิล์มเพื่อให้เก็บฟิล์มรักษาได้นาน

ด้านการเกษตร ใช้สำหรับการทำลายและป้องกันจุลินทรีย์และต้นไม้ที่เป็นโรค ป้องกันผลิตผลเกษตรจากการเสียหายระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา ฆ่าเชื้อโรคในดิน ทำความสะอาดสถานที่เก็บอุปกรณ์ เช่น ถังไม้ เป็นส่วนผสมของสารละลายที่ใช้เคลือบผัก ผลไม้ จำพวกส้มระหว่างการเก็บเกี่ยวเพื่อชะลอการเน่าเสีย

ด้านการแพทย์ ใช้ในการเก็บรักษา anatomical specimens, ดองศพ ทำความสะอาดห้องผู้ป่วย เครื่องมือเครื่องใช้ในการเตรียมและสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยา วัคซีน

เครื่องสำอาง ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อไม่ให้เหงื่อออกมาก ใช้ในยาสีฟัน ยาบ้วนปาก สบู่ ครีมโกนหนวด เพื่อมาเชื่อ และใช้ในน้ำยาดับกลิ่นตัวและอื่นๆ

การแพร่กระจายของฟอร์มัลดีไฮด์สู่สิ่งแวดล้อม ทางอากาศฟอร์มัลดีไฮด์แพร่กระจายสู่บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ด้วยกระบวนการโฟโตเคมี หรือด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง ซึ่งกระบวนการต่างๆนั้น ประกอบด้วย ปฏิกิริยาร่วมกับไนเตรต ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซนและคลอรีน โดยที่ฟอร์มัลดีไฮด์ถูกขนส่งผ่านฝน ผุน และก้อนเมฆ ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่ร่วมกับไฮดรอกซิลนั้นมีผลสำคัญต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน(photooxidation) เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราความเข้มข้นของปฏิกิริยา ทั้งนี้ช่วงชีวิตของฟอร์มัลดีไฮด์ในบรรยากาศนั้นมีค่าระหว่าง 7.1-71.3 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง และอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนครึ่งชีวิตของฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ที่ 1.6 ชั่วโมงต่ำกว่าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ทางน้ำ ฟอรัลดีไฮด์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นไฮเดรต (hydrate) คือมีน้ำล้อมรอบโมเลกุลของฟอร์มัลดีไฮด์ อยู่ในรูปไกลคอลลและส่วนน้อยที่ไม่ใช่ไฮเดรตอยู่ร้อยละ 0.04 โดยมวล ในรูปของสารละลายให้ความเข้มข้นสูงในน้ำผิวดิน ทั้งนี้ฟอร์มัลดีไฮด์ยังสามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งฟอร์มัลดีไฮด์ในแม่น้ำจะสลายตัวภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ 20 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ 48 ชั่วโมง โดยที่มีครึ่งชีวิตที่ 24-168 ชั่วโมงในน้ำผิวดิน และ 48-336 ชั่วโมงในน้ำใต้ดิน

ทางดิน ฟอรัลดีไฮด์ไม่สามารถถูกดูดซับในเม็ดดินได้ แต่สามารถเคลื่อนที่ในดินได้ด้วยการไหลบ่าไปกับน้ำผิวดิน และการชะล้างสู่ น้ำใต้ดิน ขึ้นกับชนิดของดิน ความถี่ของการตกของฝน ความลึกของน้ำใต้ดินและการย่อยสลายของฟอร์มัลดีไฮด์ โดยที่การย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ในดินนั้นยังขึ้นอยู่กับความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน ครึ่งชีวิตของฟอร์มัลดีไฮด์ในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 24-168 ชั่วโมง ในสภาวะการย่อยสลายด้วยออกซิเจน (WHO, 2002)

1.6 ความเป็นพิษ

1.6.1 ความเป็นพิษเฉียบพลัน(acute toxicity)

จากการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ร่วมกับ dimethyl dioxane ต่อคนงานชายหญิง จำนวน 8 คน อายุระหว่าง 19-36 ปี ซึ่งได้รับสารทั้ง 2 ชนิด ระหว่างการทำงาน พบว่ามีอาการอ่อนเพลีย ปวดหัว วิงเวียน อาเจียน ปวดท้อง และหลังจากนั้นเล็กน้อยจะเกิดอาการ ระคายเคืองและระบบทางเดินหายใจขัดข้อง

ในการทดลองในหนูหายใจเอา ฟีนอล และฟอร์มาลดีไฮด์แยกจากกัน โดยแต่ละ ชนิดมีความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมงทุกวัน และให้หายใจเอาสารทั้งสองชนิดร่วมกัน โดยแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าหนูที่ได้รับสารแต่ละชนิดจะแสดงการได้รับพิษมากกว่าหนูที่ได้รับสาร 2 ชนิดร่วมกัน

การทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันในหนูโดยการให้สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ร้อยละ 2-4 โดยปริมาตรทางหลอด หลังจากได้รับสารทำให้เกิดความระคายเคืองตา จมูก และช่วงอก ลักษณะอาการเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์มากขึ้น (>120 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร) เป็นสาเหตุทำให้กลืนลำบาก หายใจขัดเฉียบพลัน อาเจียน กล้ามเนื้อกระตุก เกิดอาการชักกระตุก และตายในที่สุด (Minnesota Department of Health Fact Sheet [MDH], 2005) นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจ ถุงลมในปอด และอาการบวมน้ำในถุงปอด ผลกระทบที่เกิดขึ้นในหนูเมื่อได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ที่เข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เกิดการจับเมือกหรือของเหลวใสในเซลล์ (Toxics Use Reduction Institute, n.d.) ทั้งนี้การศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ในหนูและกระต่ายทดลองดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเป็นพิษเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ในหนูและกระต่ายทดลอง

ชนิด	ช่องทางรับสาร	LD50	อ้างอิง
หนู	ปาก	LD ₅₀ 600-700 mg/kg โดยมวล	Tsuchiya <i>et al.</i> 1975
หนู	ปาก	LD ₅₀ 800 mg/kg โดยมวล	Smyth <i>et al.</i> , 1941
กระต่าย	ผิวหนัง	LD ₅₀ 270 mg/kg โดยมวล	WHO IPCS 1989
หนู	4 ชั่วโมง ทางกร หายใจ	LD ₅₀ 578 mg/m ³ (480 มิลลิกรัม/ ลูกบาศก์เมตร)	Nogorny <i>et al.</i> , 1979
หนู	30 นาที ทางกร หายใจ	LD ₅₀ 984 mg/m ³ (816 มิลลิกรัม/ ลูกบาศก์เมตร)	Skog, 1950

ที่มา: UNEP (2002)

ความเป็นพิษเฉียบพลันในมนุษย์ทำให้เกิดความเสียหายในกระเพาะอาหาร หลังจากดื่มฟอร์มาลดีไฮด์ 45 มิลลิตร ของสารละลายเข้มข้นร้อยละ 37 หรือร้อยละ 40 โดยปริมาตร ทั้งนี้ไม่มีการรายงานการตายหลังจากสูดดมอย่างเฉียบพลัน จากการศึกษาของ WHO (2002) พบว่า ผู้ดื่มฟอร์มาลีนร้อยละ 5 โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิตร เข้าไปจะเกิดอาเจียน จากนั้นเกิดการระคายเคืองกระเพาะอาหารและเกิดอาการคลื่นไส้ ผู้ป่วยจะเสียชีวิตภายใน 40 วัน ด้วยอาการเลือดออกในกระเพาะอาหารและลำไส้

1.6.2 ความเป็นพิษเรื้อรัง(Chronic toxicity)

ความเป็นพิษเรื้อรังในสัตว์เมื่อได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นที่ 0, 2.0, 5.6 หรือ 14.3 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง/วัน/สัปดาห์ เป็นเวลา 30 เดือน พบว่า น้ำหนักของหนู ทั้งตัวผู้และตัวเมียที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5.6 และ 14.3 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักลดลง ในหนูกลุ่มที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 10 และ 15 มิลลิกรัม/ลิตร เกิดความเสียหายต่อโพรงจมูก เนื้อเยื่อเกิดการเจริญเติบโตและแบ่งตัวผิดปกติเกิดเป็นเนื้องอก หนูอายุ 2 สัปดาห์กินน้ำที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ระดับต่าง ๆ เป็นเวลา 6 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าหนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 1.5 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนัก พฤติกรรม และการแสดงออกภายนอกไม่แตกต่างจากหนูกลุ่มควบคุม แต่หนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของตับและม้าม ส่วนหนูที่ได้รับฟอร์มาลดี

ไฮด์ปริมาณสูงกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร นั้นมีโอกาสเป็นมะเร็ง (McLaughlin, 1994) ทั้งนี้การศึกษาความเป็นพิษของฟอร์มัลดีไฮด์ในหนูทดลองมีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความเป็นพิษเรื้อรังของฟอร์มัลดีไฮด์ในหนูทดลอง

ชนิด	แสดงอาการในช่วง	NOAEL (mg/m ³)	อ้างอิง
หนู	28 mo	9.80/1.00	Woutersen <i>et al.</i> , 1989
	24 mo	2.00/NA	Kern <i>et al.</i> , 1983
	24 mo	6.01/2.05	Monticello <i>et al.</i> , 1996
	24-28 mo	0.30/NA	Kamata <i>et al.</i> , 1997
	52 wk	9.40/1.00	Appleman <i>et al.</i> , 1988
	26 wk	2.95/0.98	Rusch <i>et al.</i> , 1983
	26 wk	6.00/2.00	Kimbell <i>et al.</i> , 1997
	13 wk	4.00/2.00	Wilmer <i>et al.</i> , 1989
	13 wk	9.70/1.00	Woutersen <i>et al.</i> , 1987
	13 wk	2.98/1.01	Zwart <i>et al.</i> , 1988
	24 wk	2.00/NA	Kern <i>et al.</i> , 1983
	13 wk	10.10/4.08	Maronpot <i>et al.</i> , 1986

ที่มา: OEHHA (2007)

ผลการตรวจสุขภาพพนักงานจำนวน 278 คน ซึ่งทำงานในโรงงานติดกาวไม้อัดที่ใช้เรซิน หรือกาวชนิด cabamide formaldehyde พบว่า คนงาน 129 คน เป็นโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเกิดจากการหายใจเอาฟอร์มัลดีไฮด์ที่ระเหยความเข้มข้นประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เข้าไป การตรวจสุขภาพของคนงานหญิงอายุ 25-40 ปี ที่ทำงานประมาณ 5-20 ปี ในโรงงานย้อมที่ใช้ฟอร์มาลิน ซึ่งมีฟอร์มาลินในบรรยากาศประมาณ 5-78 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร พบว่ามีอาการปวดหัว ทรงตัวลำบาก ระคายเคืองง่าย และน้ำตาไหลเป็นกระจำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) นอกจากนี้ยังมีโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็ง เช่น มะเร็งในช่องจมูก ซึ่งนับเป็นมะเร็งตัวสำคัญสำหรับผู้ที่ต้องสูดดมอยู่เป็นประจำ (McLughin, 1994) ทั้งยังก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และส่งผลต่อระบบสืบพันธุ์อีกด้วย (Environmental and Occupational Health and Safety Services [EOHSS], 2004)

1.7 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ในสิ่งแวดล้อม

ความเข้มข้นที่มีผลทำให้ปลาการ์ฟตายหมด (LC₅₀) เท่ากับ 0.2 กรัม/ลิตร และตายร้อยละ 50 (LC₅₀) เท่ากับ 0.1 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดที่ปลาทนได้ เท่ากับ 0.06 กรัม/ลิตร

ฟอร์มาลดีไฮด์ มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้ ในบรรยากาศเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งความเข้มข้นนี้ก่อให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงสูงสุด ไม่เกินร้อยละ 10

ฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อแบคทีเรียอย่างรุนแรง ดินบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม ที่ปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าบริเวณอื่น กล่าวคือดินในแหล่งอุตสาหกรรม ตรวจพบแบคทีเรีย 28,000 ถึง 40,000 ตัว/กรัม ในดินไม่ได้รับการปนเปื้อน จะมีแบคทีเรีย 900,000 ตัว/กรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำไฮโดรเจน ความเข้มข้นเกินกว่า 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร จะยับยั้ง การเจริญเติบโตของระบบการหายใจ ของ microflora

ถ้าฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำมีความเข้มข้น เกินกว่า 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร กระบวนการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายทางชีวภาพจะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.8 มาตรฐานทางกฎหมาย

มาตรฐานน้ำประปาประเทศไทย กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร ส่วนประเทศสหภาพแห่งสาธารณรัฐสังคมนิยมโซเวียต กำหนดมาตรฐานน้ำ คือ ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มและน้ำใช้เพื่อ การพักผ่อนหย่อนใจ เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำที่ใช้ใน การประมง เท่ากับ 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.9 การตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

การตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ทำได้หลายทำได้หลายวิธี เช่น การตรวจวัดด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี (spectrophotometry) การตรวจสี (colorimetry) ฟลูออรีเมทรี (fluorimetry) โครมาโทกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography) โพลารोगาฟี (polarography)

แก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) การตรวจวัดคลื่นอินฟราเรด (infrared detection) และ หลอดตรวจวัดแก๊ส (gas detector tubes) แต่วิธีที่เป็นที่นิยมใช้ คือวิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี (WHO, 2002)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยใช้สารละลายมาตรฐาน ฟอร์มัลดีไฮด์ทำปฏิกิริยากับกรดโครโมโทรปีคจะได้เป็นสารละลายเชิงซ้อนสีม่วงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร

2. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือ เปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นที่ระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นที่ระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นที่ระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดิน ในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกจำกัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนที่ไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับ จะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (นิพนธ์และคณิตา, 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 ปฏิกริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

2.2 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวดูดซับ

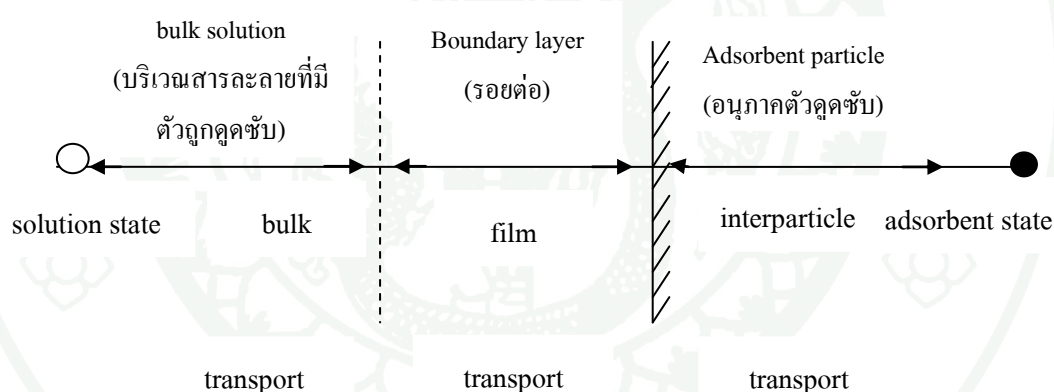
อัตราการดูดติดผิวมีความสำคัญมากโดยที่อัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดติดผิวจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนในการจำกัดอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล โดยแบ่งกลไกที่สำคัญในการดูดติดผิวได้ 4 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การเคลื่อนที่ของของเหลวทั้งก้อน (bulk solution transport) สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ด้านนอกของน้ำที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิว ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่ และเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้เร็วที่สุด

2.2.2 การเคลื่อนที่บริเวณฟิล์มใกล้ผิวสารดูดติดผิว (film diffusion transport) โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (hydrodynamic boundary layer) ที่อยู่ล้อมรอบสารดูดติดผิวเมื่อน้ำเคลื่อนที่ผ่านสารดูดติดผิว โดยระยะทางในการเคลื่อนที่และเวลาที่เกิดขึ้นของขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล ถ้าอัตราการไหลสูงจะส่งผลให้ระยะทางสั้นลง ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.2.3 การกระจายภายในโพรงของสารดูดติดผิว (pore transport) หลังจากการเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำแล้ว สารถูกดูดติดผิวจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในสารดูดติดผิวไปสู่บริเวณที่จะเกิดการดูดซับการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้าทำให้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน

2.2.4 การเกาะติดทางกายภาพ (adsorption) หลังจากมีการเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับเกิดขึ้น และถูกดูดติดผิวทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างเร็ว



ภาพที่ 2 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)

สำหรับขั้นตอนการดูดติดผิวที่เกิดช้าที่สุดเรียกว่า rate limiting step ซึ่งควบคุมอัตราการกำจัดในถึงปฏิกิริยาที่มีความปั่นป่วนสูง ในขั้นตอน film diffusion transport และ pore transport จะควบคุมอัตราการกำจัด โดยขั้นตอน film diffusion transport จะควบคุมในขั้นต้นหลังจากนั้นเมื่อมีการสะสมของสารถูกดูดติดผิวในช่องภายในสารดูดติดผิวขั้นตอน Pore transport จะควบคุมอัตราการกำจัด

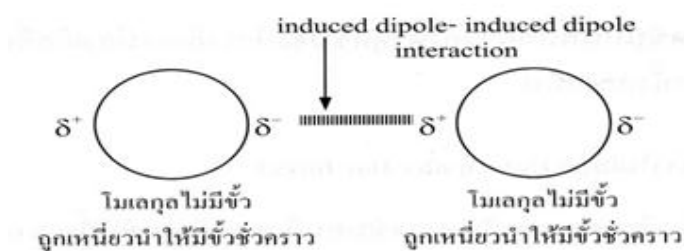
2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

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

2.3.1 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพที่เกี่ยวกับตัวดูดซับ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal force) แรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกัน โดยโมเลกุลทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว ต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้นแรงแวนเดอร์วาลส์จะเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์มี 3 ประเภท ดังนี้

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่า ทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อๆ ไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction)

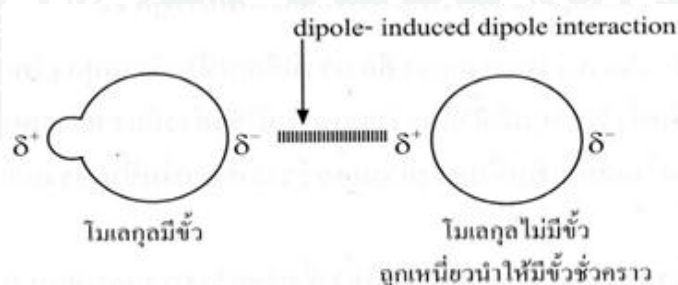
แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย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



ภาพที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์และคณิดา (2550)

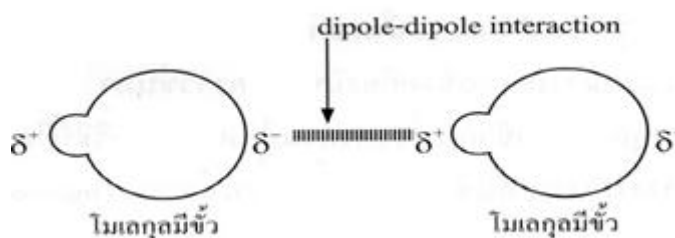
ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์และคณิดา (2550)

ค. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction)



ภาพที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์และกนิดา (2550)

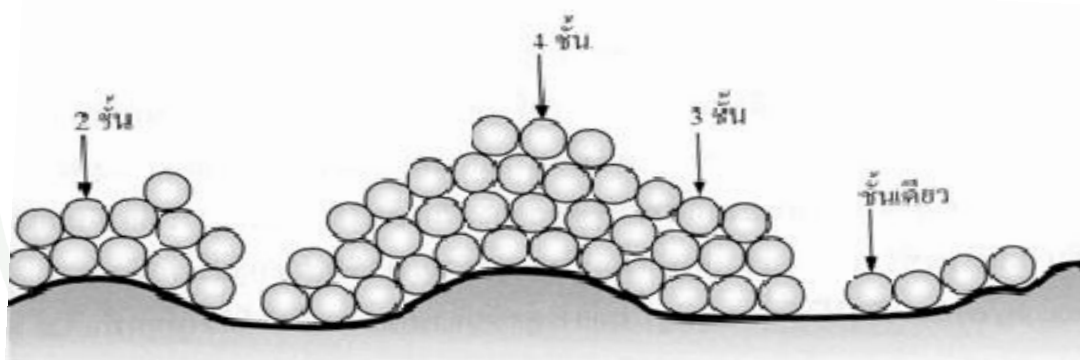
ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะที่มีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน (Cl_2) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ Cl-Cl ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับคือ เกิดการคายหรือเกิดการคายสารออก (desorption) อันเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (แรงแวนเดอร์วาลส์) ที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.3.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิก (แรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ) หรือพันธะโควาเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน โดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน)

การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ มีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และการดูดซับจะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible process) จึงไม่เกิดการคายซ้ำ

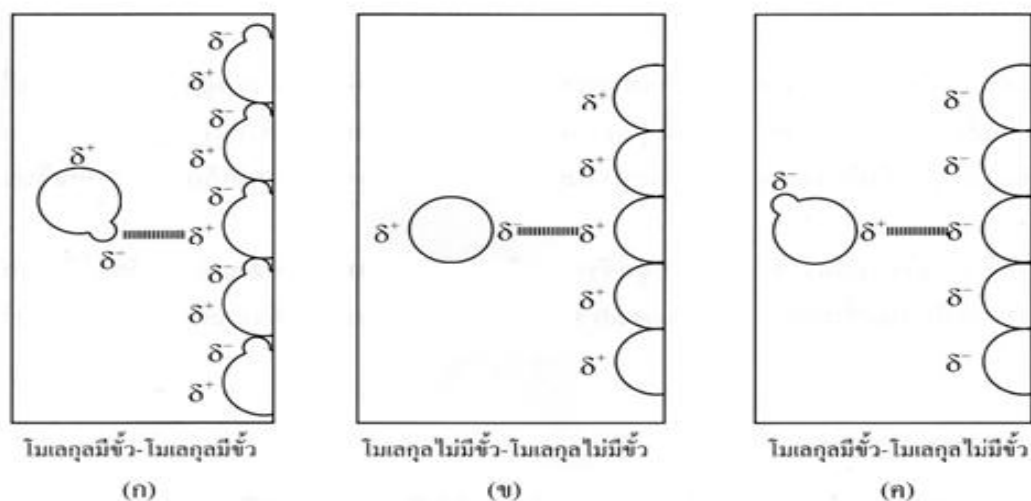
2.4 รูปแบบของการดูดซับ

2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (physisorption or physical adsorption or van der waals adsorption) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayered) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้านี้ และจำนวนชั้นของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวถูกดูดซับด้วยในระหว่างชั้น อาจเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์อย่างใดอย่างหนึ่ง การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลง เป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น



ภาพที่ 6 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)



ภาพที่ 7 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์และคณะ (2550)

ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ มีดังนี้

ก. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ข. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ค. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของ ตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้น

จากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรี/โมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรี/โมล และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

2.5. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับหรือการดูดซับ

2.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุนเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่ปรากรูพรุนมีขนาดเล็กก็ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่ม

2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่าแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

2.5.3 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และ อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (powder activated carbon) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (granular activated carbon)

2.5.4 ขนาดและลักษณะของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

2.5.5 อัตราเร็วการป้อน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การป้อนของระบบ ถ้าน้ำมีการป้อนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการป้อนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

2.5.6 ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมี pH เพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี OH^- บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมี pH สูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

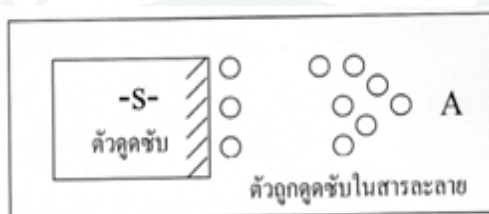
2.5.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้น ของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

2.5.8 เวลาสัมผัส

เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิว และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 8 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์และคณิตา (2550)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น ตอนต้น C_0 ในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไป จะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ระบบเข้าสู่สมดุล ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายซับออกมามีปริมาณคงที่

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C - C_0)$$

เมื่อ q เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ (หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น โมล/กิโลกรัม, โมล/กรัม และ มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

W เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ (หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น กิโลกรัม)

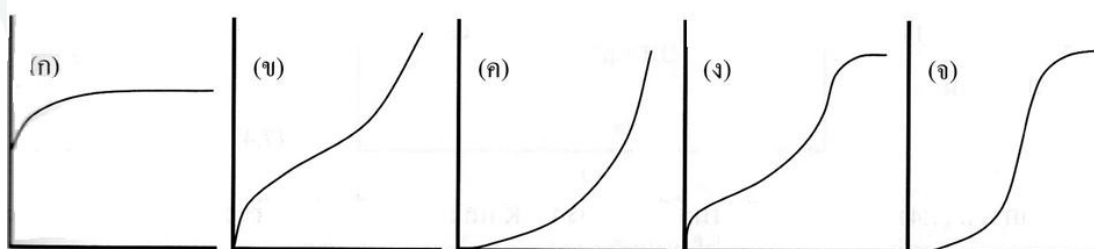
V เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร หรือลิตร)

C_0 เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย (หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร)

C เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (หน่วยเป็นความเข้มข้น เช่น โมล/ลิตร)

2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

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



ภาพที่ 9 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 9 (ก) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นแบบชั้นเดียว ส่วนภาพที่ 9 (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบหลายชั้น

โดยในที่นี้จะใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) และ ฟรุนดิช (freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับของฟรุนดิช ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด)

สมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัว ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว(ถูกดูดซับได้มากที่สุด)

2.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ อาจแบ่งได้ 5 ประเภท

2.8.1 สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอกติเวเตดซีลีกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

2.8.2 ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1,400 ตารางเมตร/กรัม เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่าง ๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรส ใช้ในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น

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

2.8.4 วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี้เลื่อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) ถั่วแกลบคั่ว เป็นต้น

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

3. ต้นกกกลม

3.1 การจัดอนุกรมวิธานของกกกลม



ภาพที่ 10 กกกลม *Cyperus corymbosus* Rottb.

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

กกกลมเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่มีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้ (จเร, 2538)

Kingdom Plantae

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Order Poales

Family Cyperaceae

Genus *Cyperus*

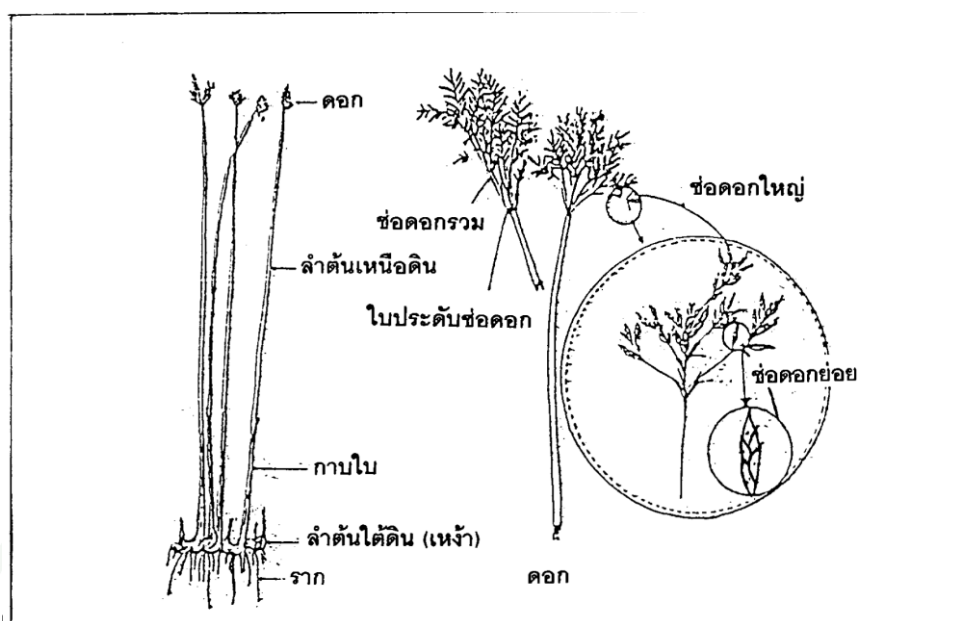
Species *corymbosus*

3.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

กกกลมหรือกกจันทบูร มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cyperus corymbosus* Rottb. ชื่อสามัญคือ Sedge จัดอยู่ในตระกูล CYPERACEAE ส่วนใหญ่พบขึ้นได้ทั่วไปตามที่ลุ่มชื้นแฉะและหนองบึงตลอดจนดินเลนตามชายฝั่งทะเล กกเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีอายุได้หลายปี กกมีหลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียง 2 ชนิด คือ

3.2.1 กกที่มีลำต้นกลม เรียกว่า กกกลม ลักษณะลำต้นกลมเรียว ส่วนปลายใกล้ๆ กับดอกเป็นสามเหลี่ยม ผิวสีเขียวแก่ ข้างในลำต้นมีเนื้ออ่อนสีขาว โคนต้นวัดโดยรอบประมาณ 1-2 เซนติเมตรสูงประมาณ 150 - 180 เซนติเมตร ผิวอ่อนนุ่ม เป็นมัน เหนียวไม่กรอบ เมื่อทำเป็นเชื้อแล้วนำไปซดลูกก็จะเป็นมันยิ่งขึ้น จึงมีความเหมาะสมและนิยมใช้มาทอเป็นเสื่อ

3.2.2 กกที่มีลำต้นเป็นสามเหลี่ยม เรียกว่า กกเหลี่ยม(คนบางกลุ่มเรียกว่า กกลังกา) มีลักษณะลำต้นเป็นรูปสามเหลี่ยม ด้านทั้งสามเว้าเข้าหาแกนกลาง ผิวสีเขียวอ่อน สูงประมาณ 1 เมตร ผิวแข็งกรอบและไม่เหนียว



ภาพที่ 11 กกกลม (กกจันทบูรณ) *Cyperus corymbosus* Rottb.

ที่มา: สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (2553)

ลักษณะของลำต้นแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ลำต้นใต้ดิน มีลักษณะเป็นแงสั้นๆ หรือเหง้า คล้ายเหง้าซึ่งสีน้ำตาลดำ เรียกว่า rhizome ลำต้นที่ทอดยาวอยู่บนพื้นดิน มีลักษณะเป็นท่อนขนาดเล็ก สีน้ำตาล ซึ่งมีความยาวตามชนิดของกก เรียกว่า stolon บางครั้งลำต้นส่วนนี้จะบวมโตขึ้นเป็นที่สะสมอาหารแต่ขยายพันธุ์ไม่ได้ ลำต้นที่เป็นก้านยาว สีเขียว ชูขึ้นไปในอากาศ เรียกว่า arial stem บริเวณปลายสุดเป็นจุดให้กำเนิดดอก ด้านหน้าตัดขวางของลำต้น ส่วนนี้จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมกลม หรือเกือบกลม เช่น กกลังคามีรูปร่างกลม กกสามเหลี่ยมใหญ่มีรูปร่างสามเหลี่ยม เป็นต้น ใบมีลักษณะเป็นแผ่นเล็กๆ มีรูปร่างต่างๆ กัน และมีจำนวนใบเชิงเล็กน้อย อยู่ติดปลายกาบหุ้มใบ (leaf sheath) ซึ่งห่อหุ้มส่วนของลำต้นสีเขียวอยู่ ดอกของกกมีทั้งดอกสมบูรณ์เพศ และไม่สมบูรณ์เพศ แต่ส่วนใหญ่เป็นดอกสมบูรณ์เพศ เกสรตัวผู้มีตั้งแต่ 1 ถึง 6 อัน โดยมากจะมี 3 อัน เกสรตัวเมีย 1 อัน ยอดเกสรตัวเมียแยกออกเป็น 2 ถึง 3 แฉก กลีบเลี้ยงและกลีบดอกมักเปลี่ยนรูปไปเป็นขนหรือเป็นเส้นเล็กๆ หรืออาจไม่ปรากฏให้เห็นเลยก็ได้ ในแต่ละดอกจะมีแผ่น เป็นระดับรองรับอยู่ เรียกว่า glume ดอกมีขนาดเล็กอยู่รวมเป็นช่อดอกย่อย และละช่อดอกย่อยจะอยู่ติดกับแกนกลางของช่อดอกรวมกันเป็นช่อใหญ่ ซึ่งด้านใต้ของช่อดอกนี้จะมีใบประดับที่มีลักษณะเป็นแผ่นใบยาวรองรับอีกทีหนึ่ง ใบประดับเหล่านี้มีความแตกต่างกันไปตามชนิดของกก อาจยาวหรือสั้นกว่าความยาวของช่อดอกก็ได้

กกกลมมีลักษณะลำต้นกลม เฉพาะลำต้นส่วนปลายใกล้ๆ กับดอกเท่านั้นที่เป็นสามเหลี่ยม ลำต้นสีเขียวเข้มเป็นมัน สูงประมาณ 1 ถึง 2 เมตร ดอกมีขนาดเล็กเป็นฝอยอยู่รวมกันเป็นช่อดอก เมื่อยังอ่อนมีสีเขียวอ่อนพออายุมากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ใบประดับของช่อดอกเป็นแผ่นใบยาวเรียวสั้นกว่าความยาวของช่อดอก เป็นกกที่ปลูกกันมานานทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ จังหวัด จันทบุรี ตราด และระยอง แต่ปลูกกันมากที่จังหวัดจันทบุรี (สำนักงานปลัดกระทรวง วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2535)

3.3 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

กกกลมเป็นวัชพืชน้ำ (aquatic weeds) เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ ริมน้ำ หรือตามตมที่น้ำขังต่างๆ บริเวณที่มีน้ำตื้นๆ โดยที่เป็นวัชพืชที่โผล่เหนือน้ำมีรากและลำต้นเจริญอยู่ในดินใต้น้ำ แล้วส่งส่วนของใบและดอกขึ้นมาเจริญเหนือน้ำ กกกลมสามารถแพร่กระจายทั่วประเทศไทย และพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ โดยเฉพาะแถบจังหวัดจันทบุรี ตราด ระยอง

3.4 การใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันกกกลมเป็นพืชที่ได้มีการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในลักษณะพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะ เช่น ใช้ในโครงการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติ ตามแนวพระราชดำริ หนองหาร จังหวัดสกลนคร ร่วมกับพืชชนิดอื่นๆ (ลักษณะ, 2539) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกกกลม เพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะและในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน ได้ใช้ต้นกกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรม (สุจินต์, 2539; Buddhawong, 1996) ทดลองใช้กกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนที่จังหวัดสกลนคร จากการใช้กกกลมในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวนี้ พบว่า สามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียได้ดี

กกกลมถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง เช่น ในโครงการบำบัดน้ำทิ้ง โดยวิธีธรรมชาติ ตามแนวพระราชดำริหนองหาร จังหวัดสกลนคร และโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี เป็นต้น ส่วนของลำต้นเมื่อนำมาตากแดดสามารถนำมาทำหัตถกรรม ภาชนะเครื่องใช้ เช่น ท่อเสื่อ ถ้านำมาเผาจะได้เป็นถ่านกกกลม ส่วนดอกและใบสามารถใช้ทำเอื่อกระดาษ (สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2535)

การนำกกกลมมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบธรรมชาติ เช่น การใช้กกกลมมาปลูกในพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ระบบดินร่วมกับการปลูก (สุชาดาและคณะ, 2537) เนื่องจากกกกลมเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตดีและมีโอกาสใช้ประโยชน์จากกกกลมได้ ซึ่งสิทธิชัย (2538) ได้ทำการศึกษาวิจัยแล้วพบว่า กกกลมมีความเหมาะสมต่อระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินร่วมกับการปลูกพืชในสภาพน้ำท่วมขังสลับแห้งมากที่สุด นอกจากนี้ Buddhawong (1996) ได้ทดลองใช้กกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนจังหวัดสกลนคร พบว่า สามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสียได้เป็นอย่างดีและสำหรับในต่างประเทศพบว่าที่กรุงปักกิ่ง ประเทศจีน ได้มีการนำต้นกกกลมมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรม (สุจินต์, 2539)

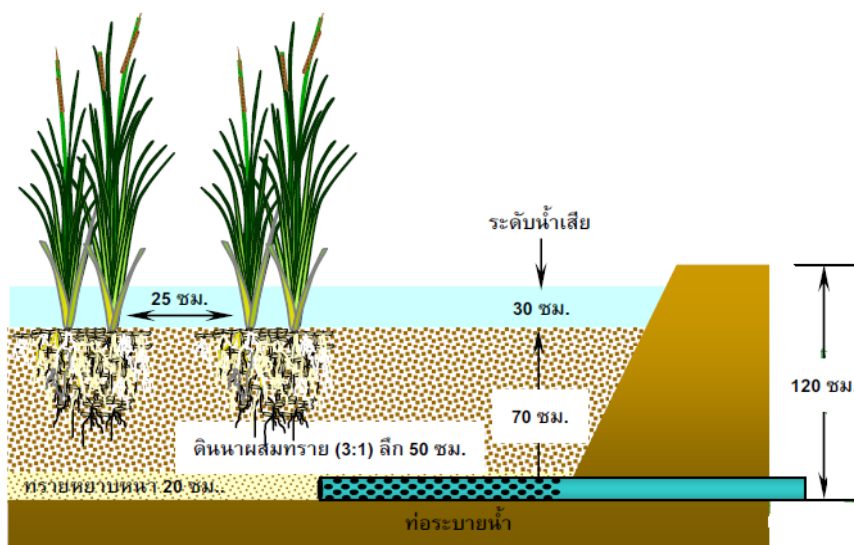


ภาพที่ 12 กกกลมก่อนตากแห้ง

4. ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหลักรองน้ำเสีย

4.1 พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland)

พื้นที่ชุ่มน้ำเทียม หมายถึง บริเวณพื้นที่ที่ถูกน้ำท่วมขัง หรืออ้อมตัวด้วยน้ำ โดยน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินที่มีจำนวนครั้งของการท่วมขัง และช่วงเวลาในการท่วมขังนานเพียงพอที่จะทำให้การแพร่กระจายของพืชพรรณปรับตัวให้สามารถเติบโตเป็นปกติได้ ภายใต้สภาวะที่ดินอ้อมตัวด้วยน้ำนั้น (Cowardin *et al.*, 1979) พื้นที่ชุ่มน้ำมักจะตั้งอยู่ในภูมิทัศน์ระหว่างแผ่นดิน (terrestrial system) และแหล่งน้ำ (aquatic system) หน้าที่สำคัญของพื้นที่ชุ่มน้ำซึ่งเชื่อมโยงระบบของแผ่นดิน แหล่งน้ำเข้าด้วยกัน คือ เป็นแหล่งสะสมเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารและสารเคมีที่ปนเปื้อน ซึ่งมีผลต่อคุณภาพน้ำและผลผลิตของระบบนิเวศ (Reddy and Patrick, 1993)



ภาพที่ 13 โครงสร้างภายในและภายนอกของระบบหลั่งกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: ธนินทร์ (2548)

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมในการบำบัดน้ำเสีย พื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเป็นพื้นที่ซึ่งดินมีน้ำขังอึดตัวไม่ลึกนัก ระดับความสูงของน้ำไม่เกิน 60 เซนติเมตร และมีพืชน้ำขึ้นงอกงาม ระบบนิเวศในพื้นที่ชุ่มน้ำจึงเป็นไปตามธรรมชาติ และมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา โดยอาศัยพืช สัตว์ที่อาศัยในพื้นที่ รวมทั้งดินเป็นตัวบำบัด นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่จับอยู่ตามหน้าดินตามปมรากของพืชช่วยในการกรอง และดูดซับน้ำเสีย มีการถ่ายเทออกซิเจนทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาดัดแปลงสร้างเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นหรือบึงประดิษฐ์ ซึ่งมีข้อดีกว่าในการที่สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของบึงให้เหมาะสมกับความต้องการ และสามารถตั้งอยู่ได้ในสถานที่ต่างๆ ได้ โดยอาศัยเกณฑ์การออกแบบ

4.1.1 การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสีย

พื้นที่ชุ่มน้ำเป็นพื้นที่ซึ่งดินมีน้ำขังอึดตัวไม่ลึกนัก ระดับความสูงของน้ำไม่เกิน 60 เซนติเมตร และมีพืชน้ำขึ้นงอกงาม ระบบนิเวศในพื้นที่ชุ่มน้ำจึงเป็นไปตามธรรมชาติ และมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา โดยอาศัยพืช สัตว์ที่อาศัยในพื้นที่ รวมทั้งดินเป็นตัวบำบัด นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่จับอยู่ตามหน้าดินตามปมรากของพืชช่วยในการกรอง

และดูดซับน้ำเสีย มีการถ่ายเทออกซิเจนทำให้พื้นที่ชุ่มน้ำสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537) ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาคัดแปลงสร้างเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำตามธรรมชาติเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น หรือบึงประดิษฐ์ ซึ่งมีข้อดีกว่าในการที่สามารถควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ของบึงให้เหมาะสมกับความต้องการ และสามารถตั้งอยู่ในสถานที่ต่างๆ ได้ โดยอาศัยเกณฑ์การออกแบบ อย่างไรก็ตามการบำบัดน้ำเสียด้วยพื้นที่ชุ่มน้ำนั้นค่อนข้างมีจำกัด คือ น้ำเสียที่เข้าระบบควรผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้ว แต่ยังต้องการการบำบัดต่อเพื่อให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากน้ำเสียนั้นอาจมีความเข้มข้นของสารต่างๆ สูงจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบ ทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ (อุตร, 2537; ลักขณิ, 2539)

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญ 4 ประการ คือ ชนิดของพืชโตเร็วที่เลือกปลูก (vegetation) ลักษณะการไหลของน้ำ (water column) ชนิดของหน้าดิน(substrate) และประชากรจุลินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น(microbiological population) นอกจากนี้อัตราภาระทางชลศาสตร์(hydraulic loading) ควรอยู่ในระหว่าง 0.16 ถึง 12 เฮกเตอร์ ต่อ 1,000ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537) โดยปกติบึงประดิษฐ์จะสร้างขึ้นโดยมีคันขอบดินสูงประมาณ 1 เมตร พื้นที่กันบึงปรับระดับเสมอกันเพื่อขังน้ำ ดินพื้นควรมีคุณสมบัติที่ให้พืชน้ำยึดเกาะได้ดี เมื่อการก่อสร้างงานดินเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำพืชน้ำมาปลูกซึ่งจะมีทั้งที่มีรากเกาะดิน เช่น ฤๅษี บัว กก พืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน และพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย บึงประดิษฐ์สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการไหลของน้ำเป็น 2 ประเภท (อุตร, 2537) ได้แก่

ก. แบบน้ำไหลบนพื้นผิว (surface flow) เป็นแบบที่ให้น้ำเสียไหลผ่านผิวน้ำดิน สัมผัสกับอากาศโดยตรง จากนั้นจึงไหลซึมลงสู่พื้น พื้นบึงจะเป็นดินธรรมชาติให้พืชน้ำเกาะตื้นๆ บึงมีลักษณะยาวและแคบ น้ำในบึงสูงประมาณ 30 เซนติเมตร การบำบัดน้ำเสียเป็นไปตามลักษณะตามยาว

ข. แบบไหลเบื้องล่าง (subsurface flow) เป็นแบบที่ให้น้ำไหลลงไปในชั้นตัวกลาง โดยบึงจะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะตัวกลาง ได้แก่ หินบดกรวด ผสมดินชนิดต่างๆ ความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60 ถึง 70 เซนติเมตร ด้านล่างลาดด้วยดินเหนียว หรือวัสดุกันซึมเพื่อรักษาระดับน้ำในบึง ซึ่งจะต่ำกว่าผิวน้ำตัวกลางเล็กน้อย น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและรากของพืชน้ำชั้นตัวกลางนี้จะมีสภาวะไร้อากาศ แต่ออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในดินชนิดใช้อากาศที่อาศัยอยู่ตามรากพืช

4.1.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำ

ในระบบนิเวศของพื้นที่ชุ่มน้ำประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ ดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ หรือถูกน้ำท่วมขัง พืช และจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดกระบวนการต่างๆ ภายในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น เช่น ในดินจะเกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การดูดซับ (adsorption) การตกตะกอน (precipitation) การกรอง (filtration) และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexation) ในพืชที่มีกระบวนการดูดซึม (uptake) ธาตุอาหารจากรากเข้าสู่ลำต้น ส่วนจุลินทรีย์จะทำให้เกิดกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) และดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะช่วยในการเปลี่ยนรูปหรือบำบัดสารปนเปื้อนที่อาจเป็นสารพิษ หรือสารที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำไปอยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ (จินตนา, 2535; ลักขณิ, 2539) ซึ่งสารปนเปื้อนในน้ำเสียที่พื้นที่ชุ่มน้ำสามารถบำบัดได้ เช่น บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และเชื้อโรคบางชนิด โดยใช้กลไกการบำบัดทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537)

4.1.3 หลักการระบบบำบัดน้ำเสียแบบขังน้ำสลับแห้ง (flooding and drying system)

การบำบัดน้ำเสียโดยใช้หลักการระบายน้ำ แบบการขังน้ำสลับแห้ง (flooding and drying) เป็นการนำหลักของระบบนิเวศดินนามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีววิทยาที่เกิดขึ้นสองแบบในแต่ละรอบของการทดลองบำบัดน้ำเสีย นั่นคือ สภาพที่มีออกซิเจน (aerobic หรือ oxidation) เมื่อมีการระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้ง และสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobic หรือ reduction) เมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าแปลงแล้วขังน้ำไว้ ในการเกิดสภาพไม่มีออกซิเจน จะมีผลดีและผลเสียต่อระบบนิเวศเมื่อดินมีการขังน้ำ ทั้งนี้ขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของดิน และปัจจัยที่ควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อมีการขังน้ำและระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้งบางส่วน (สิทธิชัย, 2538) ซึ่งการขังน้ำดังกล่าวทำให้เกิดการบำบัดน้ำเสียได้ดังนี้

ก. การเกิดสภาพที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อดินมีน้ำขังการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างอากาศในดิน และบรรยากาศจะถูกยับยั้ง ซึ่งโดยปกติออกซิเจนในบรรยากาศจะเข้าไปสู่ดินได้โดยการแพร่กระจาย (diffusion) แต่เมื่อดินถูกน้ำขังการแพร่กระจายของออกซิเจนจะต้องผ่านชั้นของน้ำที่อยู่เหนือดิน ทำให้อัตราการแพร่กระจายผ่านเข้ามาช้ามาก ($1/1,000$ เท่าของในบรรยากาศ) จากนั้นดินก็จะอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ออกซิเจนที่มีอยู่เดิมซึ่งถูกกักเก็บไว้ตามช่องว่างในดินที่ถูกน้ำขังจะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งที่ต้องการ

ออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจน(facultative anaerobic bacteria) นำมาใช้ในการหายใจจนหมดไปอย่างรวดเร็ว และจะเกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ ในดิน โดยการสะสมและค่อยๆเพิ่มความกดดันจนเกิดเป็นฟองสูญหายไปจากดิน องค์ประกอบของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปในดินที่ขังน้ำย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจลเคมี และชีวภาพของระบบได้ (ไพบุลย์, 2528)

ข. การเกิดรีดักชันและปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ภายหลังจากการขังน้ำ ทำให้ออกซิเจนในดินถูกใช้หมดโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน หลังจากนั้นจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนจะหยุดกิจกรรมชะงักการเจริญเติบโตและตายไป ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งต้องการออกซิเจน และไม่ต้องการออกซิเจนจะเริ่มหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้สารประกอบต่างๆในดินซึ่งมีระดับ ออกซิเจนสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุ ก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน สารประกอบ ที่สามารถที่สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินนั้น ได้แก่ ไนเตรต แอมโมเนียไดออกไซด์ เพอริก ไดออกไซด์ ซัลเฟต และสารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ตามลำดับทาง thermodynamic และสมการต่างๆ โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชัน ชนิด ตลอดจนปริมาณ ของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันอยู่กับ ปัจจัย 5 ประการ คือ ธรรมชาติและปริมาณของอาหารจุลินทรีย์ หรือตัวให้อิเล็กตรอน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณและชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน และระยะเวลาที่มีน้ำ แห้ง (สิทธิชัย, 2538)

4.2 การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหญากรองน้ำเสีย (Grass filtration) เป็นเทคโนโลยีในการบำบัด น้ำเสีย วิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอย่างง่าย ประหยัด มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อาศัยกระบวนการ ทางธรรมชาติในการบำบัด ซึ่งเป็นลักษณะการก่อสร้างคัดแปลงพื้นที่บำบัดน้ำเสียให้เป็นระบบพื้นที่ ลุ่มชื้นแฉะ และนำระบบนิเวศดินนาข้าวมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีหญากรองน้ำเสีย โดยปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านพื้นที่แปลงที่มีความลาดเอียงที่ทำการปลูกพืชหรือหญ้า ซึ่งน้ำเสียจะ ไหลผ่านผิวดินและต้นหญ้าหรือพืชจนกระทั่งไหลผ่านจากแปลง ในระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านแปลง จะเกิดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติ ซึ่งน้ำเสียจะได้รับการบำบัดให้มีคุณภาพดีขึ้น โดย การให้น้ำเสียผ่านแปลงในลักษณะเลื่อนไหลไปในแนวระดับ (Horizontal) น้ำเสียจะได้รับการ บำบัดทั้งในแนวระดับและในแนวตั้ง(Vertical) เนื่องจากน้ำเสียจะมีการซึมลงสู่ชั้นใต้ดินโดยผ่าน การกรองและบำบัดของระบบดิน จุลินทรีย์และพืช ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 3 จะทำหน้าที่ร่วมกัน โดย อาศัยกลไกทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในการบำบัด และให้ระบบน้ำเสียในลักษณะการขังสลับ

การแห้งน้ำ (Flooding and drying) หรือกล่าวได้ว่า ในการบำบัดน้ำเสียจะทำการขังน้ำสลับกับการปล่อยให้พื้นที่แปลงบำบัดแห้งน้ำ

4.2.1 โครงสร้างและลักษณะการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีห้ำกรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีห้ำกรองน้ำเสีย เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยนำหลักการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะมาประยุกต์ใช้รวมกับการปลูกพืชหรือหญ้า โดยโครงสร้างของพื้นที่แปลงบำบัดน้ำเสียที่สร้างขึ้นนั้นจะสร้างเลียนแบบธรรมชาติ ซึ่งลักษณะแปลงห้ำกรองน้ำเสียจะมีขนาดพื้นที่ 2.5 x 30 ตารางเมตร สร้างคันดิน (Berm) สูงประมาณ 0.30 เมตร พื้นดินเป็นดินอัดแน่น ปรับพื้นที่ให้มีความลาดชัน 1: 1000 และรองพื้นด้วยทรายหยาบสูง 20 เซนติเมตรเสมอกันทั้งแปลง และปรับให้พื้นทรายด้านบนมีความลาดชัน 1: 1000 เพื่อให้ น้ำเสียไหลในอัตราที่เหมาะสม ดินที่ใช้ส่วนบนเป็นดินผสมซึ่งมีส่วน ดิน: ทราย เป็น 3: 1 และมีความหนา 50 เซนติเมตร เท่ากันทั้งแปลง ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้การยึดเกาะและการเจริญเติบโตของหญ้าและการเจริญของจุลินทรีย์ในดินอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (สิทธิชัย, 2538) ในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบห้ำกรองน้ำเสียนี้ จะทำการปล่อยน้ำเสียไหลเข้าแปลงทดลอง น้ำเสียจะเลื่อนไหลไปตามระยะทางในแนวระดับของพื้นที่แปลงที่มีความลาดเอียงนอกจากนี้ น้ำเสียจะเลื่อนไหลในแนวดิ่ง โดยผ่านรากหญ้า และชั้นดิน ซึมลงสู่ชั้นทรายและไหลไปตามชั้นทราย ในขั้นตอนนี้น้ำเสีย จะได้รับการบำบัดทั้งในแนวระดับและแนวดิ่งทั้งการเพิ่มออกซิเจนจากพืชและบรรยากาศ และกระบวนการบำบัดต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ที่อาศัยตัวกลางคือจุลินทรีย์ ดิน และหญ้า โดยรากหญ้าและดินจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองน้ำเสีย รากหญ้ายังทำหน้าที่ดูดซึมสารปนเปื้อนในน้ำเสีย และเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ที่เป็นตัวบำบัดน้ำเสียอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำหลักการระบบนิเวศดินมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ หลักการที่ให้พื้นที่แปลงมีน้ำขังสลับกับการระบายน้ำออกจากแปลงให้แห้งซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีววิทยา ทำให้มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละประเภท การถ่ายทอดอิเล็กทรอนิกส์ของสารต่าง ๆ ในดิน รวมทั้งการดูดซึมธาตุอาหารและโลหะหนักชนิดต่าง ๆ โดยหญ้า

4.2.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีห้ำกรอง

กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีห้ำกรองน้ำเสียจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลไกการปรับปรุงคุณภาพน้ำของระบบนิเวศพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะตามธรรมชาติ โดยอาศัยกระบวนการกรองตามธรรมชาติการตกตะกอน และกระบวนการต่าง ๆ ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อลดสาร

ปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งในการศึกษาการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหมักกรองน้ำเสียในครั้งนี้จะอาศัยกลไกการบำบัด 2 ประการ คือ การนำหลักการของระบบนิเวศดินนาโดยการระบายน้ำเสียแบบการขังน้ำสลับแห้งมาประยุกต์ใช้ และใช้พื้นที่ลุ่มและดัดแปลงร่วมกับการปลูกพืชเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหมักกรอง ซึ่งต้องอาศัยตัวกลางที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ ดิน พืช หรือหญ้า และจุลินทรีย์ ทำหน้าที่ในการบำบัดร่วมกัน

4.2.3 หลักการบำบัดน้ำเสียของระบบระบายน้ำเสียแบบขังสลับแห้ง

หลักการบำบัดน้ำเสียของระบบหมักกรอง ได้ใช้หลักการของระบบ Flooding and drying system การระบายน้ำแบบขังสลับแห้ง โดยจะยึดหลักของระบบนิเวศดินนา นำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีวภาพ ทั้งขณะการระบายน้ำออกเพื่อปล่อยให้ดินแห้งซึ่งจะเป็นสภาพที่มีออกซิเจน และขณะปล่อยน้ำเข้าแปลงและขังน้ำไว้จะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนและเกิดสภาวะรีดักชัน (Reduction) โดยจะมีผลดี และผลเสียต่อระบบนิเวศเมื่อดินมีการขังน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของดิน และปัจจัยที่ควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อมีการขังน้ำและระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้งบางส่วน (สิทธิชัย, 2538) ซึ่งหลักการขังน้ำที่กล่าวมานี้สามารถใช้เป็นหลักการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหมักกรองได้ดังนี้

ก. การเกิดสภาพที่ไร้ออกซิเจน ดินขณะที่มีการขังน้ำจะเกิดการลดลงของออกซิเจนจนทำให้ไม่มีออกซิเจนในดินโดยน้ำที่ขังอยู่บริเวณหน้าดินจะป้องกันออกซิเจนจากบรรยากาศไม่ให้ซึมผ่านลงไปในดินได้ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลออกซิเจนผ่านน้ำจะช้ากว่าในอากาศมากกว่า 10,000 เท่าจากนั้นดินจะอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน และออกซิเจนเดิมที่ถูกกักไว้ตามช่องดินที่ถูกน้ำท่วมขัง จะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน (Aerobic microorganism) และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในสภาพที่มีหรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ (Facultative microorganism) นำมาใช้เพื่อการหายใจจนหมดไปอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่น ๆ ในดินโดยการสะสมและค่อย ๆ เพิ่มความกดดันจนเกิดเป็นฟองสูญหายไประยะหนึ่ง องค์ประกอบของก๊าซที่เปลี่ยนแปลงไปในดินที่ขังน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจุลเคมี และชีวภาพของระบบได้ (ไพฑูริย์, 2528)

ข. การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัด ในช่วงที่มีน้ำท่วมขังจะทำให้ออกซิเจนหมดไป เนื่องจากถูกจุลินทรีย์ชนิดที่ต้องการออกซิเจนใช้ไปอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจุลินทรีย์ดังกล่าวจะหยุดกิจกรรมและชะงักการเจริญเติบโตส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ใต้ทั้งที่มีออกซิเจน

และไม่มีออกซิเจน และจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนเลยจะสามารถมีกิจกรรมต่อไปได้โดยใช้สารประกอบต่าง ๆ ในดินซึ่งมีระดับออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุ ก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ สารประกอบอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินนั้นได้แก่ไนเตรด (NO_3^-) แอมโมเนียม (NH_4^+) ออกไซด์ (MnO_2) เพอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) และสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ตามลำดับทาง Thermodynamic และสมการต่าง ๆ ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชันชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้ง 5 ประการ ได้แก่ธรรมชาติและปริมาณอาหารของจุลินทรีย์ (อินทรีย์วัตถุ) หรือตัวให้อิเล็กตรอน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณและชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน และระยะเวลาที่มีน้ำแช่ขัง (สิทธิชัย, 2538)

ก. การประยุกต์การเปลี่ยนแปลงของดินนาขังน้ำเพื่อใช้ในระบบบำบัด ในสภาวะที่ดินถูกน้ำขังจะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนในดิน จะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไปโดยการ ลดลงของค่า Redox potential (Eh) ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันและเมื่อมีการระบายน้ำออกให้ดินแห้งหรือการไม่มีน้ำขังทำให้ดินมีการถ่ายเทอากาศดี จะทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชันดังนั้นการระบายน้ำขังน้ำสลับแห้ง จะทำให้เกิดสภาวะรีดักชันและสภาวะออกซิเดชันสลับกัน ซึ่งจะสามารถบำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้โดยลดปริมาณของ BOD และเป็นที่ดูดซับโลหะหนักต่าง ๆ จากน้ำเสียได้โดยร่วมกับพืชบางชนิดที่เติบโตได้ดีในสภาพน้ำขัง เช่น กกกลม หญ้าคาธาล่า เป็นต้น และระบายน้ำออกให้ดินแห้งสลับกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแปรสภาพสารอินทรีย์ในโตรเจนในดินที่มีน้ำขังไปเป็นแอมโมเนียซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เพราะการขาดออกซิเจนจะทำให้เกิดดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (ไพบูลย์, 2528) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mitsui (1995) พบว่าการตากดินให้แห้งก่อนขังน้ำจะทำให้การปลดปล่อยแอมโมเนียสูงกว่าเดิมที่ขังน้ำอย่างเดียวถึง 2 เท่า รวมทั้งการที่ค่าพีเอชสูงถึง 8.5 จะเร่งการผลิตแอมโมเนียทั้งนี้เนื่องจากการจัดการดินก่อนการขังน้ำจะทำให้เกิดการส่งเสริมการเกิด Ammonification โดยฮิวมัสที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากคอลลอยด์ดิน (Harada และคณะ, 1995) นอกจากนี้ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโลหะหนักและธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณโลหะหนักและธาตุอาหารพืชที่ลดลง โดยธาตุอาหารที่ลดลงนั้นจะพบสะสมอยู่ในดินและพืช ส่วนโลหะหนักจะพบสะสมอยู่ในเฉพาะพืช (ปกรณ, 2540) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kadlac (1962) ที่พบว่าในช่วงน้ำแห้งจะก่อให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารต่าง ๆ ที่วิกฤต ในขณะที่ธาตุอาหารเหล่านั้นจะไม่เป็นประโยชน์กับพืชเลยภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังอย่างถาวรจะอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน การที่น้ำท่วมขังสลับแห้งจะเหมาะสมกับพืชบางชนิด นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประชากรจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ดินที่มีน้ำขังจะมี

เสถียรภาพ ทำให้อันตรการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากผลการศึกษาต่าง ๆ จะเห็นว่าลักษณะการบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการขังน้ำสลับการแห้งน้ำในพื้นที่บำบัด สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนั้นจึงพิจารณานำมาใช้กับวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหมักกรองน้ำเสีย

4.2.4 การใช้พืชเพื่อกำจัดมลสารในน้ำเสีย

แปลงหมักกรองน้ำเสียเปรียบเสมือนการจำลองระบบนิเวศพื้นที่ชุ่มชื้นและระบบหนึ่งที่มีความสมดุลของมวลภายในระบบโดยมีการหมุนเวียนของธาตุอาหาร มีการสะสมและเปลี่ยนรูป (transformer) และสารต่างๆอย่างสมดุล โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือกำจัดสารพิษและสารที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำ ให้อยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ เช่นเปลี่ยนฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ไปเก็บไว้ในตะกอนดินและสิ่งมีชีวิตหรือถูกใช้โดยสิ่งมีชีวิต

หญ้าเป็นพืชที่มีความสามารถในการบำบัดและกำจัดธาตุอาหาร เพราะหญ้าสามารถดูดเอาธาตุอาหารในรูปไอออนต่างๆเหล่านั้น แล้วส่งต่อไปใช้ในการสังเคราะห์ให้เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและทำหน้าที่เป็นที่เกาะของจุลินทรีย์บางชนิดที่ช่วยในการย่อยสลายสารต่างๆในดินด้วย

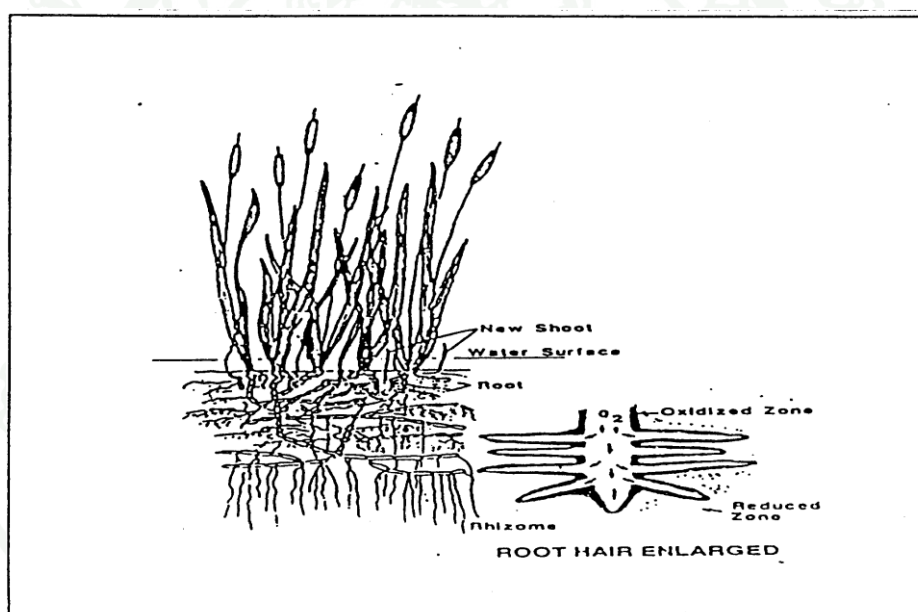
นอกจากพืชจะมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว แต่ถึงอย่างไรการคัดเลือกพืชที่เหมาะสมก็เป็นอีกข้อจำกัดหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ โดยสรุปคุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (พัฒน์, 2536) มีดังนี้

- ก. มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง
- ข. มีความทนทานต่อโรคและแมลง
- ค. มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆได้ดี
- ง. สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารพิษได้กว้าง

จ. สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ในท้องถิ่นนั้น นอกจากนี้ยังยังสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง

ฉ. มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูง พืชจะนำเอาออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านมาตามใบ ลำต้น และราก (ภาพที่ 14) เช่น พืชจำพวกธูปฤาษีจะมีชั้นรากหนา ประมาณ 30 เซนติเมตร และรากพืช กก แผลก จะหยั่งลึกลงถึง 70 เซนติเมตร ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มออกซิเจน

ช. สะดวกต่อการจัดการ โดยเฉพาะการนำพืชออกจากระบบเนื่องจากพืชสามารถลดปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ผลดี พืชจะต้องถูกนำออกจากระบบบ้างโดยไม่มีผลต่อการเจริญของพืชที่เหลือ ไม่ทำให้พืชอยู่อย่างหนาแน่นเกินไปจนระบบขาดประสิทธิภาพ



ภาพที่ 14 พืชที่อยู่ในระบบที่ลุ่มชื้นแฉะ สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงที่ระบบรากในสถานะที่ไร้อากาศ

ที่มา: Hammer and Bastian (1989)

การใช้พืชที่มีอยู่ตามธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียจะมีข้อดี เพราะได้มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศ และสภาพดินและมีแนวโน้มที่จะประสบความสำเร็จในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะที่ถูกตัดแปลง พืชที่นำมาจากแปลงอื่นมักจะตายหรือเติบโตช้าและบางทีอาจเป็นปัญหาให้กับแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (Hermer and Bastian, 1989)

4.2.5 การใช้พืชร่วมกับพื้นที่ลุ่มและดัดแปลงเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหลุมกรองน้ำเสียนั้น จะเป็นการเลียนแบบลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของระบบนิเวศพื้นที่ลุ่มน้ำและที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นหน่วยบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติ ซึ่ง William และ Patrick (1994) ได้กล่าวว่าแล้วว่าในระบบพื้นที่ลุ่มและจะมีความสมดุลของมวลภายในระบบ โดยจะมีการสะสม การเปลี่ยนรูป และการหมุนเวียนธาตุอาหารและสารต่าง ๆ อย่างสมดุล ดังนั้นระบบหลุมกรองน้ำเสียจึงมีสมดุลมวลสาร และความสมดุลของระบบพื้นที่ลุ่มและนั้น เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชัน และดีไนตริฟิเคชัน การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การตกตะกอน การกรอง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การดูดซึมธาตุอาหาร เป็นต้น ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือบำบัดสารพิษและสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียให้ลดลงหรือให้อยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ

ในปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาทดลองการนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียกันมาก เช่น สุชาดาและคณะ (2537) ได้ทำการศึกษาคัดเลือกพันธุ์พืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีหลุมกรอง ซึ่งเป็นลักษณะการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ลุ่มและ พบว่า พืชจำพวก กกกลม กกสามสามเหลี่ยม แห้วกระดานและรูปฤาษี มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้เป็นพืชทดลองเพราะมีการเจริญเติบโตดีมาก และยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางอื่น ๆ ได้อีกด้วย และยังพบว่าหญ้าแฝก พันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา หญ้าโคสครอส หญ้าคาล่า และหญ้าสมุท มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย สิทธิชัย (2538) ได้ทดลองเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยพืชในลักษณะเป็นพื้นที่ลุ่มและในสภาพน้ำขังสลับแห้ง พบว่า กกกลม มีความเหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวมากที่สุด โดยสามารถลดค่า BOD และ COD ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ อาภรณ์ (2539) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ใช้พืชกกกลม และรูปฤาษี พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาการขังน้ำ 5 วัน สลับแห้ง 3 วัน เหมาะสมที่จะใช้เพื่อการบำบัด BOD และ COD มากที่สุด และกกกลมเป็นพืชที่เหมาะสมที่สุด และระบบบำบัดดังกล่าวสามารถบำบัดสารอินทรีย์ละลายและสารอินทรีย์แขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์

Garrido *et al.* (2000) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มียูเรีย-ฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยระบบตะกอนเร่ง มีค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง COD ช่วง 460-3,900 มิลลิกรัม/ลิตร ฟอर्मัลดีไฮด์ช่วง 220-4,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า TKN ช่วง 110-805 มิลลิกรัม/ลิตร โดยค่า COD จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่

เพิ่มขึ้นของฟอर्मัลดีไฮด์ ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์สูงกว่าร้อยละ 99 ประสิทธิภาพการกำจัด COD ร้อยละ 70-85 และประสิทธิภาพการกำจัด TKN ร้อยละ 30-50 ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.2-1.2 กิโลกรัม COD/ลูกบาศก์เมตร/วัน โดยใช้ระยะเวลาเก็บกัก 0.5-1.4 วัน

Lettinga *et al.* (2000) ศึกษาความเป็นพิษของฟอर्मัลดีไฮด์ต่อจุลินทรีย์ชนิดผลิตแก๊สมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ พบว่าระดับความเข้มข้นของฟอर्मัลดีไฮด์ที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดและประเภทของน้ำเสียที่จุลินทรีย์อาศัยอยู่ หรือขึ้นอยู่กับขนาดของ จุลินทรีย์ และสารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ โดย granular sludge ในระบบ UASB จากการบำบัดน้ำเสีย จากโรงงานปิโตรเคมี มีค่า IC₅₀ ของฟอर्मัลดีไฮด์ 254 มิลลิกรัม/ลิตร ที่ 1.0 กรัม VSS/ลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

CZijin and Hegemann (1997) ศึกษาความเป็นพิษของฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีผลต่อ การย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศแบบทีละเท (batch culture) กับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนฟอर्मัลดีไฮด์ และน้ำเสียจริงที่มี ยูเรีย-ฟอर्मัลดีไฮด์ จากโรงงานผลิตกาวยไม้อัด พบว่าที่ความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ต่ำกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์สูงกว่าร้อยละ 90 และเมื่อความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์สูงกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีผลยับยั้งการย่อยสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ร้อยละ 50

จันทวรรณ (2539) ทำการศึกษาการบำบัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช พบว่ากกกลม และรูปถาปีสามารถบำบัดธาตุอาหารในน้ำได้ดีพอๆกัน แต่รูปถาปีมีความต้องการธาตุอาหารในปริมาณที่มากกว่ากกกลม ดังนั้น เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารออกไปจากดินและระบบ จึงควรเลือกใช้กกกลมเนื่องจากบำบัดธาตุอาหารในน้ำได้ดีพอๆกับรูปถาปี และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่ารูปถาปี

พงษ์ศักดิ์ (2544) ทำการศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงของแมงกานีสและเหล็กในดินจากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยการซึมผ่านแปลงหญ้าต่างชนิด เลือกใช้กกกลมทำการศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงของแมงกานีสและเหล็กในดินจากระบบบำบัดน้ำเสียเทศบาลเมืองเพชรบุรี โดยการซึมผ่านแปลงหญ้าต่างชนิด เลือกใช้กกกลม หญ้าสตาร์ หญ้าคาล่า หญ้าโคสโครส หญ้าแฝก พันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา มาทำงานร่วมกับดินและจุลินทรีย์ ในการบำบัดน้ำเสีย ทำการปล่อยน้ำเสียไหลเข้าแปลงหญ้าต่างชนิด และแปลงควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืช ซึ่งลักษณะการปล่อย

น้ำเสียเป็นแบบปล่อยน้ำเสียไหลเข้าแปลงแล้ว ชังน้ำ 5 วัน สลับกับปล่อยแห้ง 2 วัน จากนั้นทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำที่ระยะทาง 20, 40, 60, 80 และ 100 เมตรตามลำดับ โดยที่ผลการทดลองพบว่า กกกกลมมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นชัดเจนตั้งแต่ระยะ 20 ถึง 60 เมตร

ภาวสุระ (2545) ทำการศึกษาเรื่องประสิทธิภาพและคุณภาพน้ำใต้ผิวดินในแปลงทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้หญ้ากรองบริเวณแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี โดยการปล่อยน้ำไหลผ่านแปลงทดลองที่ทำการปลูกพืชที่ใช้ในการทดลอง 3 ชนิด ได้แก่ ต้นกกกกลม หญ้าแฝกอินโดนีเซีย ต้นธูปฤาษี และแปลงควบคุมที่ไม่ได้ปลูกพืช ซึ่งได้ทำการทดลองในลักษณะการปล่อยน้ำเสียเข้าแปลงทดลองในอัตรา 150 ลิตรต่อนาที่ ไหลต่อเนื่องทุกวัน วันละ 7 ชั่วโมง ในช่วงระหว่างเวลา 9.00-16.00 น. จนครบอายุเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ทุก 2 สัปดาห์ตลอดช่วงอายุของพืช ซึ่งการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละชนิดพืช พบว่า ต้นกกกกลมมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโดยรวม กล่าวคือ กกกกลมสามารถบำบัด COD สารแขวนลอยฟอสเฟตทั้งหมดและปรอทได้ดี มีประสิทธิภาพสูง ทั้งยังนำผลผลิตไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าพืชชนิดอื่น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

1.1 เครื่องยูวี – วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

1.2 ฝู้อบ รูน OF – 11E ยี่ห้อ JEIO TECH

1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0 กรัม รูน WB-0250003
บริษัท Mettler Toledo รูน PB-1501

1.4 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน

1.5 เครื่องบดละเอียด

1.6 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด

1.7 เคสซิเคเตอร์

1.8 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแกมปีและขาตั้ง

1.9 เตาเผา

1.10 กระบะทดลองปลูก ขนาด 51×51×54 เซนติเมตร

2. สารเคมี

2.1 ฟอรัมัลดีไฮด์มาตรฐาน (HCHO)

2.2 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)

2.3 กรดโครโมโทรปิก

2.4 ตัวดูดซับ

2.4.1 กกกลมตากแห้ง

2.4.2 ถ่านกกกลม

2.5 วัสดุเพาะปลูก

วิธีการ

1. การเตรียมตัวดูดซับ

1.1 กกกลมตากแห้ง เตรียมโดยนำต้นกกกลมมาตัดเป็นท่อน ให้มีขนาด 1-2 เซนติเมตร แล้วตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นเก็บกกกลมตากแห้งที่ผ่านการอบไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป



ภาพที่ 15 กกกลมตากแห้ง

1.2 ถ่านกกกลม เตรียมโดยนำต้นกกกลมไปตากให้แห้ง แล้วนำไปเผา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนเป็นถ่านสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17 หลังจากนั้นเก็บถ่านกกกลมที่ผ่านการอบไว้ใช้ในการศึกษาวิจัยต่อไป



ภาพที่ 16 เตาเผา



ภาพที่ 17 ถ่านกกกลม

2. การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

2.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1,000.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตฟอร์มาลดีไฮด์มาตรฐานร้อยละ 38 มาจำนวน 2.63 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1,000.0 มิลลิกรัม/ลิตร

2.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ มาจำนวน 10.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100.0 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร

2.3 เตรียมสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ มาจำนวน 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

2.4 นำสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร มาความเข้มข้นละ 3 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับกรดโครโมโทรปิคปริมาณ 1 ช้อนตวงสาร และกรดซัลฟิวริกปริมาณ 4.5 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 10 นาที จะได้สารละลายสีม่วง หลังจากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีค่าดูดกลืนแสงสูงสุด ตามวิธีของ MERCK 1.14678.001 (Method : photometer) ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและสีของสารละลายดังภาพที่แสดงในภาคผนวก แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 575 นาโนเมตร ในแกน Y และความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ในแกน X ดังภาพภาคผนวกที่ 2

3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร มา 20 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

4. การวางแผนการทดลอง

4.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ ใช้ตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลมชนิดละ 3 ซ้ำ

ทำการทดลองโดยชั่งกกลมตากแห้ง ให้มีน้ำหนัก 1,2,3,4,5,6 และ 7 กรัม ตามลำดับ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ดังภาพที่ 18 แช่ทิ้งไว้ 30 นาที กรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของกกลมตากแห้ง ตามวิธีของ MERCK 1.14678.001 (Method : photometer) นำถ่านกกลมมาทำการทดลองเช่นเดียวกับกกลมตากแห้ง



ภาพที่ 18 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณกกลมตากแห้งและถ่านกกลม โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

4.2 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ ใช้ตัวดูดซับกกลมตากแห้งและถ่านกกลม ชนิดละ 3 ซ้ำ

ชั่งกกลมตากแห้งตามน้ำหนักที่ได้จากผลการทดลองข้อ 4.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ เข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ดังภาพที่ 19 แช่ทิ้งไว้ โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ ตามวิธีของ MERCK 1.14678.001 (Method : photometer) นำถ่านกกลมมาทำการทดลองเช่นเดียวกับกกลมตากแห้ง



ภาพที่ 19 การศึกษาอิทธิพลระยะเวลาสัมผัสของกกลมตากแห้งและถ่านกกลม โดยวิธีการทดลองแบบเบตซ์

4.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีผลต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม โดยทำการทดลองแบบเบตซ์ ชนิดละ 3 ซ้ำ

ชั่งกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลมตามน้ำหนักที่ได้จากผลการทดลองข้อ 4.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ เข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ โดยเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 45 นาที นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ ตามวิธีของ MERCK 1.14678.001 (Method : photometer) นำถ่านกกกลมมาทำการทดลองเช่นเดียวกับกกกลมตากแห้ง

4.4 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

นำผลการทดลองของกกกลมตากแห้งและถ่านถ่านกกกลมจากข้อ 4.1, 4.2 และ 4.3 มาคำนวณตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.5 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

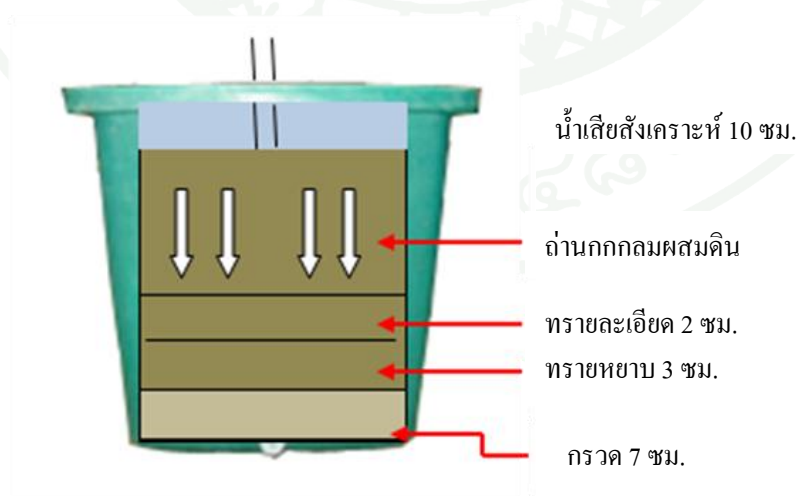
4.5.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยบรรจุคอลัมน์ด้วยตัวดูดซับคือถ่านกกกลมผสมกับดิน และศึกษาอัตราส่วนของดินที่เหมาะสมด้วยอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 กรัม

ทำการทดลองโดยนำตัวดูดซับผสมกับดินในอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 กรัม บรรจุใส่คอลัมน์ขนาด 5x30 เซนติเมตร เติมน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ สูงเหนือชั้นดิน 10 เซนติเมตร จากนั้นแช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปิดปากคอลัมน์ด้วยฟรอยด์ เพื่อป้องกันการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ หลังจากครบ 5 วัน ปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ออกจากคอลัมน์โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากปลายคอลัมน์ครั้งละ 50 มิลลิลิตร จนกระทั่งน้ำเสียสังเคราะห์ไม่ไหลออกจากคอลัมน์แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ ปล่อยให้คอลัมน์แห้ง 2 วัน แล้วทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

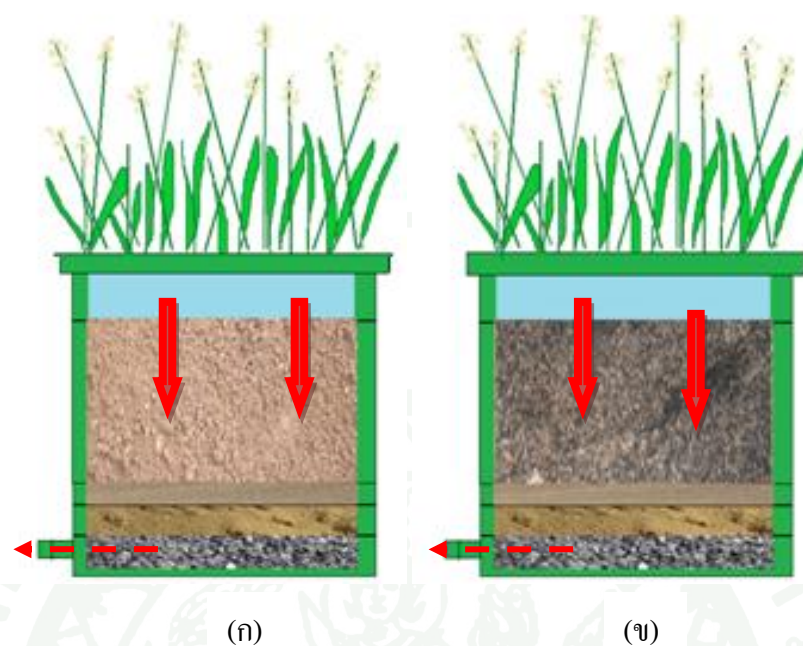
4.6 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยใช้กระเบปลาสติคขนาด 51x51x54 เซนติเมตร จำลองในระบบพื้นที่หญ้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

4.6.1 การทดลองเป็นการจำลองระบบบำบัดน้ำเสียของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในกระบะพลาสติกขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ภายในกระบะบรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร, ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ่านกกกลมผสมกับดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 4.4.1 และปลูกต้นกกกลมจนเจริญเติบโตสูงประมาณ 1 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกระบะที่บรรจุชั้นดินและกระบะที่บรรจุชั้นตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 19 และ 20) จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 40.0 ลิตร แช่ทิ้งไว้ 5 วัน แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ โดยเก็บน้ำตัวอย่างมาครั้งละ 1000.0 มิลลิลิตร จนนํ้าในกระบะพลาสติกแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์

4.6.2 การทดลองเป็นการจำลองระบบบำบัดพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ในกระบะพลาสติกขนาด 51×51×54 เซนติเมตร ภายในกระบะบรรจุกรวด 7 เซนติเมตร, ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร, ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ่านกกกลมผสมกับดินในอัตราส่วนที่ศึกษาได้จากข้อ 4.4.1 และปลูกต้นกกกลมจนเจริญเติบโตสูงประมาณ 1 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกระบะที่บรรจุชั้นดินและกระบะที่บรรจุชั้นตัวดูดซับ (ดังภาพที่ 20 และ 21) จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 40.0 ลิตร แช่ทิ้งไว้ 45 นาที แล้วเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ โดยเก็บน้ำตัวอย่างมาครั้งละ 1000.0 มิลลิลิตร จนนํ้าในกระบะพลาสติกแห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์



ภาพที่ 20 กระบะพลาสติกบรรจุชั้นวัสดุปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม



(ก) กระบะบรรจุชั้นดินที่ปลูกต้นกกกลม

(ข) กระบะบรรจุชั้นตัวดูดซับที่ปลูกต้นกกกลม

ภาพที่ 21 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มัลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก

5. สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. ระยะเวลาในการทดลอง

ระยะเวลาที่ทำการศึกษาดทดลอง 12 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2555

ผลและวิจารณ์

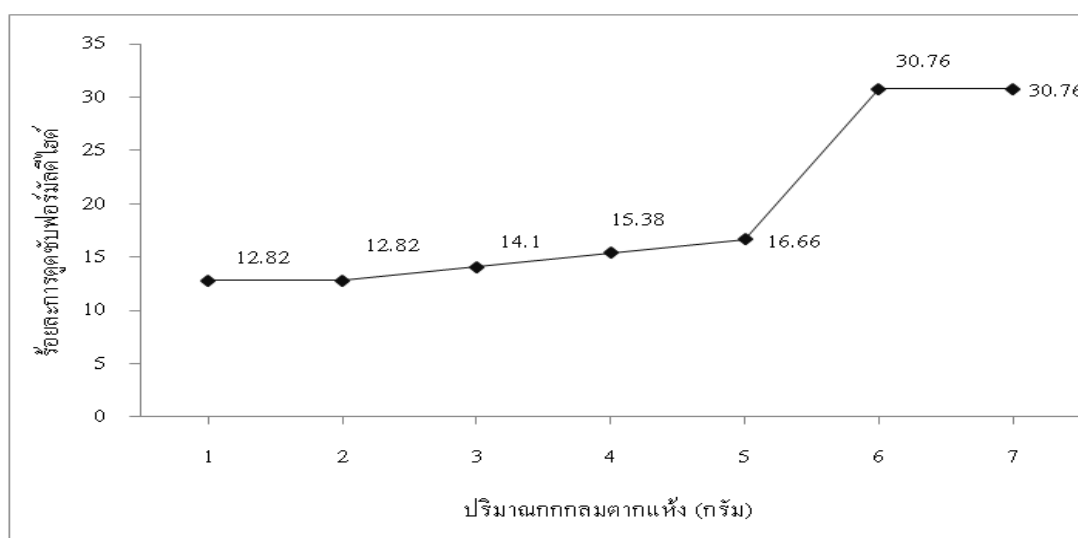
ศึกษาการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยการทดลองแบบแบตช์ แบบการไหลต่อเนื่องและเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก โดยการทดลองแบบแบตช์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส และวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีกับดิน ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ กัน ด้วยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่องและศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยระบบหน่วยกรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กที่มีตัวดูดซับเป็นวัสดุเพาะปลูกร่วมด้วย

1. ผลของปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม

1.1 ตัวดูดซับกกกลมตากแห้ง

จากการทดลองข้อที่ 4.1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และแปรผันปริมาณตัวดูดซับกกกลมตากแห้ง ตั้งแต่ 1 กรัม จนถึง 7 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 1 กรัม จนกระทั่งปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 6 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่มีการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 30.76 และหลังจากนั้นจะมีประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์คงที่ที่ปริมาณตัวดูดซับ 7 กรัม (ดังภาพที่ 22) ตัวดูดซับกกกลมตากแห้ง 1, 2, 3, 4, 5 และ 7 กรัม มีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 12.82, 12.82, 14.10, 15.38, 16.66 และ 30.76 ตามลำดับ (ตารางที่ 4)



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์และปริมาณกกกลมตากแห้ง

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์และปริมาณกกกลมตากแห้ง

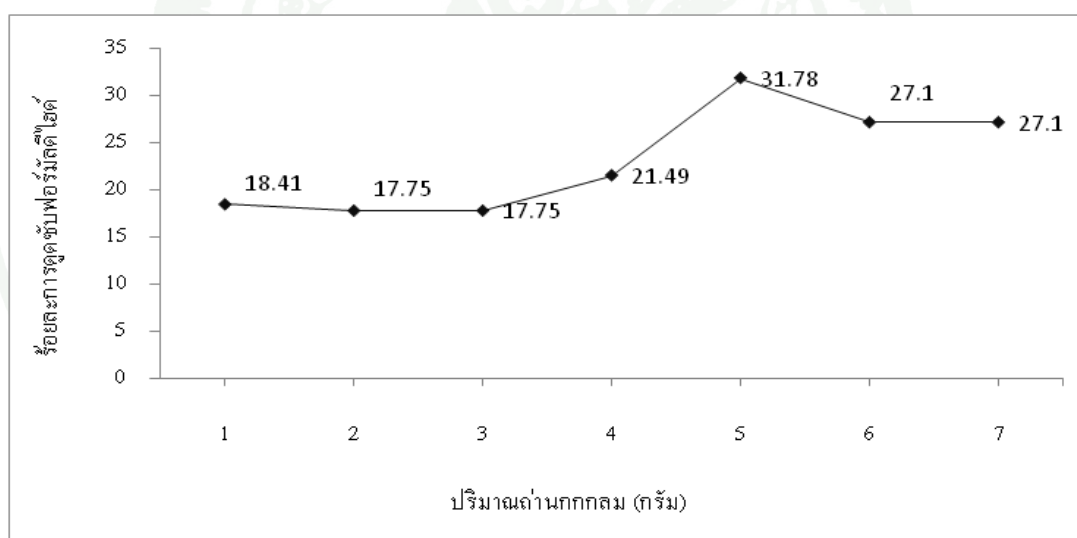
ปริมาณกกกลมตากแห้ง (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์
1	12.82
2	12.82
3	14.10
4	15.38
5	16.66
6	30.76
7	30.76

จากผลการศึกษาจะเห็นว่าปริมาณกกกลมตากแห้งที่ 1 ถึง 5 กรัมร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ มีลักษณะการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งปริมาณกกกลมตากแห้งที่ 6 กรัม มีร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ที่สูงขึ้นมาก สามารถอธิบายได้ว่า เป็นผลจากตัวดูดซับที่ได้นำมาศึกษาทดลอง ซึ่งอาจมีความแตกต่างในแต่ละส่วนของต้นพืช มีลักษณะของความพรุนที่มีผลต่อการดูดซับที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น

1.2 ตัวดูดซับถ่านกกกลม

จากการทดลองข้อที่ 4.1 ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และแปรผันปริมาณตัวดูดซับถ่านกกกลม ตั้งแต่ 1 กรัม จนถึง 7 กรัม ใช้ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 1 กรัม จนกระทั่งปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่มีการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 31.78 และหลังจากนั้นจะมีประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ลดลงที่ปริมาณตัวดูดซับ 6 กรัม (ดังภาพที่ 23) ตัวดูดซับถ่านกกกลม 1, 2, 3, 4, 6 และ 7 กรัม มีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 18.41, 17.75, 17.75, 21.49, 27.10 และ 27.10 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และปริมาณถ่านกกกลม

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์และปริมาณถ่านกกกลม

ปริมาณถ่านกกกลม (กรัม)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์
1	18.41
2	17.75
3	17.75
4	21.49
5	31.78
6	27.10
7	27.10

จากการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ จะเห็นได้ว่า ทั้งตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม ให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และจะคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงในที่สุด อธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับมากขึ้น แต่ปริมาณพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพมีจำนวนจำกัด ทำให้ถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีที่สุดและหลังจากนั้นอาจเกิดกระบวนการคายซับร่วมด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (นิพนธ์และกณิดา, 2550)

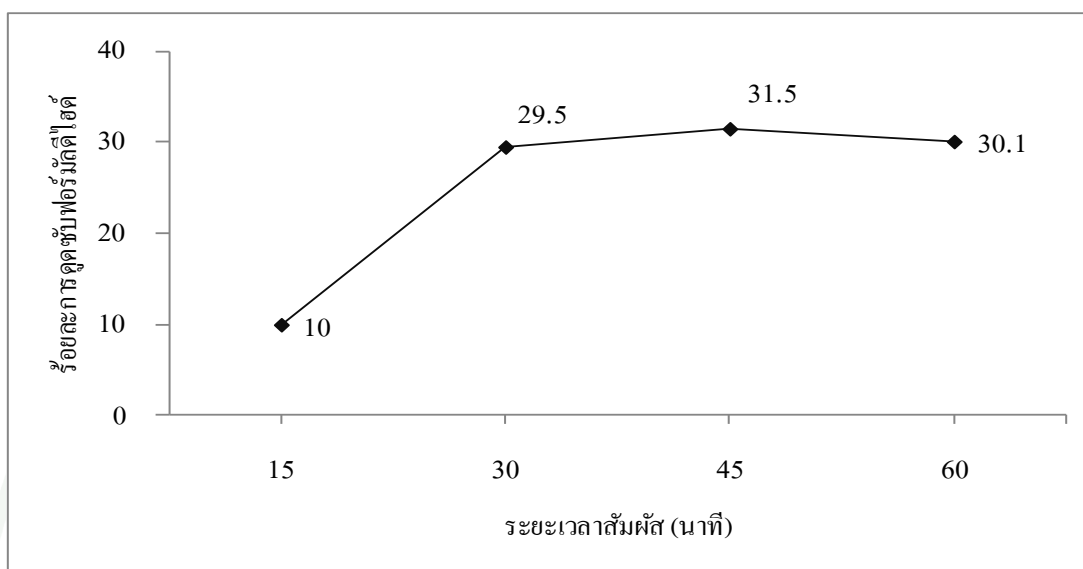
2. ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ของตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม

2.1 กกกลมตากแห้ง

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของฟอรั่มลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณกกกลมตากแห้ง 6 กรัม ทดลองแปรผันระยะเวลาเป็น 15, 30, 45 และ 60 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาสัมผัสที่ 45 นาที ซึ่งมีการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์สูงสุดเท่ากับร้อยละ 31.5 และหลังจากนั้นประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลง โดยระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของตัวดูดซับกกกลมแบบตากแห้ง เท่ากับ

45 นาที สำหรับระยะเวลาสัมผัสที่ 15, 30 และ 60 นาที จะมีประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 10, 17.5 และ 25 ตามลำดับ ดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้งและระยะเวลาสัมผัส

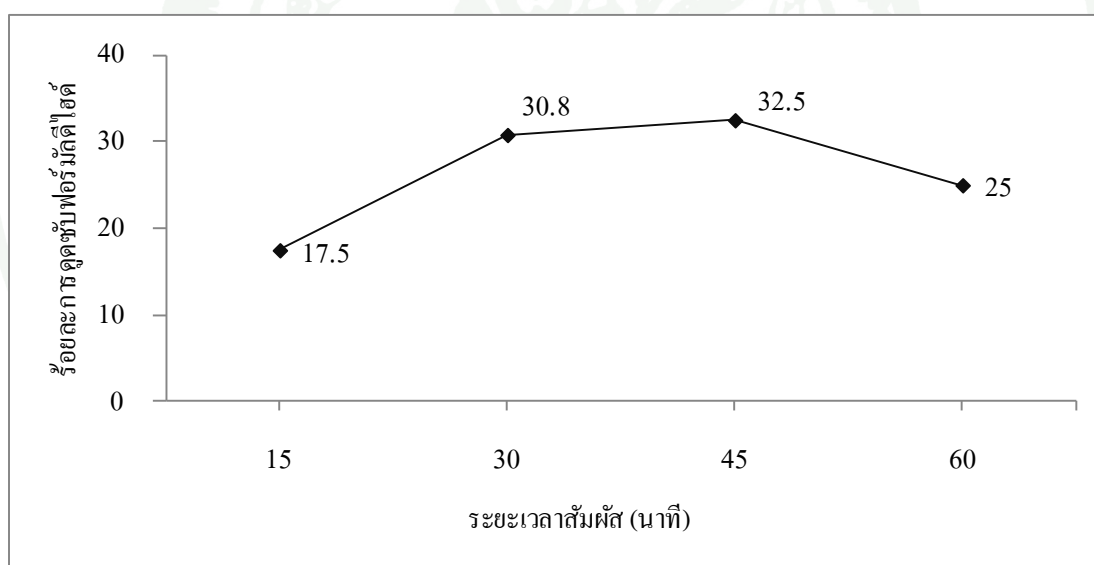
ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้งและระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์
15	10
30	29.5
45	31.5
60	30.1

2.2 ถ่านกกกลม

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณถ่านกกกลมตากแห้ง 5 กรัม ทดลองแปรผันระยะเวลาสัมผัสเป็น 15, 30, 45 และ 60 นาที ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งระยะเวลาสัมผัสที่ 45 นาที มีการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์สูงสุดเท่ากับ 32.5 หลังจากนั้นร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์จะมีค่าลดน้อยลงเมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลมปริมาณ 5 กรัมเท่ากับ 45 นาที ส่วนระยะเวลาสัมผัส 15, 30 และ 60 นาที มีร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 17.5, 30.8 และ 25 ตามลำดับ ดังภาพที่ 25



ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลมและระยะเวลาสัมผัส

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของถ่านกกกลมและระยะเวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัส (นาทื)	ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์
15	17.5
30	30.8
45	32.5
60	25

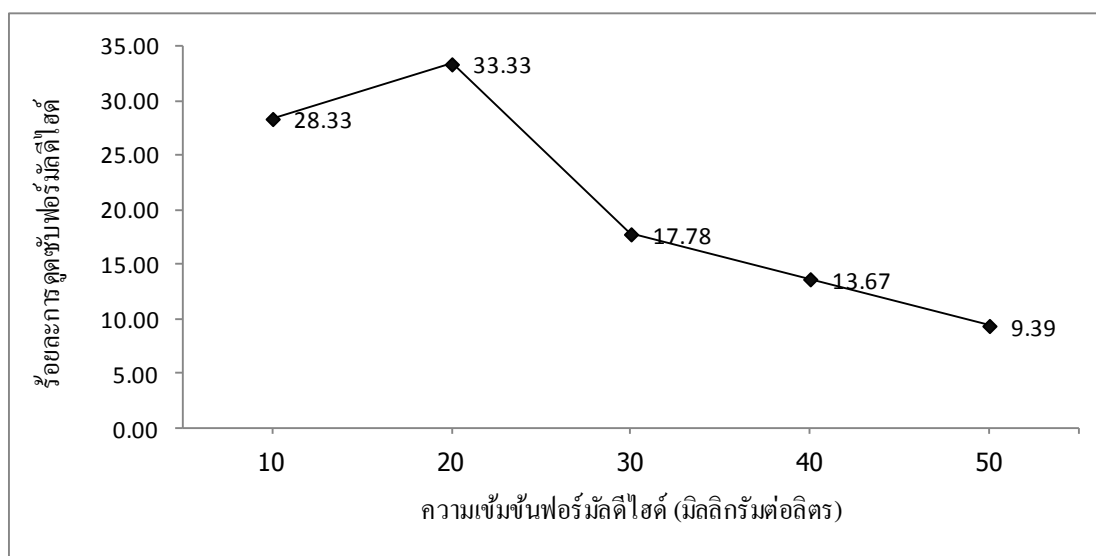
จะเห็นได้ว่า ทั้งกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ลดลงเหมือนกัน เมื่อระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเพิ่มขึ้น อธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส โมเลกุลของตัวดูดซับจะไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น จนถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพดีที่สุด และหลังจากนั้นพื้นผิวจะคายออกมา เมื่อปล่อยให้ระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดน้อยลง (นิพนธ์และคณิตา, 2550) จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนั้นถ่านกกกลมจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกในการทดลองต่อไป

3. ศึกษาความเข้มข้นของฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1. กกกลมตากแห้ง

จากผลการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับกกกลมตากแห้งที่เหมาะสม เท่ากับ 6 กรัม และระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 45 นาทื นำมาศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ โดยแปรผันความเข้มข้นของสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ สูงที่สุดที่ความเข้มข้นสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เท่ากับ 33.33 หลังจากนั้นจะลดน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น (ดังภาพที่ 26) โดยที่ความเข้มข้น 10, 30, 40 และ 50 มีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เท่ากับ 28.33, 17.78, 13.67 และ 9.39 ตามลำดับ (ตารางที่ 8)



ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

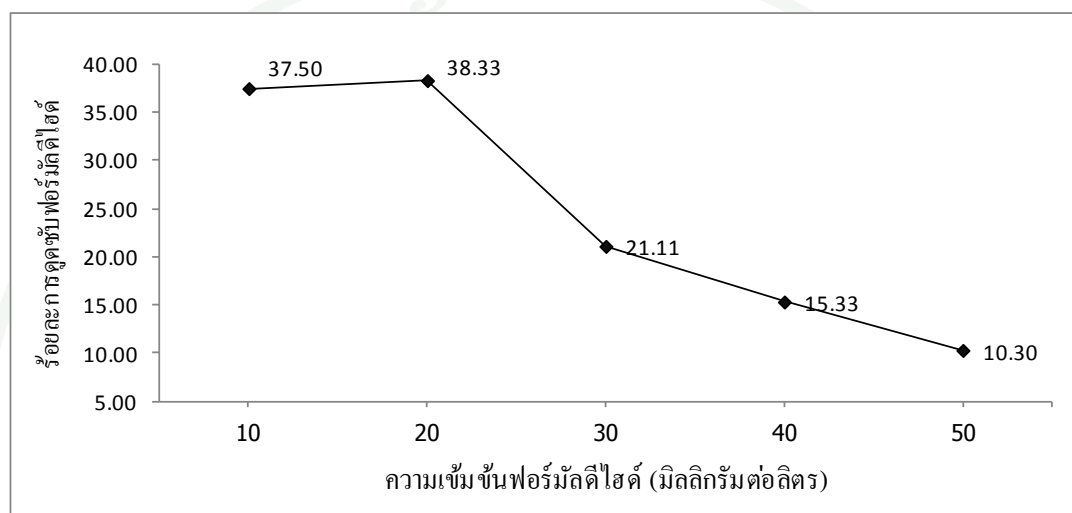
ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

ความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์
10	28.33
20	33.33
30	17.78
40	13.67
50	9.39

3.2. ถ่านกักกลม

จากผลการทดลองหาปริมาณตัวดูดซับกักกลมตากแห้งที่เหมาะสม เท่ากับ 5 กรัม และระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 45 นาที นำมาศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ โดยแปรผันความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ผลการทดลองดังนี้

จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์สูงที่สุด ที่ความเข้มข้นสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีร้อยละการดูดซับ ฟอर्मัลดีไฮด์เท่ากับ 38.33 หลังจากนั้นจะลดน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น (ดังภาพที่ 27) โดยที่ความเข้มข้น 10, 30, 40 และ 50 มีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เท่ากับ 37.50, 21.11, 15.33 และ 10.30 ตามลำดับ (ตารางที่ 9)



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์และความเข้มข้นของสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์

ความเข้มข้นสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์
10	37.50
20	38.33
30	21.11
40	15.33
50	10.30

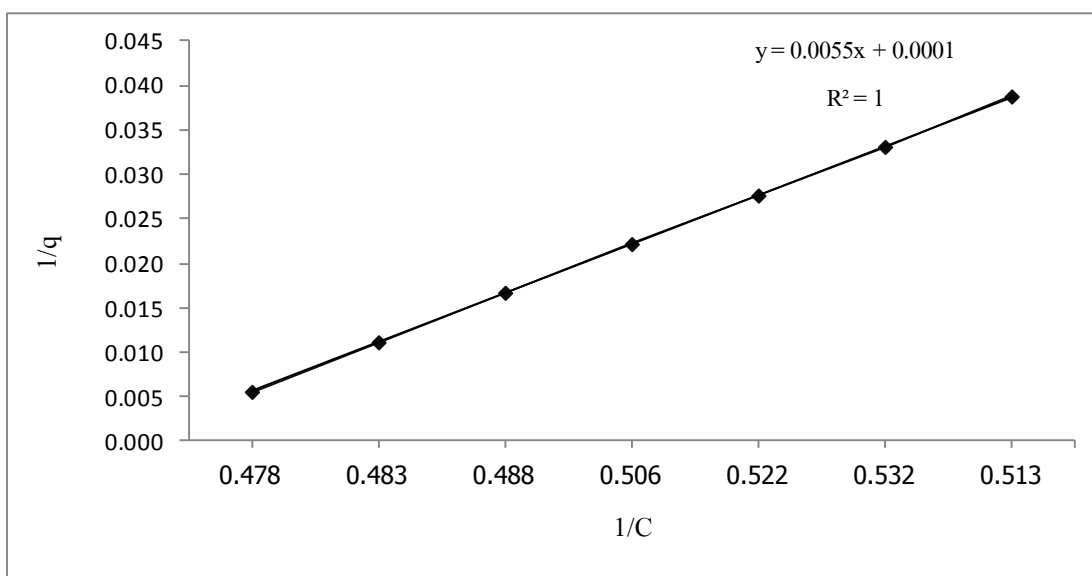
จากผลการทดลองอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณมากจะมีจำนวนโมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์มากด้วย ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

4. การศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ของกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม

จากการทดลองในข้อที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.1 กกกลมตากแห้ง

เมื่อพิจารณาการดูดซับของฟอร์มาลดีไฮด์ โดยนำข้อมูลมาทดสอบตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 28 และ 29 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับของทั้งสองแบบมีค่าแตกต่างกัน คือ 1.00 และ 0.79 ตามลำดับ โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชนั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มและกลไกการดูดซับเป็นสมการของแลงเมียร์ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากกว่า และพบว่าปริมาณกกกลมตากแห้ง 1 กรัม สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้เท่ากับ 0.10 มิลลิกรัม



ภาพที่ 28 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยใช้กกลมตากแห้ง

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (1)

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

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 0.0055 \left(\frac{1}{C} \right) + 0.0001 \quad \dots\dots\dots(2)$$

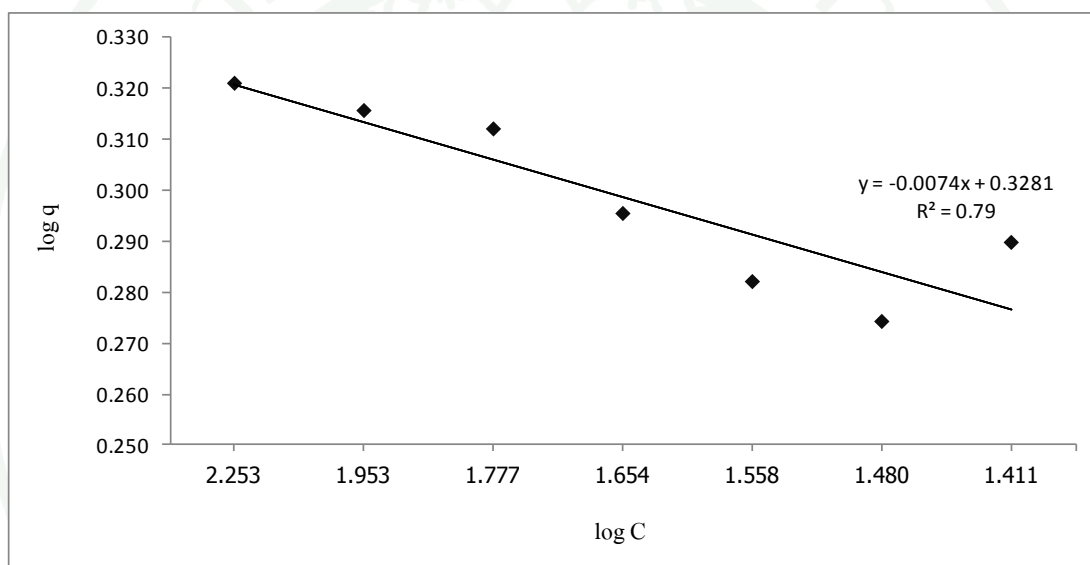
จากสมการที่ (2) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0055 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.0001 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 0.005$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.0001$$

$$\text{ดังนั้น } K = 0.018$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า K มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ นั่นคือ ปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของกกกลมตากแห้ง



ภาพที่ 29 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรอนด์ชโดยใช้กกกลมตากแห้ง

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรอนด์ช โดยทั่วไป คือ $q = KC^{1/n}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึมได้ดังสมการที่ (3)

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad \dots\dots\dots(3)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\log q = 0.328 - 0.0074 \log C \quad \dots\dots\dots(4)$$

จากสมการที่ (4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -0.0074 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.328 ดังนั้น

$$\log K = 0.328$$

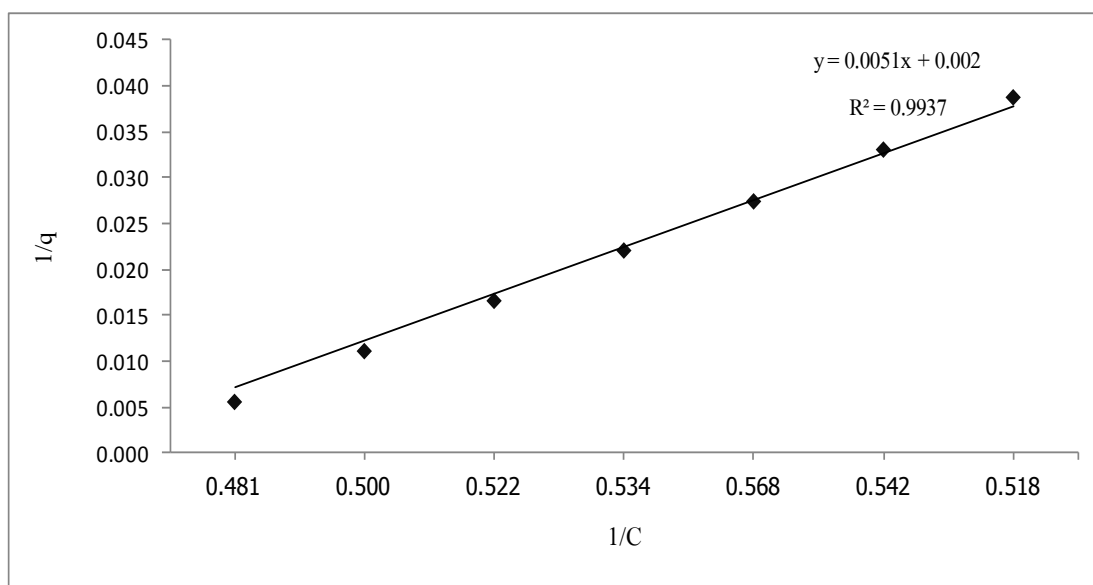
$$1/n = -0.007$$

$$n = -142.8$$

จากไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช พบว่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าความสามารถดูดซับของตัวดูดซับได้น้อย หรือบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยในการดูดซับ นั่นคือพอร์มัลติไฮด์ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของกกกลมตากแห้งได้น้อย

4.2 ตัวดูดซับถ่านกกกลม

เมื่อพิจารณาการดูดซับของพอร์มัลติไฮด์ โดยนำข้อมูลมาทดสอบตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังภาพที่ 30 และ 31 ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R-square) ในการดูดซับของทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.994 และ 0.928 ตามลำดับ โดยไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (0.9700-1.200) แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดลิชนั้นไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการดูดซับพอร์มัลติไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์จึงสอดคล้องกับสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ และกลไกการดูดซับจะเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ และพบว่าปริมาณถ่านกกกลม 1 กรัม สามารถดูดซับพอร์มัลติไฮด์ได้เท่ากับ 0.13 มิลลิกรัม



ภาพที่ 30 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยใช้ถ่านกกกลม

โดยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของแลงเมียร์โดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1 + KC}$ สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ 5

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad \dots\dots\dots(5)$$

แทนค่าสมการที่ได้จากกราฟจะได้

$$\frac{1}{q} = 0.005 \frac{1}{C} + 0.002 \quad \dots\dots\dots(6)$$

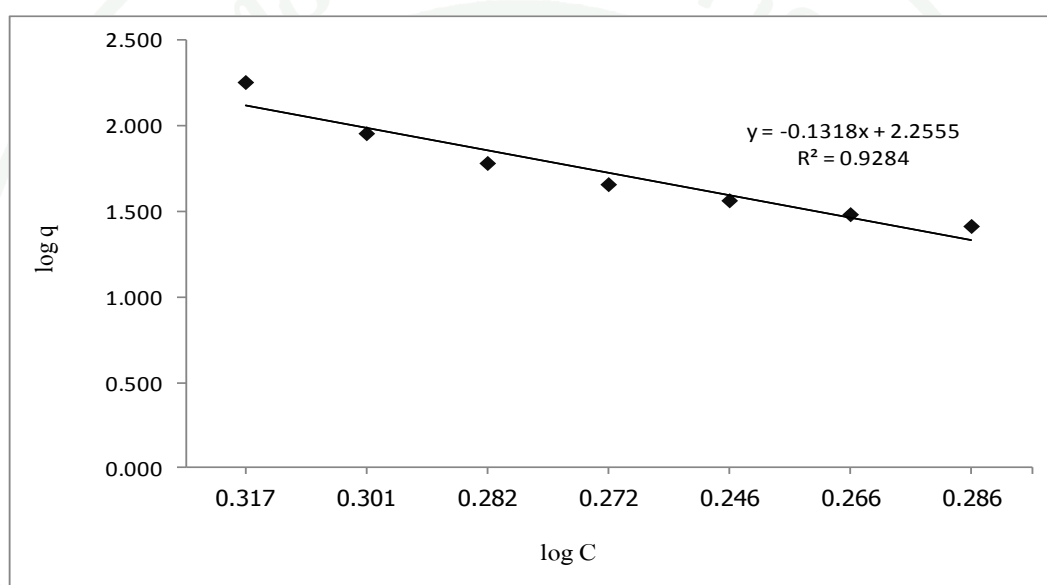
จากสมการที่ (6) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q$ กับ $1/C$ จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 0.0051 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 0.002 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 0.0051$$

$$\frac{1}{q_m} = 0.002$$

ดังนั้น $K = 0.4$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า K มีน้อยกว่า 1 ดังนั้นแสดงว่า ปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ นั่นคือ ฟอर्मัลดีไฮด์ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวของถ่านกกกลม



ภาพที่ 31 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรุนดิชโดยใช้ถ่านกกกลม

โดยสมการไอโซเทอร์มการการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของฟรุนดิชโดยทั่วไป คือ $q = \frac{q_m KC}{1+KC}$

สามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปของลอการิทึม ได้ดังสมการที่ (7)

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

$$\log q = 2.255 - 0.132 \log C \quad \dots\dots\dots(8)$$

จากสมการที่ (8) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้เส้นตรงที่มีความลาดชันเท่ากับ -0.132 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ 2.255 นั่นคือ

$$\log K = 2.255$$

$$1/n = -0.132$$

$$n = -7.57$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนดิช พบว่า $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับได้น้อย หรือบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณน้อยในการดูดซับ แสดงว่าฟอर्मลิตีไฮด์ถูกดูดซับไว้ที่พื้นผิวของถ่านกกกลมน้อย

จะเห็นว่าตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม มีไอโซเทอร์มสอดคล้องกับกลไกการดูดซับของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบลักษณะเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

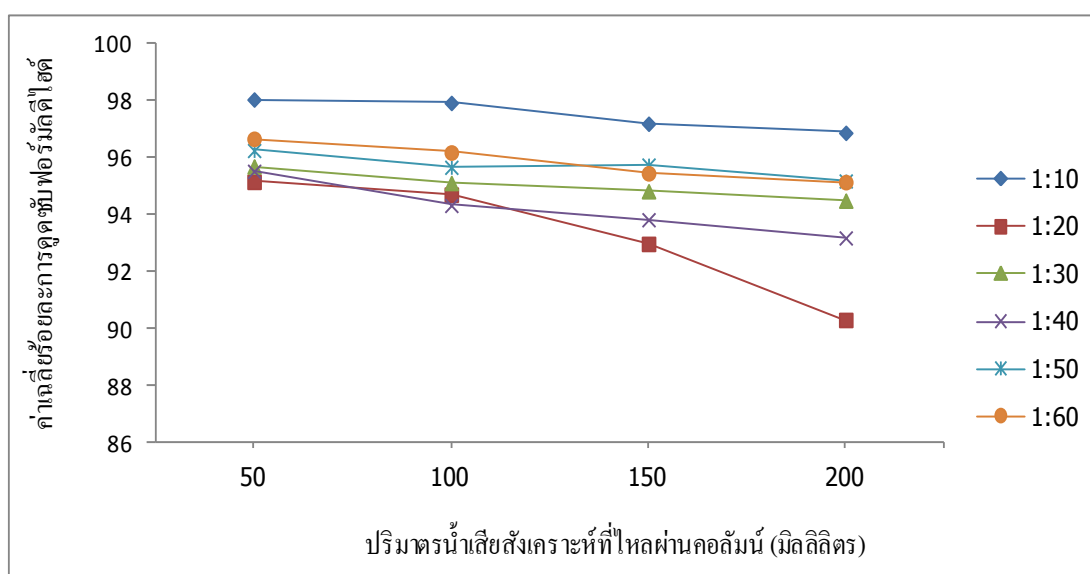
5. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मลิตีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์กับอัตราส่วนของถ่านกกกลมกับดินที่แปรผันโดยทำการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองข้อที่ 4.5 ศึกษาอัตราส่วนของถ่านกกกลมกับดินที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मลิตีไฮด์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอर्मลิตีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงจากชั้นตัวดูดซับผสมกับดิน 10 เซนติเมตร ชั่งแช่ 5 วัน ปล่อน้ำเสียให้ไหลผ่านคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิตรจนไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ แล้วปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองซ้ำเช่นเดิม 3 ครั้ง นำน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मลิตีไฮด์ ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมกับดิน

ปริมาตรตัวอย่าง น้ำที่เก็บหลังจาก ไหลผ่านคอลัมน์ (ml)	ผลการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์แบบปล่อยไหลต่อเนื่อง ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์					
	อัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน					
	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60
50	98.05	95.16	95.70	95.53	96.26	96.67
100	97.93	94.71	95.12	94.33	95.67	96.19
150	97.20	92.98	94.83	93.83	95.75	95.46
200	96.88	90.31	94.50	93.19	95.19	95.15

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยร้อยละการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์แต่ละอัตราส่วนถ่านกกกลมกับดินใกล้เคียงกัน และมีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์สูงที่สุดที่ 50 มิลลิลิตร โดยอัตราส่วน 1:10 , 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 มีค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ เท่ากับ 98.05, 95.16, 95.70, 95.53, 96.26 และ 96.67 ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาและการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของถ่านกกกลมกับดินจะมีค่าลดลง (ดังภาพที่ 32) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เอาไว้ หากมีการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านถ่านกกกลมกับดินในคอลัมน์ต่อไปอีก ถ่านกกกลมอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน

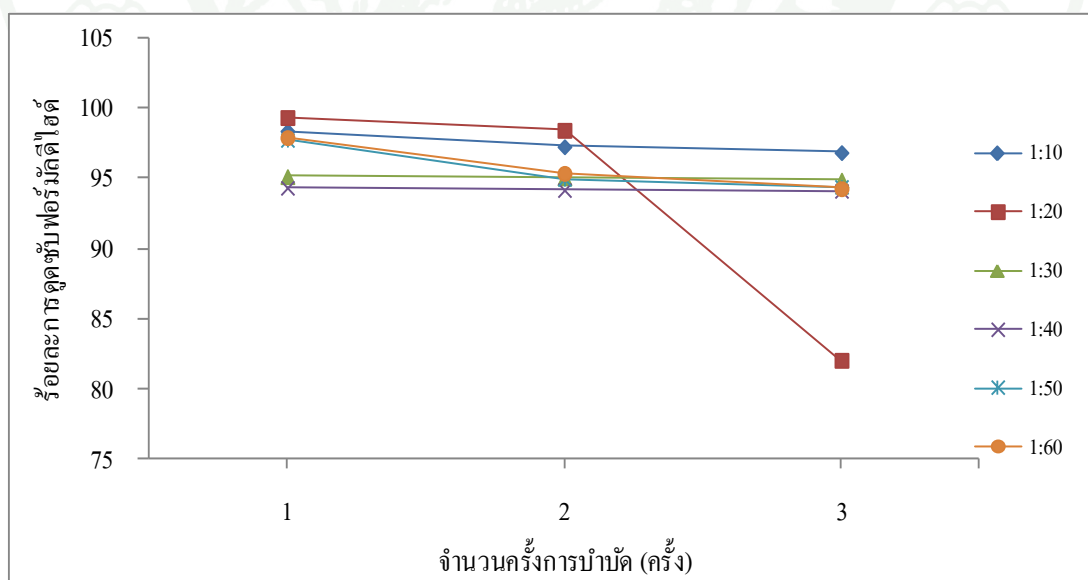
6. ผลของประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์กับจำนวนครั้งการบำบัด โดยทำการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองข้อที่ 4.5 ศึกษาอัตราส่วนของถ่านกกกลมกับดินที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยขังน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงจากชั้นตัวดูดซับผสมกับดิน 10 เซนติเมตร ขังแช่ 5 วัน ปล่อยน้ำเสียให้ไหลผ่านคอลัมน์ เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากปลายคอลัมน์ทุกๆ 50 มิลลิลิตรจนไม่มีน้ำไหลออกจากคอลัมน์ แล้วปล่อยให้แห้ง 2 วัน แล้วเติมน้ำเสียสังเคราะห์โดยทำการทดลองซ้ำเช่นเดิม 3 ครั้ง นำน้ำที่ไหลออกจากคอลัมน์ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการบำบัด ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมกับดิน

การบำบัดครั้งที่	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์					
	อัตราส่วนถ่านกกกลม:ดิน					
	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50	1:60
1	98.4	99.36	95.15	94.35	97.76	97.93
2	97.28	98.45	95.06	94.19	94.98	95.38
3	96.86	82.06	94.9	94.13	94.42	94.29

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ในแต่ละอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดินนั้น ประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละอัตราส่วนนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าสูงที่สุดใน การบำบัดครั้งที่ 1 โดยอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 มีร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ เท่ากับ 98.4, 99.36, 95.15, 94.35, 97.76 และ 97.93 ตามลำดับ และหากการบำบัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์จะลดน้อยลงตามจำนวนครั้งการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับ การบำบัดในรอบแรก(ภาพที่33) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์เอาไว้ หากมีการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านถ่านกกกลมกับดินต่อไปอีก ถ่านกกกลมอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการบำบัด ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ และอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนระหว่างถ่านกกกลมต่อดินมีประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มลดลงหรือคงที่ เมื่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านมากขึ้นและจำนวนครั้งการบำบัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดินเท่ากับ 1:60 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุเพาะปลูกในระบบหมุนเวียนน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์สูง นอกจากนี้ต้นกกกลมยังสามารถเจริญเติบโตในอัตราส่วนวัสดุเพาะปลูกถ่านกกกลมต่อดินได้อีกด้วย

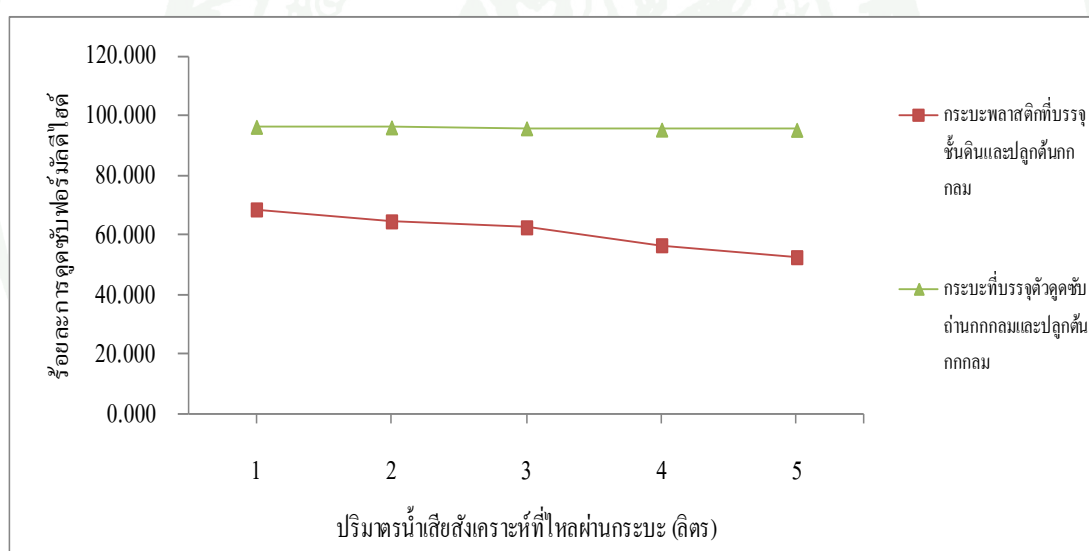
7. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กในระบบหมุนเวียนน้ำเสีย

เทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก เป็นการจำลองระบบหมุนเวียนน้ำเสีย โดยใช้กระบะพลาสติกที่มีขนาด 51x51x54 เซนติเมตร ซึ่งบรรจุชั้น กรวด ทราย ทรายละเอียด และถ่านกกกลมผสมดินตามอัตราส่วนที่ศึกษามาแล้วโดยปลูกต้นกกกลมให้มีอายุ 1 สัปดาห์ เปรียบเทียบกับกระบะพลาสติกที่บรรจุชั้นดินและกระบะพลาสติกที่บรรจุชั้นตัวดูดซับถ่านกกกลมแต่ไม่ปลูกต้นกกกลม ทดสอบตามระบบระบบหมุนเวียนน้ำเสีย ซึ่งการทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร โดยขังน้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงจากชั้นตัวดูดซับ 10 เซนติเมตร ทำการขังแช่ 5 วัน เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากทางออกกระบะพลาสติก จนไม่มีน้ำไหลออกมาปล่อยให้แห้ง 2 วัน นำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในกระบะทดลองปลูกพืช โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบะบรรจุชั้นดินที่ปลูกต้นกกกลมและกระบะบรรจุชั้นตัวดูดซับถ่านกกกลมและปลูกต้นกกกลม พบว่าปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านกระบะพลาสติกมีประมาณ 5 ลิตร ซึ่งกระบะบรรจุชั้นตัวดูดซับถ่านกกกลมและปลูกต้นกกกลมนั้นมีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์สูงกว่า กระบะบรรจุชั้นดินที่ปลูกต้นกกกลม มีร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ เท่ากับ 96.35, 68.66 และ ตามลำดับ (ตารางที่ 12) เนื่องจากเมื่อปล่อยน้ำเสียลงในกระบะพลาสติก น้ำเสียจะไหลผ่านและเคลื่อนที่ไปในแนวดิ่ง เมื่อไหลผ่านชั้นวัสดุเพาะปลูก โดยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดียิ่งขึ้น และหากปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านกระบะพลาสติกต่อไปเรื่อย ๆ ประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 34) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เอาไว้ หากมีการปล่อยน้ำเสียกรองผ่านชั้นตัวดูดซับในกระบะต่อไปอีก ถ่านกกกลมจะอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด

ตารางที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และวัสดุเพาะปลูกในกระบะทดลองการบำบัดแบบหมุนำกรองน้ำเสีย

ปริมาณน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ไหลผ่าน (ลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์	
	กระบะบรรจุชั้นดินที่ปลูกต้นกก กลม	กระบะบรรจุชั้นตัวดูดซับ ถ่านกกกลมและปลูกต้นกกกลม
1	68.667	96.35
2	64.667	96.17
3	62.667	95.85
4	56.667	95.42
5	52.667	95.35



ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระบะพลาสติกแบบหมุนำกรองน้ำเสีย

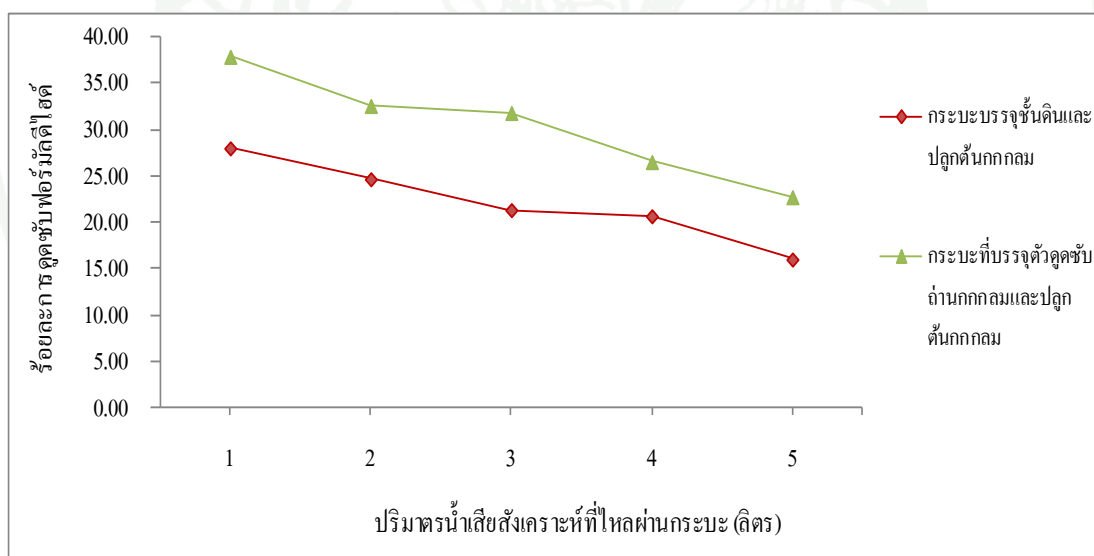
8. ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็กในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

การทดลองนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ฟอรั่มลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 40 ลิตร ระยะเวลาการสัมผัส 45 หลังจากนั้นปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับผสมกับดิน ทรายละเอียด ทราย และกรวด บรรจุในกระเบพลาสติกซึ่งปลูกต้นกกกลมให้มีอายุ 1 สัปดาห์ เปรียบเทียบกับกระเบพลาสติกที่บรรจุชั้นดินและกระเบพลาสติกที่บรรจุชั้นตัวดูดซับ ถ่านกกกลมแต่ไม่ปลูกต้นกกกลม ทดสอบตามระบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์จากทางออกกระเบพลาสติก จนไม่มีน้ำไหลออกมา นำตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในกระเบทดลองปลูกพืชโดยเปรียบเทียบระหว่างกระเบบรรจุชั้นที่ปลูกต้นกกกลมและกระเบบรรจุชั้นตัวดูดซับถ่านกกกลมที่ปลูกต้นกกกลม พบว่าปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านกระเบพลาสติกมีประมาณ 5 ลิตร ซึ่งกระเบบรรจุชั้นตัวดูดซับถ่านกกกลมและปลูกต้นกกกลมนั้นมีร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์สูงกว่า กระเบบรรจุชั้นดินที่ปลูกต้นกกกลม มีร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ เท่ากับ 37.88 และ 28.00 ตามลำดับ (ตารางที่ 13) เนื่องจากเมื่อปล่อยน้ำเสียลงในกระเบพลาสติก น้ำเสียจะไหลผ่านและเคลื่อนที่ไปในแนวดิ่ง เมื่อไหลผ่านชั้นวัสดุเพาะปลูก โดยวิธีทางกายภาพ เคมี และชีววิทยา ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้ดียิ่งขึ้น และหากปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านกระเบพลาสติกต่อไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 35) เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์เอาไว้ หากมีการปล่อยน้ำเสียกรองผ่านชั้นตัวดูดซับในกระเบต่อไปอีก ถ่านกกกลมจะอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด

ตารางที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับพอร์มัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระบะพลาสติกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ปริมาณน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ไหลผ่าน (ลิตร)	ร้อยละการดูดซับพอร์มัลดีไฮด์	
	กระบะบรรจุชั้นดินและปลูกต้น	กระบะบรรจุชั้นตัวดูดซับ
	กกกกลม	ถ่านกกกลมและปลูกต้นกกกกลม
1	28.00	37.88
2	24.67	32.58
3	21.33	31.82
4	20.67	26.52
5	16.00	22.73



ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกระบะ ร้อยละการดูดซับพอร์มัลดีไฮด์ และประสิทธิภาพการบำบัดในกระบะพลาสติกแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลม โดยทำการทดลองแบบเบดซ์ ศึกษาอัตราส่วนระหว่างตัวดูดซับกับดินที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการไหลแบบต่อเนื่อง และการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยระบบบำบัดหล้ากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยอาศัยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

1. จากการศึกษผลของปริมาณตัวดูดซับกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลมที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยการทดลองแบบเบดซ์ พบว่า กกกลมตากแห้ง 6 กรัม และถ่านกกกลม 5 กรัม สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุด ที่ร้อยละการดูดซับ เท่ากับ 30.76 และ 31.78 (คิดเป็น 0.10 และ 0.13 มิลลิกรัม/กรัม) จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่งจะคงที่และมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับส่งผลให้พื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับมากขึ้น แต่ปริมาณพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพก็มีจำนวนจำกัดเช่นกัน ทำให้ถึงสภาวะอิ่มตัว ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุดและหลังจากนั้นอาจเกิดกระบวนการคายซับร่วมด้วย ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

2. จากการศึกษผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยการทดลองแบบเบดซ์ พบว่า กกกลมตากแห้ง 6 กรัม และถ่านกกกลม 5 กรัม สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 45 นาที สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ร้อยละ 31.5 และ 32.5 ตามลำดับ ในระยะเวลาเริ่มต้นพื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับมาก ทำให้มีอัตราการดูดซับมากขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ (ฟอर्मัลดีไฮด์) ซึ่งตัวดูดซับจะเข้าสู่ภาวะสมดุล ทำให้อัตราการดูดซับลดลง

3. ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ โดยการทดลองแบบเบดซ์ พบว่ากกกลมตากแห้ง 6 กรัมและถ่านกกกลม 5 กรัม สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการดูดซับ

ฟอร์มลิตไฮด์เท่ากับ 33.33 และ 38.33 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของฟอร์มลิตไฮด์เพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากที่ความเข้มข้นของฟอร์มลิตไฮด์ในปริมาณมากจะมีจำนวนโมเลกุลของฟอร์มลิตไฮด์มากด้วย ในขณะที่พื้นผิวของตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด ตัวถูกดูดซับไม่สามารถดูดซับไว้ที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

จากการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาการสัมผัสและความเข้มข้นของสารละลายฟอร์มลิตไฮด์มาตรฐานดังกล่าว ถ่านกกกลมจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปลูกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ด้วยระบบหญากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม นอกจากนั้นกกกลมตากแห้งและถ่านกกกลมมีกลไกการดูดซับที่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์

4. ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านกกกลมกับดิน ในการดูดซับฟอร์มลิตไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มลิตไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 400 มิลลิลิตร โดยการทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง โดยอาศัยหลักการของระบบหญากรองน้ำเสีย พบว่า อัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดินที่เหมาะสมคือ 1:60 ให้ร้อยละการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ดีที่สุด เท่ากับ 97.93 เมื่อปริมาตรการปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์และจำนวนรอบการบำบัดผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มลิตไฮด์ของถ่านกกกลมจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณพื้นผิวของถ่านกกกลมมีการดูดซับฟอร์มลิตไฮด์เอาไว้ และหากมีการนำน้ำเสียกรองผ่านถ่านกกกลมในคอลัมน์ต่อไปอีก ถ่านกกกลมจะเริ่มอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด

5. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเทคนิคการกรองในหน่วยย่อยขนาดเล็ก ตามระบบบำบัดแบบหญากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มลิตไฮด์ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 ลิตร พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ที่ดีที่สุด เท่ากับร้อยละ 96.35 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านกระเบพลาสติก และผลการศึกษาทดลองประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ตามระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ที่ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 37.88 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำเสียที่ไหลผ่านกระเบพลาสติก เนื่องจากเมื่อปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดในแนวตั้ง น้ำเสียจะไหลผ่านชั้นวัสดุปลูก ก้อนตัวดูดซับผสมกับดิน ทราวยละเอียด ทราวย และกรวด โดยการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ด้วยระบบหญากรองน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและการเพิ่มถ่านกกกลมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่า ดันกกกลมเจริญเติบโตได้ดีตลอดการบำบัดฟอร์มลิตไฮด์ เนื่องจาก

กกกมลเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตดีมากและมีโอกาสใช้ประโยชน์จากกกกมลได้จึงมีความเหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินร่วมกับการปลูกพืชในสภาพน้ำท่วมขังสลับแห้ง

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองในครั้งนี้ ทำให้ทราบข้อมูลบางอย่างเพื่อนำไปปรับปรุงงานทดลองครั้งต่อไป จึงเสนอแนะไว้ดังนี้เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ ดังนี้

1. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดูดซับชีวภาพชนิดอื่นมาทำการทดลองเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ที่ดีที่สุดต่อไป
2. ควรศึกษาปัจจัยอื่นๆ เช่น อัตราการระเหยของฟอर्मัลดีไฮด์ ที่ส่งผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสีย
3. ควรมีการประยุกต์การบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ด้วยตัวดูดซับกกกมลร่วมกับการปลูกต้นกกกมลตามระบบบำบัดน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ในอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำทิ้ง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

จเร สดากร. 2538. กกกกลม. **ข่าวกองพลเกษตรและวัชพืช**. 8(3): 11-14.

จันทวรรณ วรรณพงษ์. 2539. การบำบัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และ แมกนีเซียมในน้ำเสียชุมชนเมืองเพชรบุรี โดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืช. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร. 2548. การศึกษาแบคทีเรียรอบรากพืชรักษา ธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ ปริญญา โท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทาง เคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พงษ์ศักดิ์ ศรีเจริญ. 2544. การเปลี่ยนแปลงของแมงกานีส และเหล็กในดิน จากระบบบำบัดน้ำเสีย เทศบาลเมืองเพชรบุรีโดยการซึมผ่านแปลงหญ้าต่างชนิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

ไพบูลย์ ประพาศธรรม. 2528. **เคมีของดิน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550. **วัชพืชและการ จัดการ**. แหล่งที่มา: www.natres.psu.ac.th, 28 มีนาคม 255.

ภาวสุระ ลิ้มปัสวาศดิ์. 2545. ประสิทธิภาพและคุณภาพน้ำใต้ผิวดินในแปลงทดลองบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้หญ้ากรอง บริเวณแหลมผักเบี้ย จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลักขณิ คณานินันท์. 2539. ประสิทธิภาพของกกกลม *Cyperus corymbosus* ฐปญาธิ *Tphy angustifolia* อ้อ *Phragmites australis* และแห้วกระเทียม *Elrocharis dulcis* ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สิทธิชัย ดันธนะสฤยดี. 2538. การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุจินต์ พนาปวุฒิกุล. 2539. การบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรม โดยใช้ต้นอ้อหรือต้นกก (Reed-Bed) ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน. เดอะกรีนเพื่อสิ่งแวดล้อม 3(26): 76-84.

สุชาดา ศรีเพ็ญ, สายันท์ ทัดศรี, จันทนา สุขปรีดิ์, สุรพงษ์ สวัสดิ์พานิช, สุมน พาสุชน และ สมบัติ ชินะวงศ์. 2537. การคัดเลือกสายพันธุ์พืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยวิธี Grass filtration. เอกสารประกอบการบรรยายหมายเลข 7, น. 1-7. ในการประชุมเชิงปฏิบัติการ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ณ โรงแรมริเจนท์ ซะอ่า อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา วันที่ 2-3 พฤษภาคม 2537. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. 2535. เทคโนโลยีการทำผลิตภัณฑ์จากกก. กองส่งเสริมเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.

Buddhawong, S. 1996. Efficiency of *Cyperus corymbosus* and *Elrocharis dulcis* in Constructed Wetland for Municiple Wastewater Treatment. M.S. thesis, Chulalongkorn University.

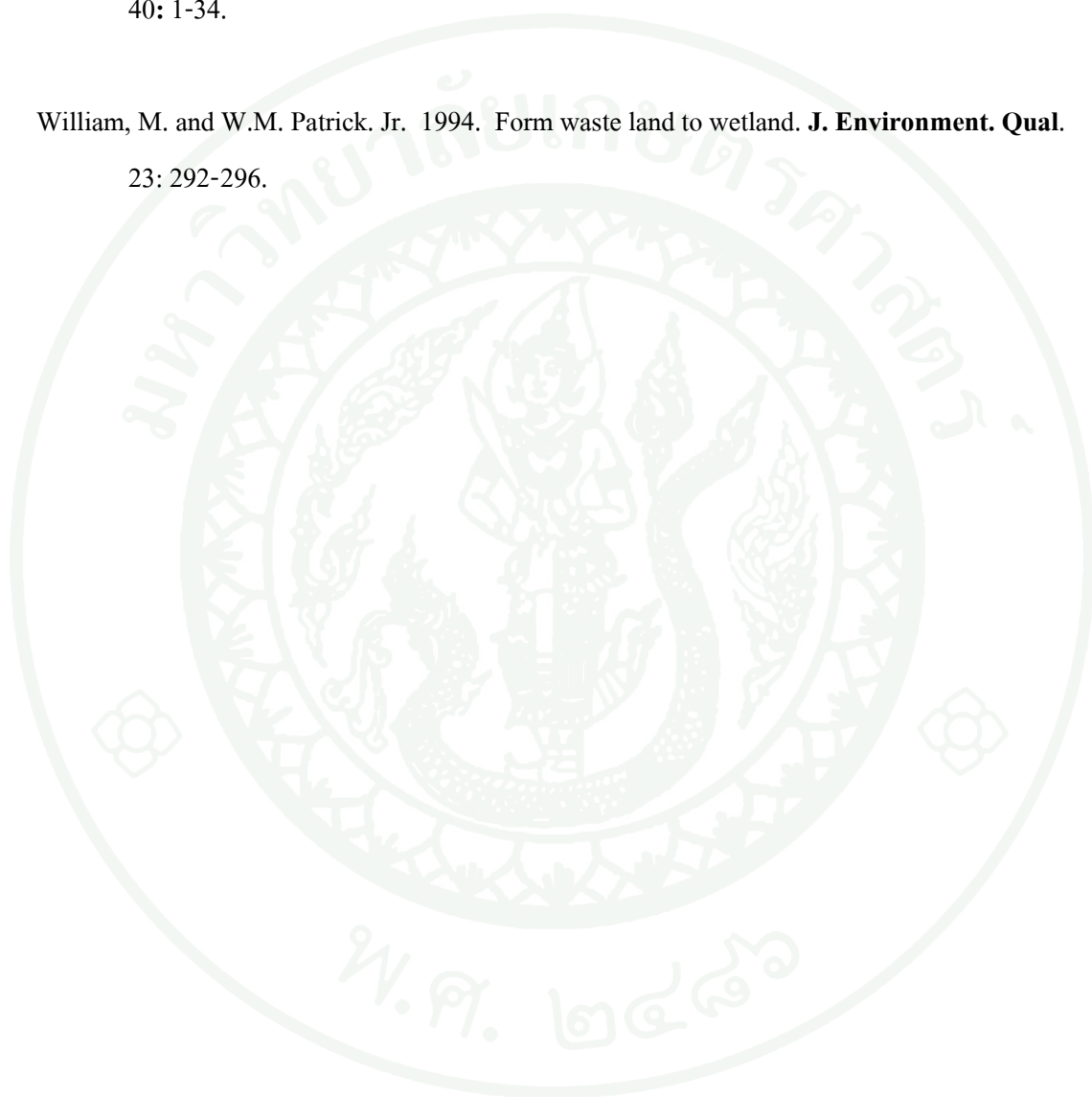
Cowadin, L.M., V. Carter, F.C. Golet and E.T. Laroe. 1979. Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C.

- Environmental and Occupational Health and Safety Services. 2004. **Formaldehyde**.
University of Medicine & Dentistry, New Jersey. (Mimeographed)
- Garrido, J.M. 2000. **Treatment of Wastewater from a Formaldehyde-urea Adhesives Factory**.
Department of Chemical Engineering, University of Santiago de Compostela, Spain.
- Hammer, D.A. and R.K. Bastian. 1989. **Wetland ecosystem: Natural water purifier**, pp. 5-19.
In D.A. Hammer (ed). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Lewis Publish,
Inc., Michigan.
- Harada, T., H. Hashimoto and T. Yoshizawa. 1995. The relationship between readily decomposable
organic matter of paddy soil and its colloidal complexes. *Soil and Plant Food* 1: 46-50.
- Kadlac, J.A. 1962. Effect of a drawdown on a waterflow impoundment. **Ecol.** 43: 267-281.
- McLaughlin J.K. 1994. Formaldehyde and cancer: a critical review. **International Archives of
Occupation and Environmental Health.** 66(5): 295-301
- Minnesota Department of Health Fact Sheet. 2005. **Formaldehyde Facts**. The Minnesota
Department of Health Indoor Air Unit, Minnesota. (Mimeographed)
- Office of Environmental Health Hazard Assessment. 2007. **Chronic Toxicity Summary
Formaldehyde**. Office of Environmental Health Hazard Assessment, California.
(Mimeographed)
- Reddy, K.R. and W.M. Patrick, Jr. 1993. Wetland soil opportunities and Challenges. **Soil
SciSoc.Am.J.** 57: 1145-1147.
- Toxicology Use Reproduction Institute. n.d. **Formaldehyde Toxicology Use Reproduction Institute**.
Washington, D.C. (Mimeographed)

United Nation Environmental Program. 2002. Formaldehyde. **SIDS Initial Assessment Report For SIAM**. 14: 1-71.

World Health Organization. 2002. **Concise International Chemical Assessment Document** 40: 1-34.

William, M. and W.M. Patrick. Jr. 1994. Form waste land to wetland. **J. Environment. Qual.** 23: 292-296.





ตารางผนวกที่ 1 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับกกกลมตากแห้งที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของ
ฟอร์มาลดีไฮด์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.600	0.700	0.680	0.660	12.820
2	0.070	0.066	0.068	0.068	12.820
3	0.064	0.074	0.064	0.067	14.100
4	0.068	0.067	0.064	0.066	15.380
5	0.067	0.066	0.064	0.066	16.660
6	0.060	0.048	0.055	0.054	30.760
7	0.048	0.060	0.055	0.054	30.760

ตารางผนวกที่ 2 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับถ่านกกกลมที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มาลดีไฮด์

ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
1	0.094	0.093	0.075	0.087	18.410
2	0.080	0.088	0.096	0.088	17.750
3	0.093	0.087	0.086	0.088	17.750
4	0.085	0.087	0.080	0.084	21.490
5	0.084	0.086	0.067	0.073	31.780
6	0.065	0.098	0.071	0.078	27.100
7	0.066	0.095	0.075	0.078	27.100

ตารางผนวกที่ 3 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของ
กกกลมตากแห้ง

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
15	0.040	0.030	0.040	0.037	10.00
30	0.030	0.040	0.030	0.033	29.50
45	0.030	0.040	0.020	0.030	31.50
60	0.030	0.030	0.030	0.030	30.10

ตารางผนวกที่ 4 อิทธิพลของระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มัลดีไฮด์ของ
ถ่านกกกลม

ระยะเวลาสัมผัส (นาทีก)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
15	0.040	0.030	0.030	0.033	17.500
30	0.030	0.030	0.040	0.033	30.800
45	0.020	0.030	0.020	0.027	32.500
60	0.030	0.030	0.030	0.030	25.000

ตารางผนวกที่ 5 อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มาลดีไฮด์ของกกกลมตากแห้ง

ความเข้มข้นสารละลาย ฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	0.029	0.024	0.033	0.029	28.33
20	0.051	0.060	0.049	0.053	33.33
30	0.07	0.077	0.075	0.074	17.778
40	0.089	0.083	0.087	0.086	13.667
50	0.100	0.100	0.099	0.100	9.394

ตารางผนวกที่ 6 อิทธิพลของความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับของฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม

ความเข้มข้นสารละลาย ฟอร์มาลดีไฮด์ (ppm)	ค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร			ค่าเฉลี่ย	ร้อยละ การดูดซับ
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
10	0.023	0.024	0.028	0.025	37.500
20	0.051	0.051	0.046	0.049	38.333
30	0.069	0.071	0.073	0.071	21.111
40	0.084	0.083	0.087	0.085	15.333
50	0.100	0.097	0.099	0.099	10.303

ตารางผนวกที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของกกกลมตากแห้ง

ปริมาณ กกกลมตากแห้ง (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	logC	logq
1	20	2.794	0.1	1.721	0.358	0.581	0.4462	0.2357
2	20	2.794	0.1	0.860	0.358	1.162	0.4462	-0.0654
3	20	2.769	0.1	0.574	0.361	1.741	0.4423	-0.2408
4	20	2.743	0.1	0.431	0.365	2.318	0.4382	-0.3651
5	20	2.717	0.1	0.346	0.368	2.893	0.4341	-0.4614
6	20	2.435	0.1	0.293	0.411	3.416	0.3865	-0.5335
7	20	2.435	0.1	0.251	0.411	3.985	0.3865	-0.6004

ตารางผนวกที่ 8 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของถ่านกกกลม

ปริมาณ ถ่านกกกลม (กรัม)	C_0	C	V (ลิตร)	q	1/c	1/q	logC	logq
1	20	3.282	0.1	1.672	0.305	0.598	0.5161	0.2232
2	20	3.308	0.1	0.835	0.302	1.198	0.5195	-0.0785
3	20	3.308	0.1	0.556	0.302	1.797	0.5195	-0.2546
4	20	3.205	0.1	0.420	0.312	2.382	0.5058	-0.3769
5	20	2.923	0.1	0.342	0.342	2.928	0.4658	-0.4666
6	20	3.051	0.1	0.282	0.328	3.540	0.4845	-0.5490
7	20	3.051	0.1	0.242	0.328	4.130	0.4845	-0.6160

ตารางผนวกที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์
ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 กรัม โดยการทดลองการไหล
แบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	98.18	97.75	98.21	98.047
100	98.24	96.87	98.69	97.933
150	98.56	97.48	95.55	97.197
200	98.62	97.02	95	96.880

ตารางผนวกที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์
ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 20 กรัม โดยการทดลองการไหล
แบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	99.3	98.52	86.3	94.707
100	99.3	98.52	87.67	95.163
150	99.3	98.82	80.82	92.980
200	99.53	97.94	73.45	90.307

ตารางผนวกที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 30 กรัม โดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	95.67	95.92	95.50	95.694
100	95.00	95.00	95.33	95.111
150	94.75	94.83	94.92	94.833
200	94.17	94.50	94.83	94.500

ตารางผนวกที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 40 กรัม โดยการทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	95.250	95.500	95.833	95.528
100	94.417	94.583	94.000	94.333
150	94.000	93.750	93.750	93.833
200	93.750	92.917	92.917	93.194

ตารางผนวกที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์
ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 50 กรัม โดยการทดลองการไหล
แบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	98.46	95.33	95	96.263
100	97.13	95.23	94.66	95.673
150	97.9	94.9	94.46	95.753
200	97.56	94.44	93.56	95.187

ตารางผนวกที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์กับปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์
ที่ไหลผ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 60 กรัม โดยการทดลองการไหล
แบบต่อเนื่อง

ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)	ร้อยละการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
50	98.46	96.43	95.13	96.673
100	98.23	96.1	94.23	96.187
150	97.8	94.67	93.9	95.457
200	97.23	94.33	93.9	95.153

ตารางผนวกที่ 15 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอรั่มลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 10 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์ (มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	0.007	0.009	0.007	0.003	0.009	0.01	0.015	0.013	0.005	0.017	0.023	0.028
2	0.006	0.008	0.012	0.011	0.007	0.014	0.014	0.01	0.007	0.01	0.027	0.025
3	0.009	0.006	0.009	0.015	0.017	0.013	0.015	0.023	0.01	0.004	0.025	0.031
ค่าเฉลี่ย	0.0073	0.0076	0.0093	0.096	0.011	0.0123	0.0146	0.0153	0.0073	0.01	0.025	0.028
ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์	98.62	98.56	98.24	98.18	97.75	97.48	97.02	96.87	98.69	98.21	95.55	95
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	98.4				97.28				96.8625			

ตารางผนวกที่ 16 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอร์มาลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 20 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์			
	ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์			
	(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	99.53	0	0.003	0.005	0.001	0.007	0.002	0.01	0.014	0.01	0.017	0.01
2	0.002	0.004	0.002	0.002	0.006	0.004	0.007	0.004	0.005	0.009	0.015	0.017
3	0.003	0.006	0.003	0.002	0.006	0.004	0.008	0.007	0.01	0.011	0.01	0.018
ค่าเฉลี่ย	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.007	0.009	0.01	0.014	0.015
ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์	99.53	99.3	99.3	99.3	98.82	98.52	98.52	97.94	87.67	86.3	80.82	73.45
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	99.3575				98.45				82.06			

ตารางผนวกที่ 17 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอร์มาลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1กรัมต่อ 30 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์			
	ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์			
	(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	0.018	0.019	0.025	0.024	0.015	0.02	0.024	0.025	0.018	0.019	0.022	0.027
2	0.022	0.017	0.018	0.02	0.02	0.017	0.018	0.019	0.02	0.018	0.019	0.019
3	0.014	0.02	0.018	0.018	0.014	0.023	0.02	0.022	0.014	0.023	0.022	0.024
ค่าเฉลี่ย	0.018	0.019	0.020	0.021	0.016	0.020	0.021	0.022	0.017	0.020	0.021	0.023
ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์	95.50	95.33	94.92	94.83	95.92	95.00	94.83	94.50	95.67	95.00	94.75	94.17
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	95.146				95.063				94.896			

ตารางผนวกที่ 18 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอรั่มลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 40 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

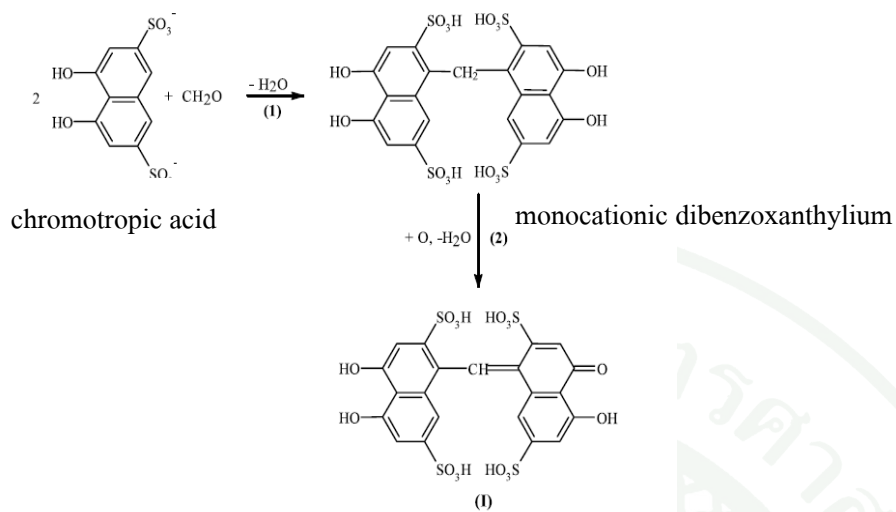
ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์			
	ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ที่ไหลผ่านคอลัมน์			
	(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	0.019	0.024	0.021	0.028	0.016	0.025	0.021	0.028	0.016	0.025	0.021	0.028
2	0.021	0.022	0.026	0.02	0.021	0.022	0.026	0.03	0.017	0.022	0.026	0.03
3	0.017	0.021	0.025	0.027	0.017	0.018	0.028	0.027	0.017	0.025	0.028	0.027
ค่าเฉลี่ย	0.019	0.022	0.024	0.025	0.018	0.022	0.025	0.028	0.017	0.024	0.025	0.028
ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์	95.250	94.417	94.000	93.750	95.500	94.583	93.750	92.917	95.833	94.000	93.750	92.917
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	94.354				94.188				94.125			

ตารางผนวกที่ 19 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอรั่มลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 50 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์			
	(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	0.005	0.005	0.007	0.01	0.019	0.015	0.009	0.018	0.015	0.016	0.015	0.025
2	0.005	0.007	0.006	0.009	0.013	0.011	0.016	0.015	0.017	0.015	0.018	0.013
3	0.004	0.006	0.009	0.007	0.01	0.017	0.021	0.017	0.013	0.017	0.017	0.02
ค่าเฉลี่ย	0.0046	0.0063	0.0073	0.0086	0.014	0.0143	0.0153	0.0167	0.015	0.016	0.0166	0.0193
ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์	98.46	97.9	97.56	97.13	95.33	95.23	94.9	94.44	95	94.66	94.46	93.56
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	97.7625				94.975				94.42			

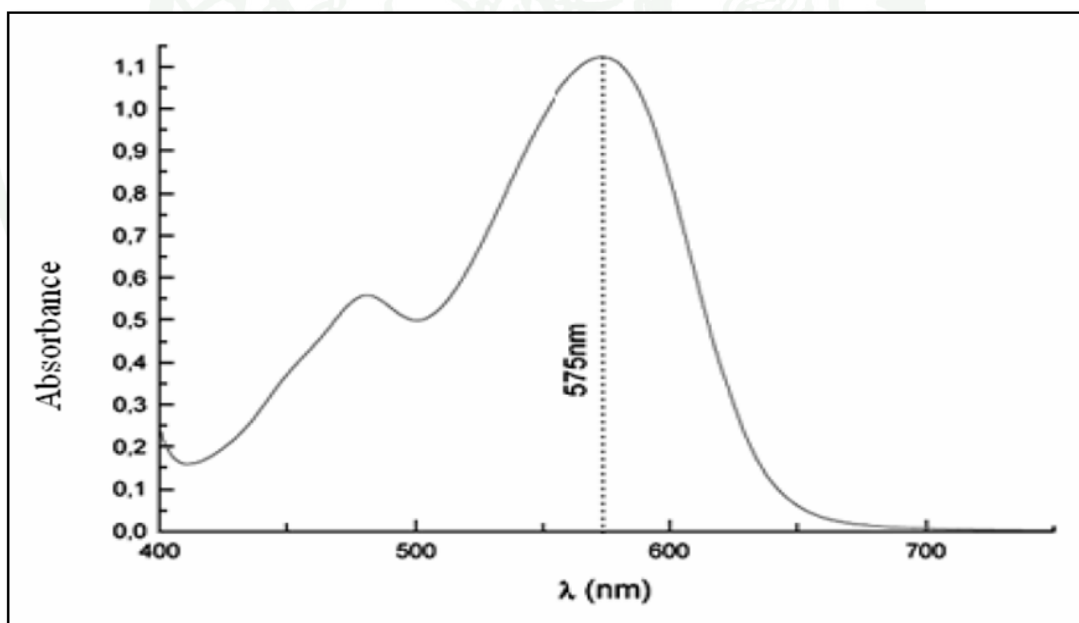
ตารางผนวกที่ 20 อิทธิพลรอบการบำบัด ปริมาตรฟอรั่มลดีไฮด์ และร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ที่ไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1 กรัมต่อ 60 กรัม โดยทดลองการไหลแบบต่อเนื่อง

ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 575 นาโนเมตร											
	บำบัดครั้งที่ 1				บำบัดครั้งที่ 2				บำบัดครั้งที่ 3			
	ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์				ปริมาตรสารละลายฟอรั่มลดีไฮด์ ที่ไหลผ่านคอลัมน์			
	(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)				(มิลลิลิตร)			
	50	100	150	200	50	100	150	200	50	100	150	200
1	0.003	0.003	0.004	0.01	0.012	0.016	0.018	0.013	0.01	0.016	0.017	0.02
2	0.007	0.005	0.008	0.002	0.011	0.019	0.014	0.021	0.015	0.018	0.021	0.016
3	0.004	0.008	0.008	0.013	0.009	0.015	0.016	0.017	0.015	0.018	0.017	0.019
ค่าเฉลี่ย	0.0046	0.0053	0.066	0.0083	0.0107	0.012	0.016	0.017	0.0146	0.0173	0.0183	0.0183
ร้อยละการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์	98.46	98.23	97.8	97.23	96.43	96.1	94.67	94.33	95.13	94.23	93.9	93.9
ค่าเฉลี่ยร้อยละ	97.93				95.3825				94.29			

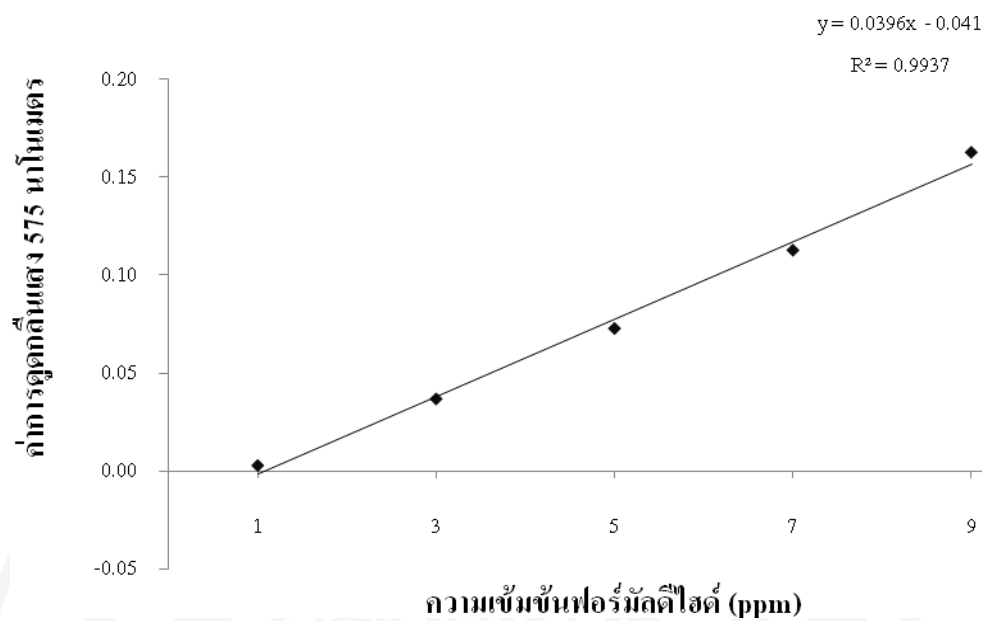


สีม่วง

ภาพผนวกที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาฟอร์มัลดีไฮด์



ภาพผนวกที่ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร



ภาพผนวกที่ 3 กราฟมาตรฐานสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสายรุ้ง กุญเมืองคำ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 5 กันยายน 2530
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลแม่และเด็ก จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอัน เนื่องมาจากพระราชดำริ เพชรบุรี