



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกกกลม  
และถ่านธูปถายี ร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม  
Treatment of Formaldehyde in Synthetic Wastewater by Adsorption on  
*Cyperus corymbosus* Rottb. Charcoal and *Typha angustifolia* Linn. Charcoal  
in Combination with Grass Filtration and Constructed Wetland System

นามผู้วิจัย นายวัชรพงษ์ วาระรัมย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( รองศาสตราจารย์ศศิตา ตั้งคณานุรักษ์, วท.ม. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์สมชาย เอื้อพิพัฒน์กุล, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ บัวเลิศ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ริระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

สิงสีทงิ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกกกลมและถ่านรูปถายี  
ร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

Treatment of Formaldehyde in Synthetic Wastewater by Adsorption on  
*Cyperus corymbosus* Rottb. Charcoal and *Typha angustifolia* Linn. Charcoal  
in Combination with Grass Filtration and Constructed Wetland System

โดย

นายวัชรพงษ์ วาระรัมย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

วัชรพงษ์ วาระรัมย์ 2557: การบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการดูดซับด้วยถ่านกกกลม และถ่านรูปถาญี ร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ปรินญาปรัชญาคุณฎีบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์นิพนธ์ ดังคณาญักษ์, Ph.D. 167 หน้า

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ต้องการพัฒนาระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 20 มก./ล. โดยใช้ถ่านชีวภาพ 3 ชนิด คือ ถ่านกกกลม ถ่านรูปถาญี และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ เป็นตัวดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ ถ่านกกกลม และถ่านรูปถาญี เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ พบว่า มีพื้นที่ผิว น้อยกว่า คือ 17 และ 15 ม<sup>2</sup>/ก. ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนที่มากกว่า คือ 2.41 และ 2.16 ซม<sup>3</sup>/ก. ตามลำดับ และขนาดรูพรุน ที่ใหญ่กว่า คือ 56.34 และ 55.70 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ฟอर्मัลดีไฮด์ใช้วิธีสเปกโทรโฟโตเมตริก ด้วยกรดโครโมโทรปิก การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ขั้นที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และ ไอโซเทอร์มการดูดซับ ของถ่านทั้งสามชนิด ด้วยการทดลองแบบเบคต์ พบว่า ในสภาวะที่เหมาะสม (เฟือช 5 ระยะเวลา บั่นกวน ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ความเร็วรอบในการบั่นกวน 100 รอบ/นาที ยกเว้นของถ่านรูปถาญี 50 รอบ/นาที) ถ่านกกกลม ถ่านรูปถาญี และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ สามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้เท่ากับ 1.35, 0.73 และ 0.43 มก. ตามลำดับ กลไกการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม และถ่านรูปถาญีอธิบายได้ทั้งไอโซเทอร์มของ แลงเมียร์และฟรุนดลิช ในขณะที่การดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับไอโซเทอร์ม ของฟรุนดลิชเพียงอย่างเดียว ขั้นที่ 2 การทดลองแบบไหลต่อเนื่องเพื่อหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิด กับดิน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ และเคอร์ฟเบรคทูล์จ พบว่า ที่อัตราส่วน 1:50 เป็นอัตราส่วนที่ เหมาะสมของถ่านทั้งสามชนิด ซึ่งสามารถกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้สูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 95.04, 93.31 และ 94.17 ตามลำดับ จากเคอร์ฟเบรคทูล์จ ที่อัตราการไหล 10 มล./นาทีของถ่านแต่ละชนิด พบว่า จุดเริ่มหมดสภาพ เท่ากับ 300, 200 และ 100 มล. ตามลำดับ และจุดหมดสภาพ เท่ากับ 2,950, 1,200 และ 1,100 มล. ตามลำดับ ดังนั้นถ่านกกกลมเป็นตัวดูดซับ ฟอर्मัลดีไฮด์ที่ดีกว่าถ่านอีกสองชนิด ขั้นตอนสุดท้าย ทำการทดลองโดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก เลียนแบบระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ โดยหน่วยทดลองมีการ เปรียบเทียบชนิดของพืชที่ใช้น้ำบาด (ต้นกกกลม และต้นรูปถาญี) และวัสดุปลูก (ถ่านกกกลมผสมดิน และดินอย่างเดียว) พบว่า หน่วยทดลองของระบบบำบัดทั้ง 2 แบบ ที่ใช้ถ่านกกกลมผสมดิน และปลูกต้นกกกลม มีประสิทธิภาพใน การกำจัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้สูงสุดในสัปดาห์ที่ 1 เท่ากับร้อยละ 99.53 สำหรับระบบหญ้ากรองน้ำเสีย และร้อยละ 95.06 สำหรับระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่อัตราการไหล 100 มล./นาที นอกจากนี้ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พบจุดเริ่มหมดสภาพ เท่ากับ 20 ล. พบจุลินทรีย์ *Pseudomonas* spp. จำนวนมากในดินรอบรากพืช และไม่พบการระเหยของฟอर्मัลดีไฮด์ ดังนั้นการพัฒนาระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีศักยภาพสามารถ พิจารณานำไปใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีฟอर्मัลดีไฮด์ปนเปื้อนต่อไปได้

Watcharapong Wararam 2014: Treatment of Formaldehyde in Synthetic Wastewater by Adsorption on *Cyperus corymbosus* Rottb. Charcoal and *Typha angustifolia* Linn. Charcoal in Combination with Grass Filtration and Constructed Wetland System. Doctor of Philosophy (Environmental Science), Major Field: Environmental Science, Department of Environmental Science.  
Thesis Advisor: Associate Professor Nipon Tungkananuruk, Ph.D. 167 pages.

The purpose of this research was to develop the grass filtration (GF) and constructed wetland (CW) system for enhancing the removal efficiency of formaldehyde (FM) in synthetic wastewater at concentration of 20 mg/L. The three biocharcoals from *Cyperus corymbosus* Rottb. charcoal (C-char), *Typha angustifolia* Linn. charcoal (T-char) and commercial coconut shell charcoal (Co-char) were conducted to FM adsorbents. The analysis results of physical characteristics when compare with Co-char were found that C-char and T-char had a lower surface area of 17 and 15 m<sup>2</sup>/g respectively, a higher total pore volume of 2.41 and 2.16 cm<sup>3</sup>/g respectively and a higher pore size of 56.34 and 55.70 Å respectively. The procedure for FM analysis was the chromotropic acid spectrophotometric method. The experiments were divided into 3 steps. The first step was to investigate the suitable adsorption condition and the adsorption isotherm of these three biocharcoals by batch experiments. The results revealed that at the same condition (pH 5, agitation time and contact time of 30 min and agitation speed of 100 rpm with exception of T-char at 50 rpm) the FM removal achieved for C-char, T-char and Co-char were 1.35, 0.73 and 0.43 mg respectively. The adsorption mechanism of FM onto C-char and T-char were described by both the Langmuir and Freundlich isotherms while FM adsorption on Co-char satisfied only the Freundlich isotherm model. The second step, the continuous experiments were performed to find out the ratio by weight of each biochar to soil which effecting on efficiency of FM removal and breakthrough curves. The results showed that the ratio at 1:50 was the suitable condition for these three biochars which the maximum FM removal at 95.04, 93.31 and 94.17% respectively were achieved. From breakthrough curves at flow rate of 10 mL/min of each biochar the breakthrough points were 300, 200 and 100 mL respectively and the exhaustion points were 2,950, 1,200 and 1,100 mL respectively. Therefore, the C-char was the better FM adsorbent than the another two biochars. The final step, the filtrated lysimeter technique was employed by simulating the GF and CW system of LERD-project. The comparative experiment units were the type of treatment plants (*Cyperus corymbosus* Rottb. and *Typha angustifolia* Linn.) and growing materials (mixed C-char and soil and soil only). The results revealed that the experimental units of two systems which using mixed C-char and soil and growing *Cyperus* had the highest FM removal efficiency at 99.53% in the first week of GF and 95.06% of CW at flow rate of 100 mL/min. Furthermore, CW was found that breakthrough point was 20 L, also found a lot of *Pseudomonas* spp. in rhizosphere and no vaporization of FM. Therefore, the developed GF and CW system from this study could be considered as a potential FM treatment system for the treatment of industrial wastewater which contaminate with FM.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature



## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความกรุณาทางวิชาการของ รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์ และอาจารย์ ดร.สมชาย เอื้อพิพัฒนานุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ แก่วิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องทางวิชาการและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์อิทธิพล ราศรีเกรียงไกร ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และ พันเอกพิเศษรองศาสตราจารย์ ดร.สมปอง วรรณโคตร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์แก่วิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องตามหลักวิชาการยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เกษม จันทร์แก้ว ผู้อำนวยการโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนา สิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าเข้ามาทำงานในตำแหน่ง นักวิชาการสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการปฏิบัติงานท่านได้มอบความรู้และเพิ่มพูนประสบการณ์วิชาชีพ ทางด้านสิ่งแวดล้อมให้แก่ข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้ความสามารถในวิชาชีพนี้เป็นอย่างดี และ ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณท่านในฐานะผู้อนุมัติทุนวิจัยร่วมกับผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ ผิวนิล เลขานุการโครงการฯ ที่พิจารณาอนุมัติทุนวิจัยให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่โครงการแหลมผักเบี้ยฯ ทุกท่าน ทั้งเจ้าหน้าที่สำนักงาน เพชรบุรีและเจ้าหน้าที่สำนักงานส่วนกลางกรุงเทพฯ ที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือ ส่งผลให้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ขอมอบคุณความดีและประโยชน์ อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แด่คุณพ่อสำเร็จ วาระรัมย์ คุณแม่รัชณี วาระรัมย์ รวมถึงญาติพี่น้อง ทุกท่านที่เข้าใจและได้ให้กำลังใจอันดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

วัชรพงษ์ วาระรัมย์

มิถุนายน 2557

## สารบัญ

## หน้า

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| สารบัญ                     | (1) |
| สารบัญตาราง                | (2) |
| สารบัญภาพ                  | (5) |
| คำนำ                       | 1   |
| วัตถุประสงค์               | 3   |
| การตรวจเอกสาร              | 4   |
| อุปกรณ์และวิธีการ          | 95  |
| อุปกรณ์                    | 95  |
| วิธีการ                    | 97  |
| ผลและวิจารณ์               | 104 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ          | 134 |
| สรุป                       | 134 |
| ข้อเสนอแนะ                 | 135 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง       | 136 |
| ภาคผนวก                    | 146 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 167 |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                                                                         | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่รากพืชปลดปล่อยออกมา                                                                                | 74   |
| 2 การกระจายตัวของจุลินทรีย์ในดินที่ระดับความลึกต่างๆ                                                                             | 76   |
| 3 การจำแนกแบคทีเรียโดยอาศัยความแตกต่างของแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน                                                             | 79   |
| 4 ลำดับการใช้สารเป็นตัวรับอิเล็กตรอนของแบคทีเรีย                                                                                 | 80   |
| 5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนของถ่านด้วยวิธี BET                                                 | 106  |
| 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกกกลมผสมดินและความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์<br>ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด                          | 117  |
| 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกกกลมผสมดินและประสิทธิภาพการบำบัด<br>ฟอร์มาลดีไฮด์                                             | 118  |
| 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านรูปถั่วฝัสดินและความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์<br>ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด                        | 119  |
| 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านรูปถั่วฝัสดินและประสิทธิภาพการบำบัด<br>ฟอร์มาลดีไฮด์                                           | 119  |
| 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดิน<br>และความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด        | 120  |
| 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดิน<br>และประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์                           | 120  |
| 12 ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่จุดตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพและหมดสภาพ<br>ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที่ | 122  |
| 13 ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองของการบำบัดแบบห่อกรองน้ำเสีย                                                           | 124  |
| 14 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ ในหน่วยทดลองของการบำบัด<br>แบบห่อกรองน้ำเสีย                                                 | 125  |
| 15 ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่จุดตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพของหน่วยทดลอง                                                           | 130  |
| 16 จำนวนต้นพืชและมวลชีวภาพของพืชในหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม<br>และรูปถั่วฝักที่อัตราการไหลต่างกัน                                | 131  |
| 17 ปริมาณจุลินทรีย์กลุ่ม <i>Pseudomonas</i> spp. ที่พบในดินบริเวณรอบรากพืช<br>ของหน่วยทดลอง                                      | 132  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                     | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 ปริมาณถ่านกกกลมต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์                                                                       | 147  |
| 2 ปริมาณถ่านรูปถากีต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์                                                                     | 147  |
| 3 ปริมาณถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์                                                      | 148  |
| 4 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม                                         | 148  |
| 5 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถากี                                       | 149  |
| 6 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่าน<br>กะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์                    | 149  |
| 7 ความเร็วรอบในการปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม                                                  | 149  |
| 8 ความเร็วรอบในการปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถากี                                                | 150  |
| 9 ความเร็วรอบในการปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าว<br>เชิงพาณิชย์                             | 150  |
| 10 ระยะเวลาปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม                                                         | 151  |
| 11 ระยะเวลาปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถากี                                                       | 151  |
| 12 ระยะเวลาปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์                                        | 152  |
| 13 ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม                                                           | 152  |
| 14 ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถากี                                                         | 152  |
| 15 ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์                                          | 153  |
| 16 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์<br>ของถ่านกกกลม                  | 153  |
| 17 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์<br>ของถ่านรูปถากี                | 154  |
| 18 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์<br>ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ | 154  |
| 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม                                                                  | 155  |
| 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถากี                                                                | 155  |
| 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์                                                 | 156  |



## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่                                                                                                                             | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 22 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านแต่ละชนิดผสมดิน (1:50) และดิน<br>ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที่ กับความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ | 156  |
| 23 ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดิน<br>และปลุกต้นกกกลม ของการบำบัดแบบหุ้มกรองน้ำเสีย                   | 159  |
| 24 ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดิน<br>และปลุกต้นรูปถาวยี ของการบำบัดแบบหุ้มกรองน้ำเสีย                | 159  |
| 25 ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินและปลุกต้นกกกลม<br>ของการบำบัดแบบหุ้มกรองน้ำเสีย                                | 160  |
| 26 ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินและปลุกต้นรูปถาวยี<br>ของการบำบัดแบบหุ้มกรองน้ำเสีย                             | 160  |
| 27 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลุกพีช<br>ด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่                             | 161  |
| 28 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลุกพีช<br>ด้วยอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่                             | 163  |
| 29 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลุกพีช<br>ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่                             | 165  |

## สารบัญภาพ

| ภาพที่                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1    กลุ่มจุลินทรีย์ <i>Pseudomonas putida</i> และ <i>Pseudomonas cepacia</i> ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายพอร์มัลดีไฮด์แบบใช้ออกซิเจน (ภาพขยายขนาด 16x40)                                                                                                                                                                                                                       | 10   |
| 2    กลุ่มจุลินทรีย์ <i>P. putida</i> , <i>P. cepacia</i> และ <i>T. penicillatum</i> ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นแล้วจับตัวเป็นก้อนจากการย่อยสลายพอร์มัลดีไฮด์แบบใช้ออกซิเจน (ภาพขยายขนาด 16x40)                                                                                                                                                                                              | 10   |
| 3    A : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด <i>Hansemula polymorfa</i><br>B : กลไกการย่อยสลายเมทานอล และ พอร์มัลดีไฮด์ ของ <i>Hansemula polymorfa</i> (เอนไซม์ที่ใช้ 1-alcohol oxidase, 2-catalase, 3-dihydroxyacetone synthase, 4-formaldehyde dehydrogenase, 5-formate dehydrogenase, 6-dihydroxyacetone kinase, 7-GSH-glutathione, Xu5P-xylulose-5-phosphate, FBP-fructose-1,6-bisphosphate) | 11   |
| 4    A : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด <i>Pseudomonas pseudoalcaligenes</i><br>B : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด <i>Methylobacterium extorquens</i>                                                                                                                                                                                                                                              | 12   |
| 5    ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 19   |
| 6    แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 21   |
| 7    แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 21   |
| 8    แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 22   |
| 9    การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 23   |
| 10   การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 24   |
| 11   การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 27   |
| 12   ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 30   |
| 13   กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log q และ log C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 32   |
| 14   ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรอนดิช                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 33   |
| 15   แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว                                                                                                                                                                                                                                                                            | 33   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ |                                                                                      | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 16     | การดูดซับของแสงเมียร์เมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิมตัว                              | 34   |
| 17     | ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแสงเมียร์                                           | 35   |
| 18     | แสดงการดูดซับแก๊สในโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ                             | 37   |
| 19     | แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ                                 | 38   |
| 20     | แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์               | 39   |
| 21     | แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและ ปริมาตรรูพรุน                            | 41   |
| 22     | ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM                                                  | 42   |
| 23     | สัญญาณที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนชนกับชิ้นตัวอย่าง                                    | 44   |
| 24     | โครงสร้างภายในและภายนอกของระบบหญากรองน้ำเสีย<br>และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม           | 49   |
| 25     | พืชที่ในระบบที่ลุ่มชื้นแฉะ สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงที่ระบบบราก<br>ในสภาวะที่ไร้อากาศ | 57   |
| 26     | ลักษณะของต้นกกกลม <i>Cyperus corymbosus</i> Rottb.                                   | 58   |
| 27     | ลักษณะของกกในแบบชนิดอื่นๆ                                                            | 59   |
| 28     | ลักษณะต้นและดอกกก                                                                    | 60   |
| 29     | กกคมบาง                                                                              | 61   |
| 30     | ลักษณะลำต้นและดอกกกขนาก                                                              | 62   |
| 31     | ลักษณะลำต้นและดอกกกทราย                                                              | 62   |
| 32     | ลักษณะกกในตระกูล Fimbristylis                                                        | 63   |
| 33     | ลักษณะกกลังกา                                                                        | 64   |
| 34     | รูปถ่าย <i>Typha angustifolia</i> Linn.                                              | 66   |
| 35     | อาณาบริเวณระบบนิเวศบรากพืช                                                           | 71   |
| 36     | ขนราก                                                                                | 72   |
| 37     | การยึดเกาะของแบคทีเรียบนอนุภาคดิน                                                    | 77   |
| 38     | วัฏจักรของไนโตรเจน                                                                   | 86   |
| 39     | วัฏจักรของซัลเฟอร์                                                                   | 86   |
| 40     | สมดุลมวลสารของระบบบำบัดน้ำเสียแบบหญากรองน้ำเสีย                                      | 91   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                                                                                                                               | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 41 การขนถ่ายออกซิเจนของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำโดยอาศัยระบบราก                                                                                                                                                                            | 92   |
| 42 เตาเผาถ่านแบบถัง ขนาดความจุ 200 ลิตร                                                                                                                                                                                              | 96   |
| 43 ลำดับขั้นตอนการบรรจุวัสดุลงในคอลัมน์โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบหญ้ากรองน้ำเสีย                                                                                                                                                        | 101  |
| 44 ลำดับขั้นตอนและวัสดุที่บรรจุในหน่วยทดลองของระบบหญ้ากรองน้ำเสีย และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม                                                                                                                                         | 102  |
| 45 หน่วยทดลองของระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม                                                                                                                                                                        | 103  |
| 46 ลักษณะของกกกลมและถ่านกกกลม (ก) รูปถ่ายและถ่านรูปถ่าย (ข) กะลามะพร้าว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (ค)                                                                                                                            | 104  |
| 47 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกกกลม (ก) ถ่านรูปถ่าย (ข) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (ค) โดยใช้เครื่อง SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า                                                                                                            | 105  |
| 48 กราฟมาตรฐานฟอรั่มลดีไฮด์                                                                                                                                                                                                          | 107  |
| 49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอรั่มลดีไฮด์ที่ถูกดูดซับกับปริมาณของถ่าน 3 ชนิด                                                                                                                                                         | 108  |
| 50 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่าน 3 ชนิด                                                                                                                  | 109  |
| 51 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับความเร็วรอบในการปั่นกววน ของถ่านทั้ง 3 ชนิด                                                                                                              | 110  |
| 52 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับระยะเวลาปั่นกววน ของถ่านทั้ง 3 ชนิด                                                                                                                      | 111  |
| 53 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับระยะเวลาสัมผัส ของถ่านทั้ง 3 ชนิด                                                                                                                        | 112  |
| 54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับความเข้มข้นฟอรั่มลดีไฮด์ ของถ่านทั้ง 3 ชนิด                                                                                                              | 113  |
| 55 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ด้วย ถ่านกกกลม (ก) ถ่านรูปถ่าย (ค) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (จ) และไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยถ่านกกกลม (ข) ถ่านรูปถ่าย (ง) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (ฉ) | 114  |



## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่                                                                                                                       | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับและ<br>ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์                             | 122  |
| 57 ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระเหยได้ในหน่วยทดลองของระบบหมุนำกรองน้ำเสีย                                                 | 125  |
| 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหล<br>ผ่านหน่วยทดลองที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ | 127  |
| 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหล<br>ผ่านหน่วยทดลองที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ | 128  |
| 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหล<br>ผ่านหน่วยทดลองที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ | 128  |

## การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกกกลมและ ถ่านญี่ปุ่นร่วมกับระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

### Treatment of Formaldehyde in Synthetic Wastewater by Adsorption on *Cyperus corymbosus* Rottb. Charcoal and *Typha angustifolia* Linn. Charcoal in Combination with Grass Filtration and Constructed Wetland System

#### คำนำ

ประเทศไทยในปัจจุบัน มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุตสาหกรรมที่มีการปลดปล่อยฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งจัดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่าย และเป็นสารพิษที่มีการกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมให้มีได้ไม่เกิน 1 มิลลิกรัม/ลิตร อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องมีทั้งใช้สารฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้น เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย และอุตสาหกรรมที่ได้สารฟอร์มาลดีไฮด์เป็นผลพลอยได้ เช่น อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ ตลอดจนอุตสาหกรรมในครัวเรือน เช่น ผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ แปรรูปเครื่องเรือน ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตามบ้านเรือน และโรงพยาบาล จะเห็นได้ว่าฟอร์มาลดีไฮด์มีโอกาสนปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้มาก โดยเฉพาะน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีโอกาที่จะปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณสูงได้ ทั้งนี้ตรวจพบอยู่ในช่วง 2-18 มิลลิกรัม/ลิตร (ข้อมูลจากนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ปี 2555)

ฟอร์มาลดีไฮด์ มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ระเหยง่าย ที่ความเข้มข้นสูงหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำตาย นอกจากนี้หากสัมผัสผิวหนังเป็นเวลานาน จะก่อให้เกิดมะเร็งผิวหนัง และเมื่อสูดดมเข้าไปที่ความเข้มข้นมากจะส่งผลต่ออาการต่างๆ คือ แสบจมูก ปวดศีรษะ คลื่นไส้ เยื่อโพรงจมูกอักเสบ คออักเสบ ผิวหนังพอง มะเร็งปอด และเสียชีวิตในที่สุด (Rong et al., 2002) ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนสูงจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรได้รับการดำเนินการ โดยทั่วไปการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ ปฏิกริยาออกซิเดชันโดยเลือกใช้โอโซน ( $O_3$ ) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และแก๊สคลอรีน ( $Cl_2$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์ หรือการใช้รังสี UV เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นต้น ซึ่งวิธีการบำบัดดังกล่าวประสบปัญหาหลายอย่าง คือ ราคาติดตั้งอุปกรณ์สูง ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ (Braiss, 2008) ซึ่งการ

หาทางเลือกอื่นในการบำบัดฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียด้วยการดูดซับโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาผลิตเป็นถ่าน เช่น ถ่านจากพืช ได้แก่ ต้นกกกลม ต้นธูปฤาษี และกะลามะพร้าว จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เพราะวัสดุชีวภาพเหล่านี้หากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่มีการกำจัดและจัดการจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไปได้ ดังนั้นหากมีการนำวัสดุชีวภาพดังกล่าวมาผลิตเป็นถ่านเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ หรือที่เรียกว่า ตัวดูดซับชีวมวล (bioadsorbent) หรือ ถ่านชีวภาพ (biocharcoal) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการบำบัดฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้ ด้วยคุณสมบัติของถ่านสามารถดูดซับสารต่างๆ โดยใช้กระบวนการทางเคมี-กายภาพ (Physical-Chemical process) ในการกักเก็บมลสารไว้ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) และเมื่อนำถ่านมาผสมดินเพื่อเป็นวัสดุสำหรับปลูกพืชเพื่อให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ และดิน สามารถย่อยสลายได้จะส่งผลทำให้ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์ในน้ำเสียลดลง

ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปสู่การศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอรั่มัลดีไฮด์ปนเปื้อนโดยใช้ถ่านกกกลมและถ่านธูปฤาษี ร่วมกับระบบหมุนำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยปลูกต้นกกกลม (*Cyperus corymbosus* Rottb.) และต้นธูปฤาษี (*Typha angustifolia* Linn.) ซึ่งจะช่วยบำบัดน้ำเสียได้ด้วยการดูดซับธาตุอาหาร เพราะพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ที่มีลักษณะน้ำท่วมขังนั้น เป็นพืชที่โตเร็ว วงจรชีวิตสั้นกว่าพืชไม้เนื้อแข็ง และพืชสามารถลำเลียงแก๊สออกซิเจนจากใบมาปลดปล่อยบริเวณรากได้ ทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณรอบรากพืชใช้ออกซิเจนในกระบวนการย่อยสลายเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืชนั่นเอง ทั้งนี้กลุ่มจุลินทรีย์ที่พบมากบริเวณรอบรากพืช ได้แก่ *Pseudomonas* spp. และ *Methylobacterium* spp. เป็นจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำและดินตามธรรมชาติสามารถย่อยสลายฟอรั่มัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้นสูงได้ (Mirdamadi et al., 2005) มีผลทำให้ความสกปรกในน้ำรวมถึงฟอรั่มัลดีไฮด์ลดลง และเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่ หมดประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแล้ว สามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านเพื่อใช้ในการดูดซับอีกต่อไป ถือได้ว่าเป็นการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืนสืบไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์และความจุของการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านชีวภาพจากต้นกกกกลมและรูปถาวยี่
2. เพื่อพัฒนาระบบบำบัดแบบห้ำากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้ถ่านชีวภาพเป็นตัวดูดซับ

## สมมุติฐาน

ถ่านชีวภาพจากกกกกลมและรูปถาวยี่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดแบบห้ำากรองน้ำเสียและพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้



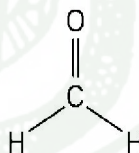
## การตรวจเอกสาร

### 1. ฟอर्मัลดีไฮด์

#### 1.1 คุณสมบัติ

ฟอर्मัลดีไฮด์ เป็นแก๊สที่มีกลิ่นฉุน ในทางการค้ามักอยู่ในรูปของสารละลายประกอบด้วย ฟอर्मัลดีไฮด์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541) ฟอर्मัลดีไฮด์เป็นสารเคมีในกลุ่ม volatile organic compounds (VOCs) โดยที่ volatile หมายถึง สารระเหยกลายเป็นไอที่อุณหภูมิห้อง (Consumer Product Safety Commission, 1997) โดยทั่วไปจะพบฟอर्मัลดีไฮด์อยู่ในรูปสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ หรือที่เรียกว่า ฟอรัมาลิน ซึ่งมีฟอर्मัลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 37-50 โดยมวล และเมทานอลร้อยละ 6-15 (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2002; WHO, 2002) สารละลายนี้จะไม่เสถียร เมื่อเก็บไว้นาน โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงจะแปรสภาพไปเป็นกรดฟอรัมิก จึงต้องเติมสารยับยั้งที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เสถียร เช่น เมทานอล เป็นต้น ทั้งนี้ฟอर्मัลดีไฮด์ในรูปการค้าเป็นสารละลายที่มีฟอรั- มัลดีไฮด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 35-55 โดยมวล และมีส่วนผสมอื่น ได้แก่ เมทานอลร้อยละ 0.5-2 กรดฟอรัมิกประมาณร้อยละ 0.3 และเหล็กล็กน้อยกว่าร้อยละ 0.0001 โดยมวล ตามลำดับ

สูตร โครงสร้าง  
(Structure formula)



น้ำหนักโมเลกุล

: 30.03

(molecular weight)

การระเบิด

lower explosive limit ร้อยละ 7.0

(explosion)

upper explosive limit ร้อยละ 73.0

อุณหภูมิที่ติดไฟเอง

: 806 องศาฟาเรนไฮต์

(autoignition temp.)

ความหนาแน่น

: 1.0 กรัม/ลูกบาศก์เมตร

(density)

จุดเดือด : -3 องศาฟาเรนไฮต์  
(boiling point)

จุดวาบไฟ สูตร ร้อยละ 37.0 (methanol free) 185 องศา-  
(flash point) ฟาเรนไฮต์  
สูตร ร้อยละ 15 (methanol free) 122 องศา-  
ฟาเรนไฮต์

ชื่ออื่นๆ (synonyms) - ฟอรั่มิก อัลดีไฮด์ (Formic aldehyde)  
- เมทานอล (Methanol)  
- ออกโซมีเทน (Oxomethane)  
- ฟอรั่มาลิน (Formalin) ซึ่งประกอบด้วย  
ฟอรั่มัลดีไฮด์ร้อยละ 35-40 ละลายในน้ำ

## 1.2 การผลิต

ฟอรั่มัลดีไฮด์ ผลิตขึ้นโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของเมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) กับออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ในอากาศ หรือโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของมีเทน ( $\text{CH}_4$ )

## 1.3 การใช้

### 1.3.1 ด้านอุตสาหกรรม

ก. ในการผลิตเรซินและพลาสติก เช่น ยูเรียฟอรั่มัลดีไฮด์ เมลามีนฟอรั่มัลดีไฮด์ ฟีนอลฟอรั่มัลดีไฮด์ และอื่นๆ

ข. ในการสังเคราะห์ ยูรีน ยา วัตถุระเบิด และสีต่างๆ เช่น สีคราม สีแดง สีอะคริลิก รวมถึงฟอกหนัง และสีตกแต่งอาหาร

ค. ในการย้อมเพื่อปรับปรุงให้สีและสีย้อมติดแน่นขึ้น

ง. ในการฟอกสีและการพิมพ์ เช่น การเตรียม rongalite, Heraldite และ Decroline

จ. ในอุตสาหกรรมกระดาษเพื่อให้กระดาษลื่นและกันน้ำได้

ฉ. ในการผสมโลหะ เพื่อระงับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ช. ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อผลิตผลที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะน้ำหนักและความแข็งแรงของไหมสังเคราะห์

ซ. ใช้สำหรับถ่ายภาพ ทำให้เก็บรักษาได้นาน

### 1.3.2 ด้านการเกษตร

ก. ใช้สำหรับการทำลายและป้องกันจุลินทรีย์และต้นไม้ที่เป็นโรค

ข. ป้องกันผลิตผลเกษตรจากการเสียหายระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

ค. ใช้ฆ่าเชื้อโรคในดิน

ง. ใช้ทำความสะอาดสถานที่เก็บอุปกรณ์ เช่น ถังไม้

จ. ใช้เป็นส่วนผสมของสารละลายที่ใช้เคลือบผัก ผลไม้ จำพวกส้มระหว่างการเก็บเกี่ยวเพื่อชะลอการเน่าเสีย

ฉ. ใช้ในการผลิตพอลิยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (เมลามีน)

ช. ใช้ในบ่อเลี้ยงปลาเพื่อป้องกันการเกิดโรคในปลา

### 1.3.3 ด้านการแพทย์

ก. ใช้ในการเก็บรักษาสภาพทางชีววิทยา คอสงพ เพื่อกงสภาพของเนื้อเยื่อไม่ให้เน่าเสีย

ข. ใช้ทำความสะอาดห้องผู้ป่วย เครื่องมือเครื่องใช้ในการเตรียมและสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยา วัคซีน

ค. ใช้สารละลายฟอร์มาลินสำหรับฆ่าเชื้อโรคในเครื่องมือต่าง ๆ เช่น เครื่องฟอกเลือด (เครื่องล้างไต)

ง. นอกจากนี้ ไอระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์สามารถนำมาอบห้องฆ่าเชื้อโรคตามโรงพยาบาลได้ด้วย

จ. สารละลายฟอร์มาลินมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อรา

### 1.3.4 เครื่องสำอาง

ก. ใช้ในเครื่องสำอางเพื่อไม่ให้เหม็นออกมา

ข. ใช้ในยาสีฟัน ยาบ้วนปาก สบู่ ครีม โกนหนวด เพื่อฆ่าเชื้อ

ค. ใช้ในน้ำยาดับกลิ่นตัวและอื่นๆ

## 1.4 ทางเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

ฟอร์มาลดีไฮด์ เข้าสู่สิ่งแวดล้อมจาก

### 1.4.1 อุตสาหกรรมการผลิตหรือใช้ฟอร์มาลิน



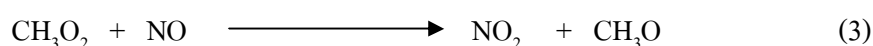
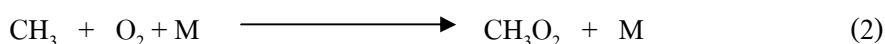
1.4.2 ไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ดีเซล ฟอรั่มลดีไฮด์เข้าสู่บรรยากาศในลักษณะของสารมลพิษพิษภัยจากไอเสียรถยนต์และจากปฏิกิริยาโฟโตเคมีที่มีความสลับซับซ้อนซึ่งถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยรังสีอัลตราไวโอเลต

แหล่งมลพิษของฟอรั่มลดีไฮด์อีกแหล่งหนึ่งได้แก่ น้ำทิ้ง ปัญหามลพิษจากฟอรั่มลดีไฮด์จะเกิดขึ้นกับน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำเมื่อดินใน hydraulic structure เกิดการเสียดสีกับสารที่มีฟีนอล แอลกอฮอล์และฟีนอลเป็นองค์ประกอบ ทำให้ ฟอรั่มลดีไฮด์อาจจะถูกชะล้างออกมาเป็นปริมาณมากประมาณ 4 ถึง 64.7 มิลลิกรัม/ลิตร

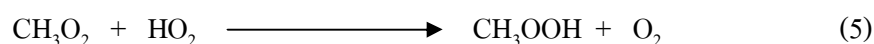
การแพร่กระจายของฟอรั่มลดีไฮด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อม ฟอรั่มลดีไฮด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ 3 ทาง ได้แก่ อากาศ น้ำ และดิน โดยอธิบายดังนี้

#### 1) ทางอากาศ

ฟอรั่มลดีไฮด์ที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์เมื่อแพร่กระจายสู่บรรยากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์ จะเกิดกระบวนการโฟโตเคมี ซึ่งในกระบวนการต่าง ๆ นั้น ประกอบด้วยปฏิกิริยาร่วมกับไนเตรต ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน และคลอรีน โดยที่ฟอรั่มลดีไฮด์ถูกขนส่งผ่านฝน ฝุ่น และก้อนเมฆ ทั้งนี้ปฏิกิริยาที่ร่วมกับไฮดรอกซิลนั้นมีผลสำคัญต่อกระบวนการโฟโตออกซิเดชัน เนื่องจากเป็นตัวกำหนดอัตราความเข้มข้นของปฏิกิริยา ทั้งนี้ช่วงชีวิตของฟอรั่มลดีไฮด์ในบรรยากาศนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 7.1-71.3 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง และอุณหภูมิ เป็นต้น ส่วนครึ่งชีวิตของฟอรั่มลดีไฮด์อยู่ที่ 1.6 ชั่วโมง ที่ต่ำกว่าชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (WHO, 2002) Lowe et al. (1991) ได้ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดฟอรั่มลดีไฮด์ในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์จาก  $\text{CH}_4$  ดังนี้



และ Wofsy et al. (1992) พบว่า methyl hydroperoxide ( $\text{CH}_3\text{OOH}$ ) เป็นตัวกลางเมื่อโดนแสงจะเปลี่ยนไปเป็นฟอรั่มลดีไฮด์ได้



การสลายฟอร์มัลดีไฮด์ในอากาศในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์พบว่ารังสียูวีสามารถสลายโมเลกุลฟอร์มัลดีไฮด์ได้ (Moortgat et al., 1998; Calvert, 1990)



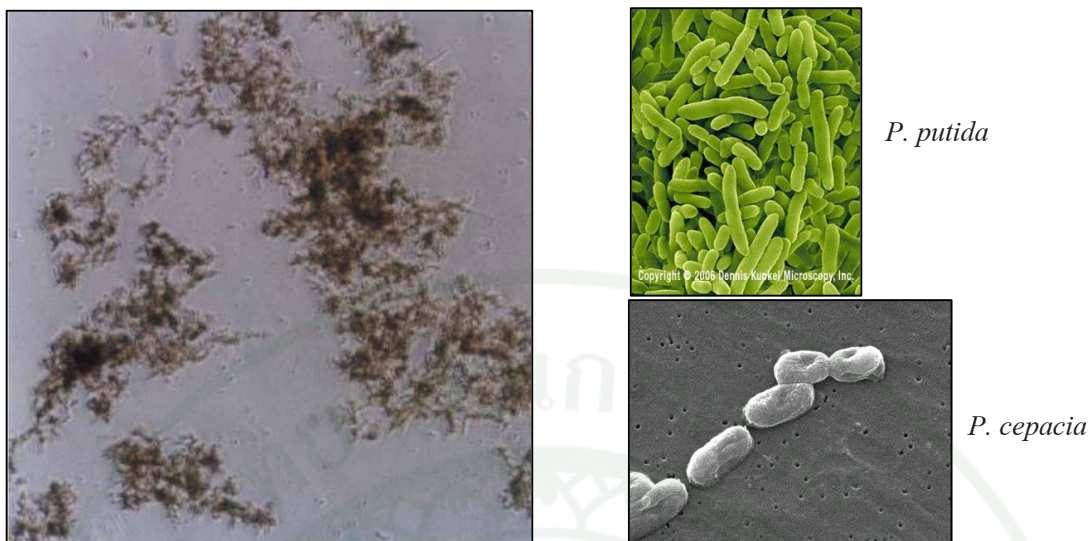
และฟอร์มัลดีไฮด์ยังถูกสลายในชั้นโทรโพสเฟียร์ระดับล่างโดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของ OH (Stern et al., 1996)



## 2) ทางน้ำ

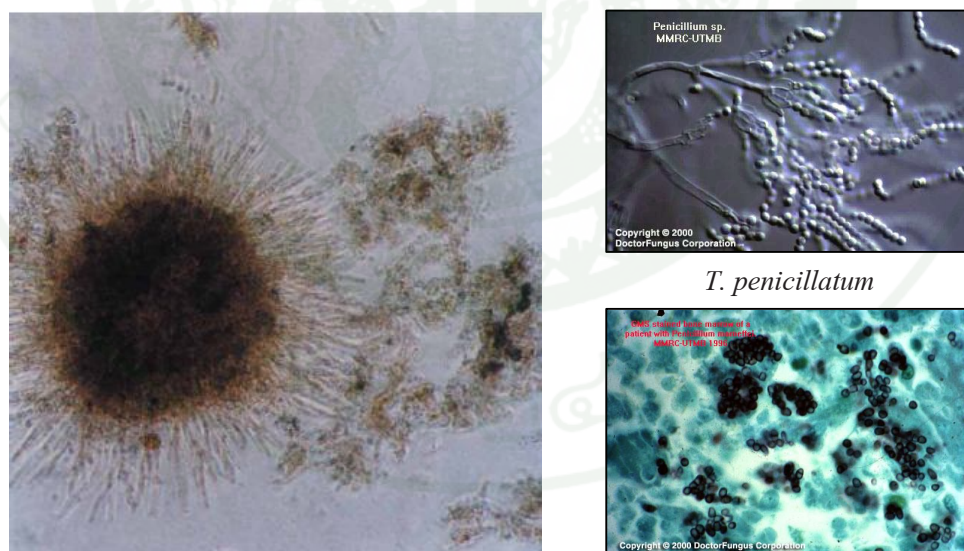
ในน้ำฟอร์มัลดีไฮด์ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นไฮเดรต มีน้ำมาล้อมรอบโมเลกุลฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ในรูปของไกลคอล และส่วนน้อยที่ไม่ใช่ไฮเดรตอยู่ร้อยละ 0.04 โดยมวล ในรูปสารละลายให้ความเข้มข้นสูงในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน ทั้งนี้ฟอร์มัลดีไฮด์ยังสามารถสลายตัวได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งฟอร์มัลดีไฮด์ในแม่น้ำจะสลายตัวภายใต้สภาวะออกซิเจนที่ 20 องศาเซลเซียส ที่ 30 ชั่วโมง และภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ 48 ชั่วโมง โดยที่มีครึ่งชีวิตที่ 24-168 ชั่วโมง ในน้ำผิวดิน และ 48-336 ชั่วโมง ในน้ำใต้ดิน (WHO, 2002)

และจากการศึกษาของ Glancer et al. (2001) พบว่า ภายใต้ออกซิเจน ใช้จุลินทรีย์ชนิด *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas cepacia* และ *Trichosporon penicillatum* ร่วมกัน โดยให้ยัดกับมีเดีย สามารถย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ได้สมบูรณ์ในเวลา 18-24 ชั่วโมง และเติม  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  100-250 มิลลิกรัม/ลิตร เพื่อเป็นตัวเติม N และ P ในน้ำให้จุลินทรีย์



ภาพที่ 1 กลุ่มจุลินทรีย์ *Pseudomonas putida* และ *Pseudomonas cepacia* ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการย่อยสลายฟอर्मัลดีไฮด์แบบใช้ออกซิเจน (ภาพขยายขนาด 16x40)

ที่มา: Glancer et al. (2001)

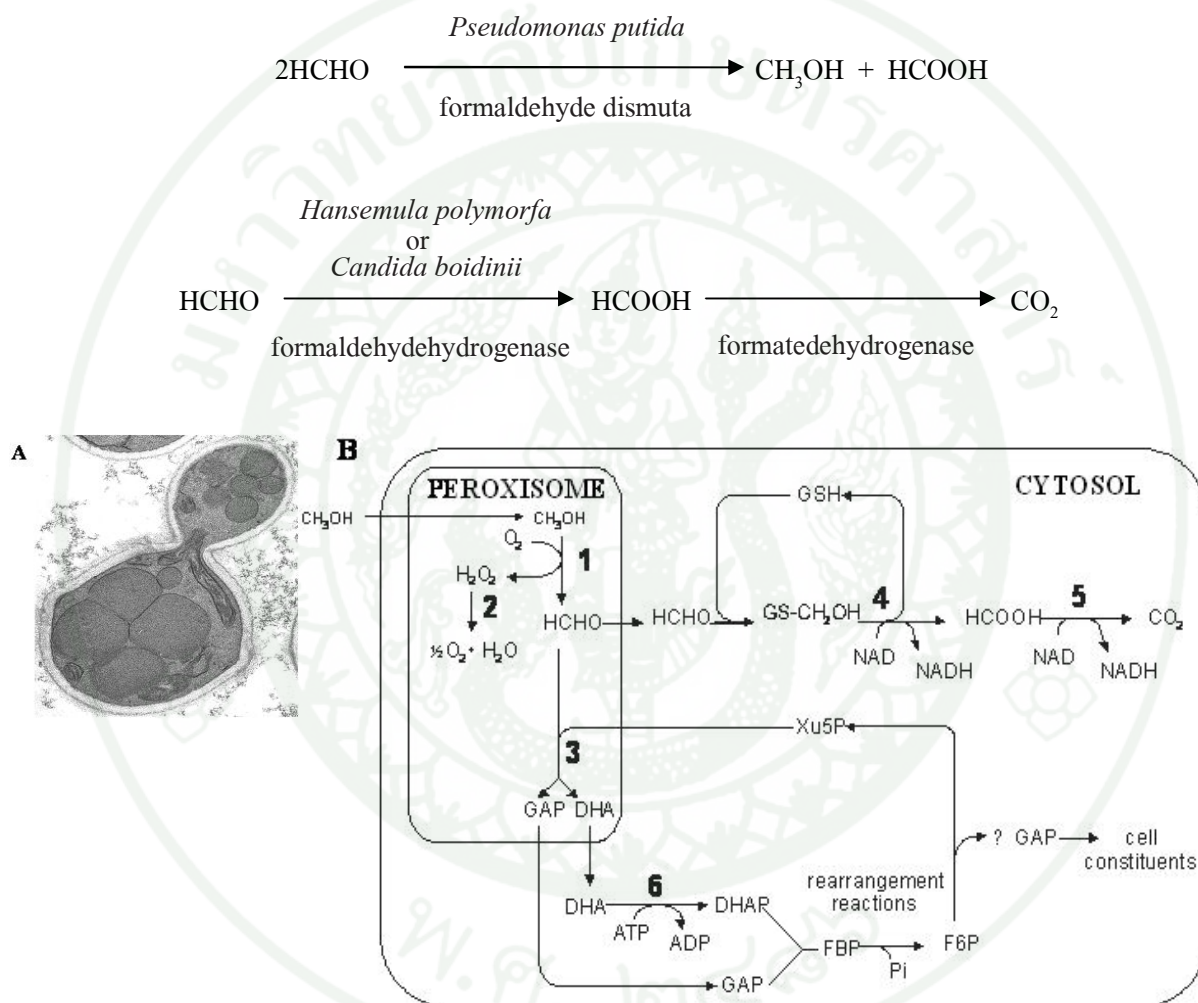


ภาพที่ 2 กลุ่มจุลินทรีย์ *P. putida*, *P. cepacia* และ *T. penicillatum* ที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นแล้วจับตัวเป็นก้อนจากการย่อยสลายฟอर्मัลดีไฮด์แบบใช้ออกซิเจน (ภาพขยายขนาด 16x40)

ที่มา: Glancer et al. (2001)



ทั้งนี้ Attwood and Quayle (1994) พบว่า กรดฟอร์มิก (HCOOH) เป็นผลผลิตที่เกิดจากการย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ซึ่งใช้เอนไซม์ formaldehyde dismutase ในขณะที่จุลินทรีย์กลุ่ม *Hansenula* spp. และ *Candida* spp. จะย่อยสลายฟอร์มัลดีไฮด์โดยใช้เอนไซม์ formaldehyde dehydrogenase ได้กรดฟอร์มิก และ formate dehydrogenase ย่อยสลายกรดฟอร์มิกได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



ภาพที่ 3 A : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด *Hansenula polymorpha*

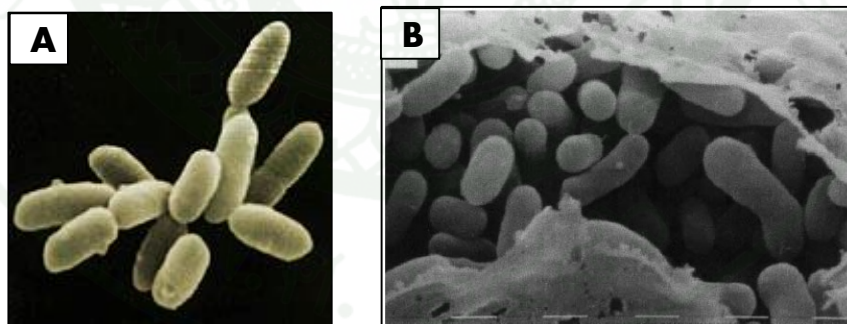
B : กลไกการย่อยสลายเมทานอล และ ฟอร์มัลดีไฮด์ ของ *Hansenula polymorpha* (เอนไซม์ที่ใช้ 1-alcohol oxidase, 2-catalase, 3-dihydroxyacetone synthase, 4-formaldehyde dehydrogenase, 5-formate dehydrogenase, 6-dihydroxyacetone kinase, 7-GSH-glutathione, Xu5P-xylulose-5-phosphate, FBP-fructose-1,6-bisphosphate)

ที่มา: Gellissen et al. (2005)

### 3) ทางดิน

ฟอร์มาลดีไฮด์ไม่สามารถถูกดูดซับในเม็ดดินได้ แต่สามารถเคลื่อนที่ในดินได้ด้วยการไหลไปกับน้ำผิวดิน และการชะลงสู่ใต้ดิน ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน ความถี่ของการตกของฝน ความลึกของน้ำใต้ดิน และการย่อยสลายของฟอร์มาลดีไฮด์ โดยที่การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในดินนั้นยังขึ้นอยู่กับความหลากหลายของจุลินทรีย์ในดิน ครึ่งชีวิตของฟอร์มาลดีไฮด์ในดินนั้นมีค่าเท่ากับ 24-168 ชั่วโมง ในสภาวะการย่อยสลายด้วยออกซิเจน (WHO, 2002)

โดย Mirdamadi et al. (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ของแบคทีเรีย 19 ชนิด ที่ใช้ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นแหล่งคาร์บอน ทั้งในดินและในน้ำของโรงงานผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ พบว่าที่ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ 370 มิลลิกรัม/ลิตร ตรวจพบจุลินทรีย์ชนิด *Pseudomonas pseudoalcaligenes*, *P. aeruginosa*, *P. testosteroni*, *P. putida*, และ *Methylobacterium extorquens* ทั้งในดินและในน้ำ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เป็น 1,850 มิลลิกรัม/ลิตร ตรวจพบจุลินทรีย์ชนิด *P. Pseudoalcaligenes* และ *M. extorquens* และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์เป็น 3,700 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าจุลินทรีย์ชนิด *P. Pseudoalcaligenes* สามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 24 ชั่วโมง และย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 5,920 มิลลิกรัม/ลิตร ได้ร้อยละ 70 หลังจาก 72 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 A : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด *Pseudomonas pseudoalcaligenes*

B : ลักษณะของจุลินทรีย์ชนิด *Methylobacterium extorquens*

ที่มา: Mirdamadi et al. (2005)



สำหรับกลไกการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นเช่นเดียวกันดังกล่าวข้างต้น คือ จะย่อยฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยเอนไซม์ formaldehyde dehydrogenase ได้กรดฟอร์มิก แล้วทำการย่อยกรดฟอร์มิก ด้วยเอนไซม์ formate dehydrogenase ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### 1.5 ความเป็นพิษต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ฟอร์มาลดีไฮด์จัดเป็นสารพิษปานกลาง มีค่าความเป็นพิษ LD<sub>50</sub> ต่อหนูขาว (rat) ทางกระเพาะอาหารเท่ากับ  $385 \pm 28.72$  มิลลิกรัม/กิโลกรัม สำหรับปริมาณที่ทำให้คนตาย (lethal dose;) อยู่ระหว่าง 0.5-5.25 กรัม/กิโลกรัม

อาการที่เกิดจากความเป็นพิษอย่างเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ ที่มีต่อสัตว์ทดลองโดยการฉีดเข้าในกระเพาะอาหาร พบว่าหลังจากที่สัตว์ทดลองได้รับสารเข้าไปจะแสดงอาการตื่นตระหนกตามด้วยอาการง่วงซึม อ่อนเพลีย หายใจขัดและจะตายภายใน 2-3 ชั่วโมง แรกที่ได้รับสาร ส่วนสัตว์ทดลองที่รอดชีวิตพบว่ามีอาการเฉื่อยชา ง่วงเหงา และเบื่ออาหาร

ทดลองให้หนูอายุ 2 สัปดาห์กินน้ำที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ระดับต่างๆ เป็นเวลา 6 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่าหนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 1.5 และ 20 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนัก พฤติกรรม และการแสดงออกภายนอกไม่แตกต่างจากหนูกลุ่มควบคุม แต่หนูที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของตับและม้าม (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

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

จากการศึกษาผู้ดื่มฟอร์มาลีนร้อยละ 5 จำนวน 100 มิลลิลิตร พบว่าหลังจากดื่มฟอร์มาลีนเข้าไปจะเกิดอาเจียน จากนั้นเกิดการระคายเคืองและกระเพาะอาหารตอนบนและเกิดอาการคลื่นเหียน ผู้ป่วยจะเสียชีวิตภายใน 40 วัน ด้วยอาการเลือดออกในกระเพาะอาหารและลำไส้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

ผลการตรวจสุขภาพจำนวน 278 คน ซึ่งทำงานในโรงงานไม้ดัดกวาไม้อัดที่ใช้เรซินหรือกาวชนิด cabamide formaldehyde พบว่า คนงาน 129 คน เป็นโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ ซึ่งเกิดจากการหายใจเอาไอของฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เข้าไป

การตรวจสุขภาพของพนักงานหญิงอายุ 25-40 ปีที่ทำงานประมาณ 5-20 ปี ในโรงงาน ย้อมที่ใช้ฟอร์มาลิน ซึ่งมีฟอร์มาลินในบรรยากาศ ประมาณ 5-78 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตรพบว่า มีอาการปวดหัว ทรงตัวลำบาก ระคายเคืองง่าย และน้ำตาไหลเป็นประจำ (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

## 1.6 ความเป็นพิษเฉพาะด้าน

### 1.6.1 การก่อกลายพันธุ์

เป็นที่ทราบกันว่าฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ หรือการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมตัวหนึ่งในปัจจุบัน การทดลองในแมลงวันทองแบคทีเรียและพืชแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันระหว่างความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์และการกลายพันธุ์

การที่ฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อระบบพันธุกรรมของเซลล์ เกี่ยวข้องกับผลกระทบของสารที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ และนิวคลีโอไทด์ และ depurination ของ DNA

### 1.6.2 การทำให้เกิดพิษ

จากการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลันของฟอร์มาลดีไฮด์ร่วมกับ dimethyl dioxane ต่อคนงานชาย-หญิง จำนวน 8 คน อายุระหว่าง 19-36 ปี ซึ่งได้รับสารทั้ง 2 ชนิดระหว่างการทำงาน พบว่ามีอาการอ่อนเพลีย ปวดหัว วิงเวียน อาเจียน ปวดท้อง และหลังจากนั้นเล็กน้อยจะเกิดอาการระคายเคืองและระบบทางเดินหายใจ

ในการทดลองในหนูหายใจเอา ฟีนอล และฟอร์มาลดีไฮด์แยกจากกัน โดยแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมงทุกวัน และให้หายใจสารทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน โดยแต่ละชนิดมีความเข้มข้น 0.25 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 เดือน พบว่าหนูที่ได้รับสารแต่ละชนิดจะแสดงการได้รับพิษมากกว่าหนูที่ได้รับสาร 2 ชนิดรวมกัน

การทดลองให้สารฟอร์มาลดีไฮด์แก่หนูตัวผู้โดยทางน้ำและทางอากาศพร้อมกัน ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือ ความเข้มข้นในน้ำ 0.1 และ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร ความเข้มข้นในอากาศ 0.5 และ 0.025 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร โดยให้น้ำแก่หนูสัปดาห์ละ 5 ครั้ง เป็นเวลา 6 เดือน และให้

อากาศอย่างต่อเนื่องวันละ 4 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า ปริมาณกรดนิวคลีอิกลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

### 1.6.3 การทำให้ไวต่อสิ่งกระตุ้น

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ พบว่า หนูตะเภา (guinea pigs) หายใจเอาฟอร์มาลดีไฮด์เข้าไปจะเกิดอาการแพ้ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ได้รับ และพบว่า หนูแสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ที่ความเข้มข้น 0.035 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร

คนงานที่ทำงานเกี่ยวกับฟอร์มาลดีไฮด์ ยืนยันว่า ฟอร์มาลดีไฮด์ ทำให้เกิดอาการแพ้จากการตรวจสอบคนงานในโรงงานผลิตเรซินฟีนอลฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศเท่ากับระดับความสูงสุดที่ยอมให้มีได้ (MAC level) คนงานมีอายุระหว่าง 21-45 ปี ร้อยละ 5 เป็นคนงานที่ทำงานมาแล้ว 4-5 ปี ร้อยละ 50 ทำงานเกิน 5 ปี ผลการตรวจพบว่าคนงานมีอาการของโรคแพ้ชนิดต่างๆ เช่น ลมพิษ โรคจมูก หืดหลอดลม ถ้าใส่หน้ากากอนามัย

### 1.6.4 ลูกวิรูป

การตรวจสอบการตั้งครรภ์ของหนูขาว albino rats ที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 1 และ 0.012 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 10 วัน ก่อนการผสมพันธุ์และตลอดระยะการตั้งครรภ์ พบว่า ฟอร์มาลดีไฮด์ มีผลต่อการเจริญของตัวอ่อน และพบว่าลูกหนูที่เกิดจากแม่ที่ได้รับฟอร์มาลดีไฮด์ 1 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีการลดขนาดของ lymphoid tissue เกิดการลดปริมาณ glycogen ใน myocardium เกิดการสะสมของ Schick-positive substances ในไต เกิดการคงอยู่ของเหล็กใน Kupffer cells ของตับ

ผลการตรวจสอบคนงานหญิงอายุ 18-30 ปี ที่ตั้งครรภ์ในโรงงานทอผ้า ทำงานเกี่ยวกับฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นเวลามากกว่า 3 ปี พบว่า pathologic gestation พบว่ามีการแท้ง และคลอดก่อนกำหนด มากกว่า ปกติ เด็กที่เกิดมีน้ำหนักและความสูงน้อยกว่าปกติ น้ำหนักตัวเด็กลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะเวลาการทำงาน

### 1.6.5 การระคายเคืองขั้นต้น

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่ก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างเห็นได้ชัดในการทดลองให้หนู mongrel albino rats จำนวน 20 ตัว หายใจฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 31.4-0.7 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร วันละ 2 ชั่วโมง สัปดาห์ละ 5 วัน เป็นเวลา 70 วัน พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพของทางเดินหายใจ ตอนบน พบว่า mucosal glands มีแนวโน้มจะเกิดการอักเสบมากกว่าปกติ จากการศึกษาคนงานที่ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม หลายชนิด เช่น โรงงานไม้ โรงงานผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ หรือโรงงานที่เกี่ยวข้อง มีอายุ 40 ปี จำนวน 278 คน ในจำนวนนี้เป็นชาย 102 คน หญิง 176 คน เป็นคนงานที่ทำงานน้อยกว่า 5 ปี ร้อยละ 71.2 เป็นคนงานที่ทำงาน 6-10 ปี ร้อยละ 26.6 เป็นคนงานที่ทำงาน 10 ปี ร้อยละ 2 ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงทางพยาธิสภาพ (pathological change) ของทางเดินหายใจตอนบน (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

### 1.7 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ในสิ่งแวดล้อม

1.7.1 ความเข้มข้นที่มีผลทำให้ปลาตายหมด ( $LC_{100}$ ) เท่ากับ 0.2 กรัม/ลิตร ตายร้อยละ 50 ( $LC_{50}$ ) เท่ากับ 0.1 กรัม/ลิตร ความเข้มข้นสูงสุดที่ปลาทนได้ เท่ากับ 0.06 กรัม/ลิตร

1.7.2 ฟอร์มาลดีไฮด์ มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช ความเข้มข้นสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งความเข้มข้นนี้ก่อให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงสูงสุด ไม่เกินร้อยละ 10

1.7.3 ฟอร์มาลดีไฮด์มีผลต่อแบคทีเรียอย่างรุนแรงพบว่า ดินบริเวณโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์มีปริมาณแบคทีเรียน้อยกว่าบริเวณอื่น กล่าวคือดินในแหล่งอุตสาหกรรมพบแบคทีเรีย 28,000 ถึง 40,000 เซลล์/กรัม ในขณะที่ดินไม่ได้รับการปนเปื้อน พบแบคทีเรีย 900,000 เซลล์/กรัม

1.7.4 ฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำโสโครก ความเข้มข้นเกินกว่า 0.001 มิลลิกรัม/ลิตร จะยับยั้งการเจริญเติบโตของระบบการหายใจ ของไมโครพอรรา

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



## 1.8 มาตรการทางกฎหมาย

1.8.1 มาตรฐานน้ำ ประเทศไทยโดยกรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

1.8.2 ประเทศสหภาพแห่งสาธารณรัฐสังคมนิยมโซเวียต กำหนดมาตรฐานน้ำคือ

ก. ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำดื่มและน้ำใช้เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจ เท่ากับ 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร

ข. ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีในแหล่งน้ำที่ใช้ในการประมงเท่ากับ 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

## 2. กระบวนการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัว จากนั้นจึงนำมาใส่เอาโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออก โดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับจึงเป็นกระบวนการเคลื่อนย้ายของตัวถูกดูดซับจากตัวกลางหนึ่งไปสะสมที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของพื้นผิวระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โดยที่ตัวถูกดูดซับจะไปเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับแก๊ส พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น สารอินทรีย์หรือโลหะถูกดูดซับในดินหรือตะกอนดินในทะเล มหาสมุทร และแม่น้ำ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นโดยมนุษย์ เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ กระบวนการดูดซับน้ำมีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมหลายด้านด้วยกัน เช่น การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือดูดซับโลหะหนักจากแหล่งฝังกลบ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

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

## 2.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.1.2 การแพร่ผ่านภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

2.1.3 ปฏิริยาพื้นผิว (surface reaction) ปฏิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิริยาพื้นผิวด้วย

## 2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

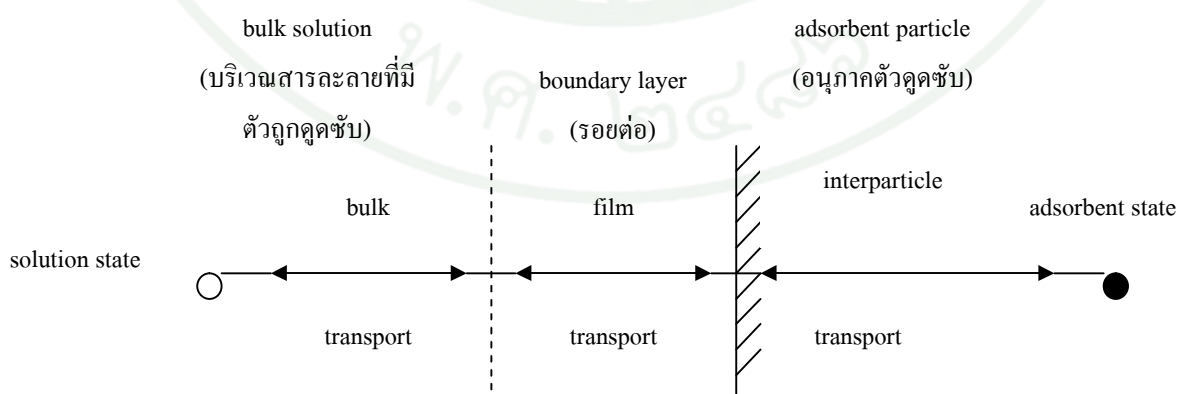
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การขนส่งอนุภาค (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

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

การยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะมีแรงยึดเหนี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือทางเคมีหรือทั้งสองแบบ



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)

## 2.3 แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

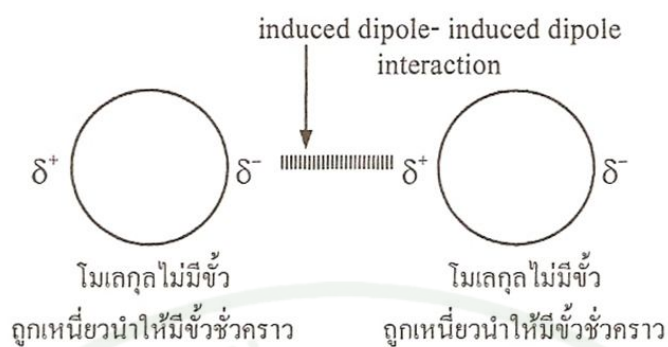
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับนั้น อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางกายภาพ (physical force) หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแบบทางเคมี (chemical force) หรือในบางกรณีอาจเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองแบบ

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

ก. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว ซึ่งเรียกว่าแรงลอนดอน (London force) หรือแรงแผ่กระจาย (dispersion force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวก หรือกล่าวได้ว่าทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียง ถ้าโมเลกุลมีขั้วหนึ่งขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induced dipole-induced dipole attraction) ดังภาพที่ 6

แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล เพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้วรูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่าถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อน อิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะเกิดการบดบังกัน สภาพขั้วจึงน้อย ทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย

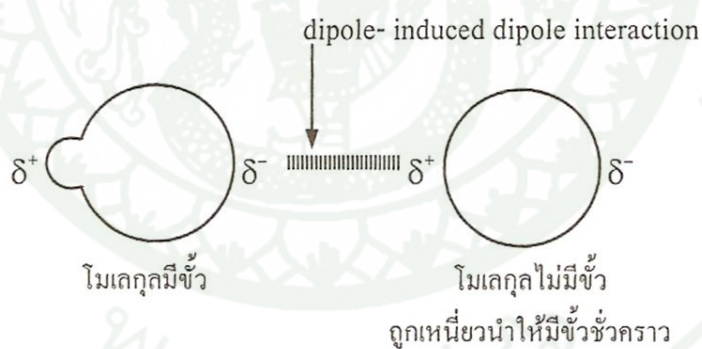




ภาพที่ 6 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

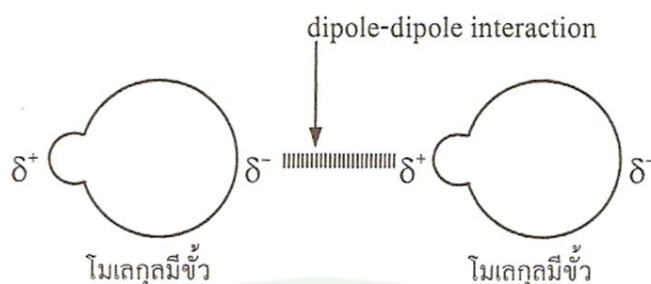
ข. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วย จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induced dipole attraction) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

ค. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงอำนาจไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบ จึงดึงดูดกัน (dipole-dipole attraction) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีขั้ว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิตา (2550)

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ทำให้เกิดพันธะที่มีขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวก จึงเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง แรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)

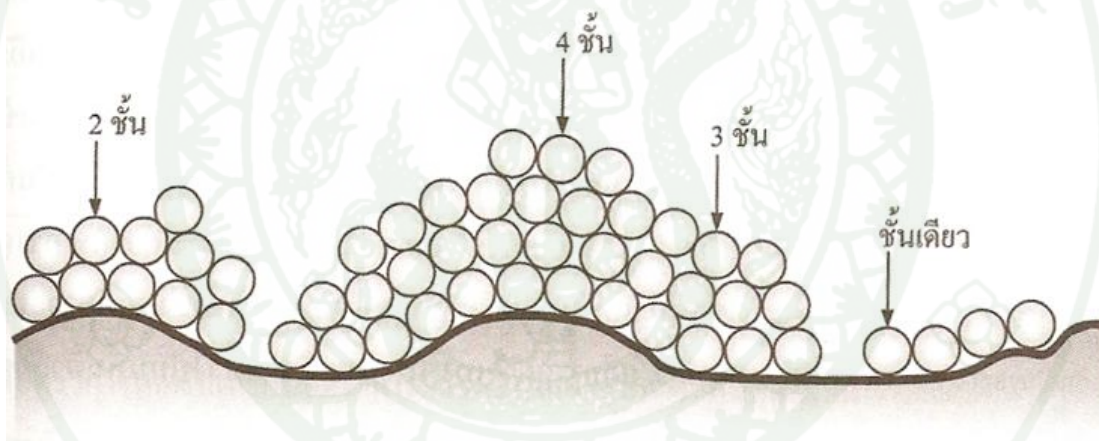
แรงแวนเดอร์วาลส์ เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเทียบกับแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น การทำลายแรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) 1 โมล ใช้พลังงาน 25 กิโลจูล แต่พลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำลายพันธะ  $\text{Cl}-\text{Cl}$  ในโมเลกุลคลอรีนมีค่าถึง 244 กิโลจูล/โมล ความแข็งแรงของแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าระหว่าง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

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

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

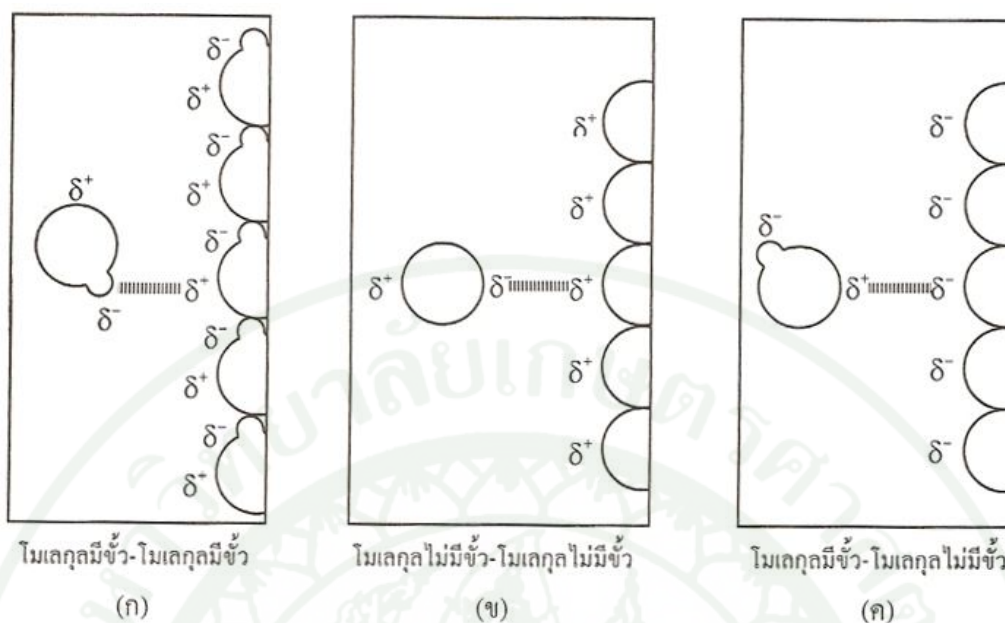
## 2.4 รูปแบบของการดูดซับ

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



ภาพที่ 9 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น

ที่มา: นิพนธ์ และคณะ (2550)



ภาพที่ 10 การยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

จากภาพที่ 10 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงกายภาพ มีดังนี้

ก. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลมีขั้วทั้งคู่

ข. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็นโมเลกุลไม่มีขั้วทั้งคู่

ค. ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้ว และโมเลกุลตัวดูดซับเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว

2.4.2 การดูดซับทางเคมี (chemisorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมี มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (สร้างพันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (สร้างพันธะโคเวเลนต์) ทำแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพ มีผลทำให้การดูดซับ



ทางเคมีโดยส่วนใหญ่จะผันกลับไม่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิด การผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้น และโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บริเวณดังกล่าวจะเป็นแบบชั้นเดียว และเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยประมาณ 2-10 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 กิโลแคลอรี/โมลของตัวถูกดูดซับ และยังพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการดูดซับทางเคมีมีค่ามากกว่าทางกายภาพ ด้วยเหตุผลนี้ กระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าทางเคมี

## 2.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

### 2.5.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ พบว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรูพรุน เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้น การดูดซับจะเกิดได้ดี เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนเล็กน้อย หากรูพรุนมีมากแต่มีขนาดเล็กหรือรูพรุนมีขนาดใหญ่ แต่ปากรูพรุนมีขนาดเล็กจะไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

### 2.5.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำของโมเลกุลตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับ พบว่าแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำเพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดใหญ่มีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มจะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น

### 2.5.3 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะดูดโมเลกุลของตัวถูกละลายได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย และ อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ เช่น คาร์บอนผง (Powder Activated Carbon, PAC) มีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าคาร์บอนแบบเกร็ด (Granular Activated Carbon, GAC)

### 2.5.4 ขนาดและลักษณะของตัวถูกละลาย

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ เช่น คาร์บอน การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อสารมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างภายในพอลิ (พอลิเข้าไปในช่องว่างได้) ทั้งนี้เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกละลายและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปในช่องว่างภายในก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าจึงถูกดูดเข้าไปบ้าง อาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลาย นั่นคือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง

### 2.5.5 อัตราเร็วการปั่นกววน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าไปหาตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในตรงกันข้าม ถ้าการปั่นกววนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าหาตัวดูดซับได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ในการนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับ

### 2.5.6 ผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

การดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ เมื่อสารละลายมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้เกิดไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ทำให้กระบวนการดูดซับไอออนลบเกิดได้มากขึ้น และเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นมีผลทำให้มี  $OH^-$

บนพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถดูดซับไอออนบวกได้มากขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชสูงกว่า 9 จะทำให้โลหะไอออนตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ และโลหะไอออนจะถูกดูดซับได้น้อยลง

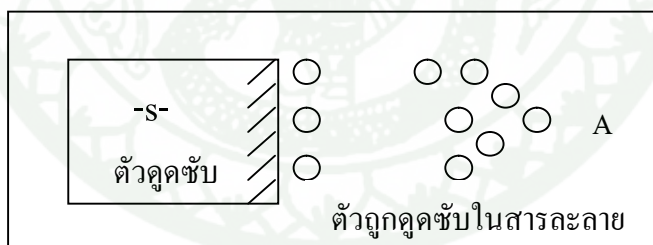
### 2.5.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

### 2.5.8 ระยะเวลาสัมผัส

เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ และอายุการใช้งานของตัวดูดซับ โดยที่เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าระยะเวลาสัมผัสเลยจากช่วงนี้แล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอีกเลย

## 2.6 สมดุลการดูดซับ



ภาพที่ 11 การเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

เมื่อใส่ตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นตอนต้น  $C_0$  ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกัน โมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายซับออกมา พบว่าอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตรา

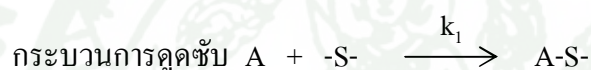
การคายซับ ระบบเข้าสู่สมดุล ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่าจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่คายซับออกมา มีปริมาณคงที่

ให้ A เป็นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น  $C_0$  โมล/ลิตร ในสารละลาย

-S- เป็นโมเลกุลของตัวดูดซับ

q เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

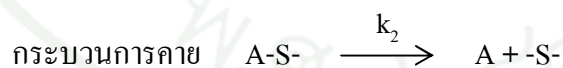
(1-q) เป็นสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ



$r_1$  แทนอัตราการดูดซับ ซึ่งจะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายให้เท่ากับ C และยังแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

$k_1$  แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

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



$r_2$  แทนอัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

$k_2$  แทนค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q)$$



ณ สภาวะสมดุล  $r_1 = r_2$

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

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

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

เมื่อ  $K$  เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



$$\text{ณ สภาวะสมดุล } K = \frac{q}{C} \quad (14)$$

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมา  
ของตัวดูดซับ จากตัวดูดซับ

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

เมื่อ  $q$  เป็นปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ  
(หน่วยเป็นปริมาณตัวถูกดูดซับต่อมวลตัวดูดซับ เช่น mol/kg, mol/g และ mg/kg)

$W$  เป็นมวลของตัวดูดซับที่ใช้ (หน่วยเป็นน้ำหนัก เช่น kg)

$V$  เป็นปริมาตรของสารละลายที่มีตัวถูกดูดซับละลายอยู่ (หน่วยเป็นลูกบาศก์  
เซนติเมตร หรือลิตร)

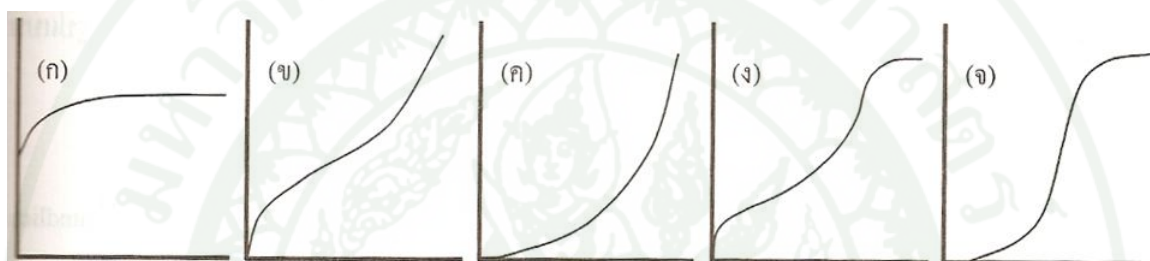
$C_0$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับก่อนการดูดซับที่อยู่ในสารละลาย (หน่วย  
เป็นความเข้มข้น เช่น mol/l)

$C$  เป็นความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (หน่วยเป็นความ  
เข้มข้น เช่น mol/l)

## 2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ ( $q$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือน้อยอยู่ในสารละลาย ( $C$ ) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  ในแกนตั้ง และค่า  $C$  ในแกนนอนจะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา: Maron and Prutton (1961)

จากภาพที่ 11 รูป (ก) จัดเป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วนรูป (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบหลายชั้น

สมการไอโซเทอร์มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.7.1 สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของการดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^{1/n} \quad (15)$$

K และ n เป็นค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง และ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยทั่วไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง

เมื่อจัดรูปสมการที่ (15) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง โดยใช้ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (16)$$

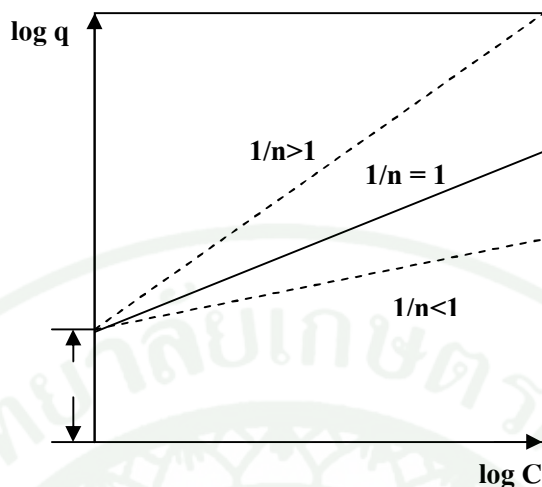
เมื่อ q คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (ความสามารถการดูดซับ) (มิลลิกรัม/กรัม)

K คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$\frac{1}{n}$  คือ ความชันของกราฟ

C คือ ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (mg/l)

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



ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q$  และ  $\log C$

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

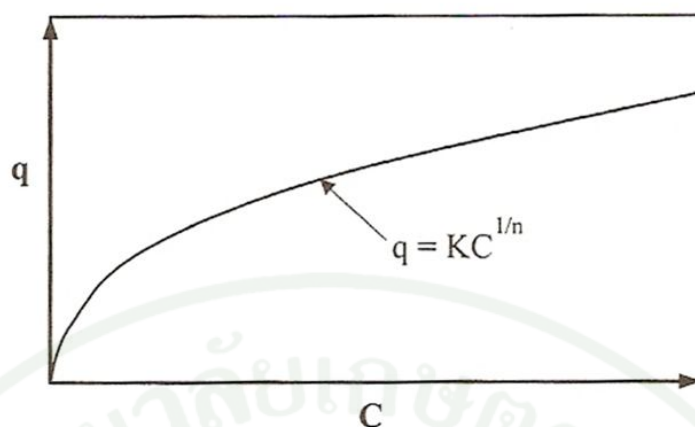
ถ้า  $\frac{1}{n} = 1$  ไอโซเทอรั่มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

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

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

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า  $q$  และ  $C$  จากสมการที่ (15) ได้ดังภาพที่ 14 จะไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับถูกดูดซับได้มากที่สุด เนื่องจากตัวถูกดูดซับสามารถจะเกิดการช้อนทับกันได้

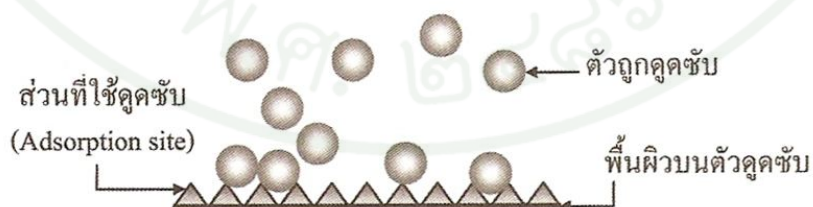




ภาพที่ 14 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

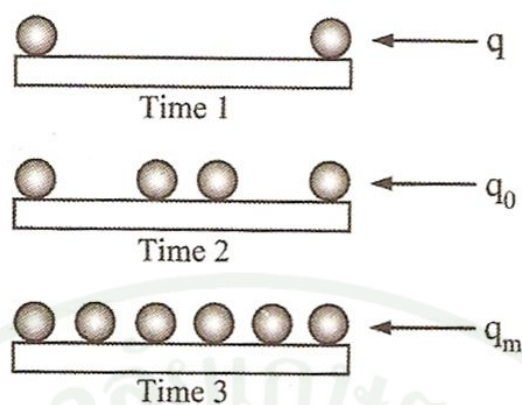
ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

2.7.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (langmuir adsorption isotherm) มีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (monogeneous adsorption surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ不会再มีการเคลื่อนที่ (เคลื่อนย้าย) หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด) ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แบบจำลองพื้นผิวตัวดูดซับของสมการแลงเมียร์ กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)



ภาพที่ 16 การดูดซับของแก๊สเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

ที่มา: นิพนธ์ และกณิดา (2550)

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (15) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับหนึ่งรูปแบบของสมการแก๊สเบียร์ จะใช้สมการที่ (15) เพียงต้องคูณปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวดูดซับ แทนด้วย  $q_m$  ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \quad (17)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ (17) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K q_m C} \quad (18)$$

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

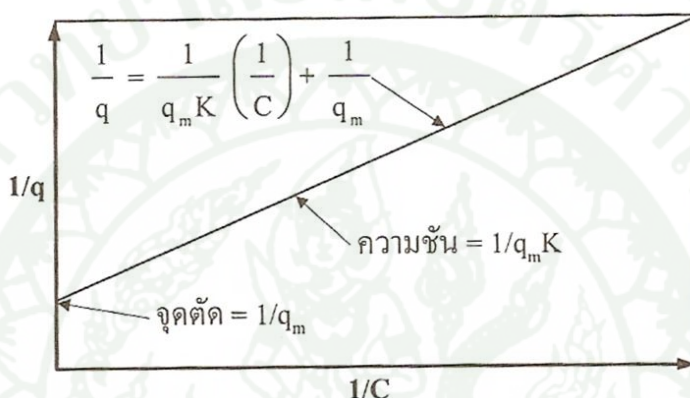
$q_m$  คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

$K$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ

$C$  คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

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

และจุดตัดเท่ากับ  $\frac{1}{q_m}$



ภาพที่ 17 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

ที่มา: นิพนธ์ และคณิตา (2550)

## 2.8 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ แบ่งได้ 5 ประเภท

2.8.1 ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอคติเวเตดซีลีตา (zeolite) สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก

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

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

2.8.4 วัสดุชีวภาพ ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น จี๊เลื่อย ไคโตซาน (chitosan) กาแฟที่ใช้แล้ว ชา และชาเขียวที่ใช้แล้ว ฟางข้าว (rice straw) เปลือกไม้ (bark) ถั่วแกลบดำ เป็นต้น

2.8.5 สารดูดซับชีวภาพ ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา สายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

### 3. การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับโดยวิธี Brunauer Emmett-Teller (BET Method)

#### 3.1 ความสำคัญ

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำวัสดุนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือ ตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะกล่าวในที่นี้เป็นการวัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุ แล้วนำค่ามาคำนวณเป็นค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุ

#### 3.2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการเบื้องต้น

บรูเนอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett and Edward Teller) ได้ศึกษาการดูดซับแก๊สไนโตรเจนทั้งบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ ดังแสดงในภาพที่ 18 พบว่าแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมี ส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุล ชั้นเดียวจนเต็มพื้นที่ผิวก่อน จากนั้นแก๊สไนโตรเจนที่เหลือ แพร่กระจายไปเคลือบบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็น โมเลกุล หลายชั้น ดังแสดงในภาพที่ 19 ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับ ( $W$ ) กับความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) ของวัสดุที่เพิ่มขึ้น เป็นสมการที่ เรียกว่า “สมการของ BET” ได้ดังนี้



$$\frac{1}{W\left[\left(\frac{P_0}{P}\right) - 1\right]} = \frac{1}{W_m C} - \frac{C - 1}{W_m C} \left(\frac{P}{P_0}\right)$$

โดย  $W$  = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )

$W_m$  = ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ เคลือบบนผิวของสาร  
ในลักษณะที่เป็น โมเลกุลชั้นเดียว

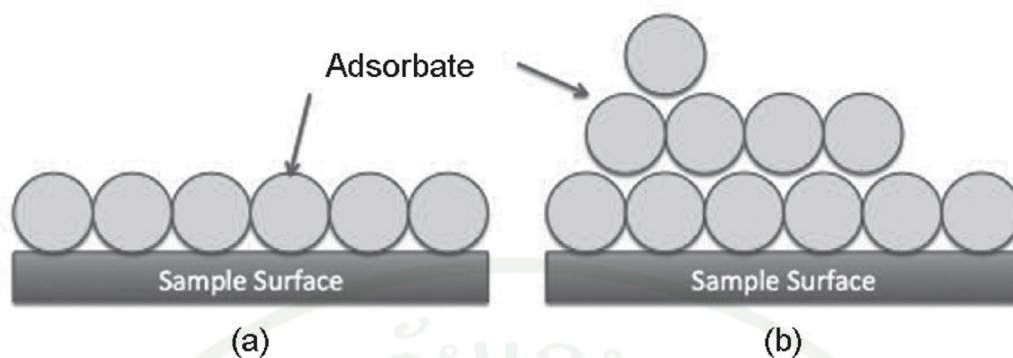
$P$  = ความดันของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในขณะที่ทำการทดลอง  
(หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท)

$P_0$  = ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน (หน่วย เป็นมิลลิเมตรปรอท)

$C$  = ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

ภาพที่ 18 แสดงการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนผิวหน้าและภายในรูพรุนของวัสดุ

ที่มา: สุพะไชย์ (2555)



ภาพที่ 19 แสดงการดูดซับโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนของวัสดุเป็นชั้นๆ

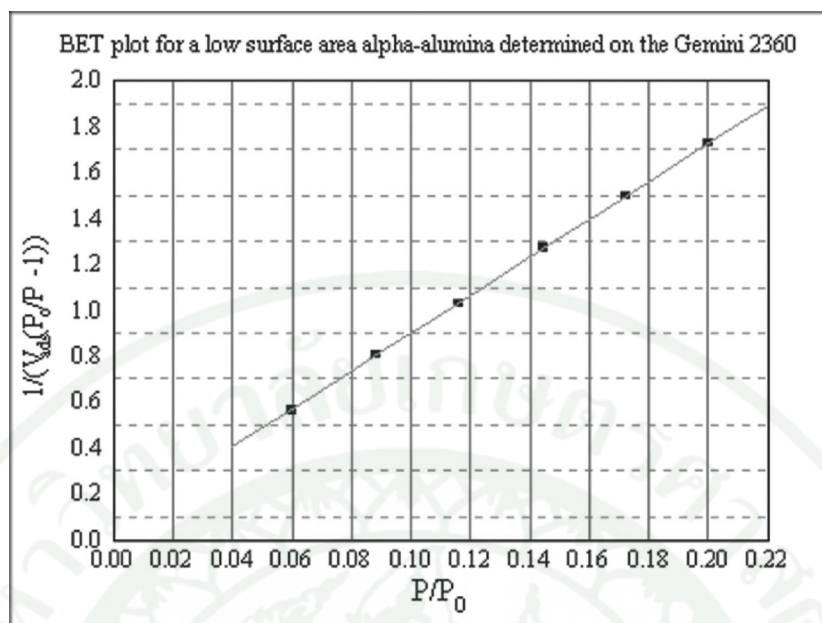
ที่มา: สุพะไชย์ (2555)

จากความสัมพันธ์สมการ BET เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $1/W[(P_0/P) - 1]$  กับ  $P/P_0$  จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงใน ภาพที่ 20 มีความชัน (slope,  $s$ ) ดังสมการ

$$S = \frac{C - 1}{W_m C}$$

และจุดตัดแกน y (y-intercept,  $i$ ) ดังสมการ

$$i = \frac{1}{W_m C}$$



ภาพที่ 20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์

ที่มา: สุพะไชย์ (2555)

ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (W<sub>m</sub>) คำนวณโดยนำ s และ i แทนค่าในสมการ

$$W_m = \frac{1}{s + i}$$

พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ คำนวณโดยนำ W<sub>m</sub> แทนค่าในสมการ

$$S_t = \frac{W_m NA_{cs}}{M}$$

โดย S<sub>t</sub> = พื้นที่ผิวของวัสดุ (หน่วยเป็นตารางเมตร)

N = เลขอาโวกราโดร (6.023 x 10<sup>23</sup>) (หน่วยเป็น โมเลกุลต่อโมล)

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน (28 กรัมต่อโมล)

$$A_{cs} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับ}}{(16.2 \times 10^{-23}) \text{ (หน่วยเป็นตารางเมตร)}}$$

ค่า  $S_t$  ที่ได้เมื่อหารด้วยปริมาณของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ทดสอบ ( $w$ ) จะได้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม

$$S = \frac{S_t}{W}$$

ปริมาตรรูพรุนรวม ( $V_p$ ) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $\bar{r}_p$ ) ของวัสดุ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$V_p = \frac{W_s}{\rho}$$

$$\bar{r}_p = \frac{2V_p}{S_t}$$

โดย  $W_s$  = ปริมาณของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx 1$

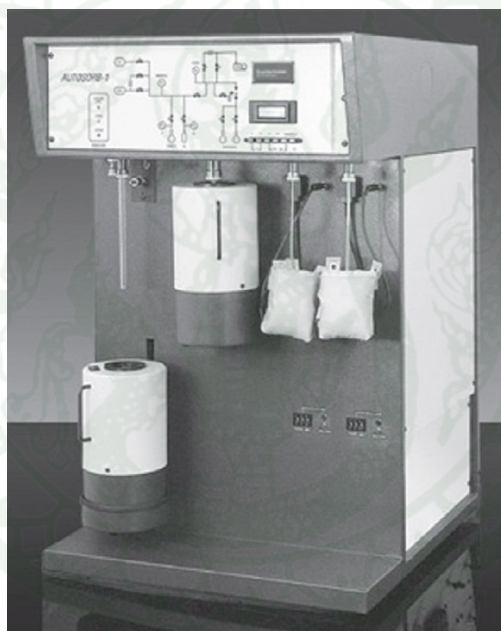
$\rho$  = ความหนาแน่นของแก๊สในโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของวัสดุที่ความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ )  $\approx 1$

$S_t$  = พื้นที่ผิวของวัสดุที่ทดสอบได้

ในการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน ดังแสดงในภาพที่ 21 ใช้เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่าง (sample cell) จำนวน 2 เซลล์ เซลล์หนึ่งบรรจุวัสดุตัวอย่างที่ต้องการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ส่วนอีกเซลล์ไม่ใส่วัสดุตัวอย่างแต่ทำหน้าที่เป็นเซลล์อ้างอิง ก่อนการทดสอบต้องให้ความร้อนแก่เซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุตัวอย่าง จากนั้นทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศเพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น ก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุในโตรเจนเหลวเพื่อให้



เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุวัสดุตัวอย่างลดลงจนกระทั่งคงที่ (P) ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีวัสดุตัวอย่างความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ ( $P_0$ ) ข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (W) โดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกเป็นเช่นนี้จนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลง ( $P/P_0 \approx 1$ ) แสดงว่าไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจนอีกแล้ว จากข้อมูลค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ เครื่องทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผลออกมาเป็น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน



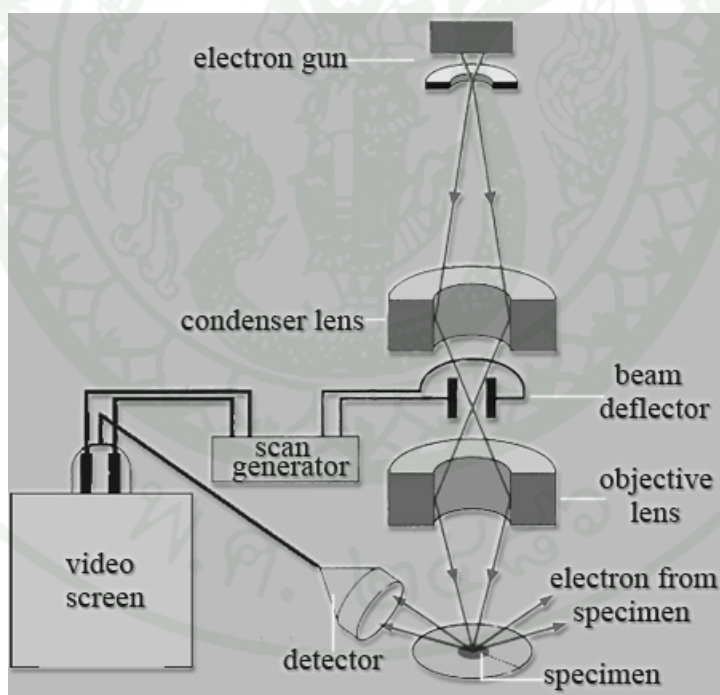
ภาพที่ 21 แสดงเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะและ ปริมาตรรูพรุน

ที่มา: สุพะไชย์ (2555)

#### 4. การตรวจลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

##### 4.1 หลักการพื้นฐานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยาย ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นจาก electron gun โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในช่วงประมาณ 2-25 กิโลโวลต์ จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกบีบให้แคบลงโดย condenser lens จนเหลือเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมาก และถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่างพอดีโดย objective lens จากนั้น scan coil จะควบคุมให้เกิดการกวาดของอิเล็กตรอน โดยเริ่มกวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อกวาดจนสุดก็จะเลื่อนลงอีกชั้นและกวาดจากซ้ายไปขวาอีก จนครบเฟรมซึ่งการกวาดลำอิเล็กตรอนลักษณะเช่นนี้เรียกว่า raster scan และเมื่อกวาดจนครบเฟรมแล้วก็จะไปเริ่มแสกนที่จุดแรกใหม่



ภาพที่ 22 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา: Graham (1997)

ที่ผิวตัวอย่างซึ่งลำอิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบถ้าผิวตัวอย่างเรียบจะให้สัญญาณได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะให้สัญญาณได้น้อยหรือไม่ให้สัญญาณเลย ซึ่งสามารถที่จะรับสัญญาณได้โดยใช้ detector ที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณ เพื่อนำมาสร้างเป็นภาพ โดยปกติสัญญาณที่ได้จะมีความเข้มต่ำ ต้องขยายสัญญาณให้มีความเข้มสูงขึ้นด้วย amplifier เพื่อให้สัญญาณมีความแรงพอที่จะแสดงออกมาเป็นภาพให้เห็นได้

ในการแสดงภาพจะใช้หลอดรังสีแคโทด (Cathod Ray Tube หรือ CRT) โดยในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างลำอิเล็กตรอน และถูกบีบให้เป็นลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้อง SEM มาก กล่าวคือใน SEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำถึง 5 นาโนเมตร หรืออาจต่ำกว่า แต่ใน CRT มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอน พบว่าห่างกันถึง 20,000 เท่า ซึ่งก็คืออัตราขยายภาพสูงสุดที่จะให้ภาพที่มีรายละเอียดได้ดั่งนั้นเอง

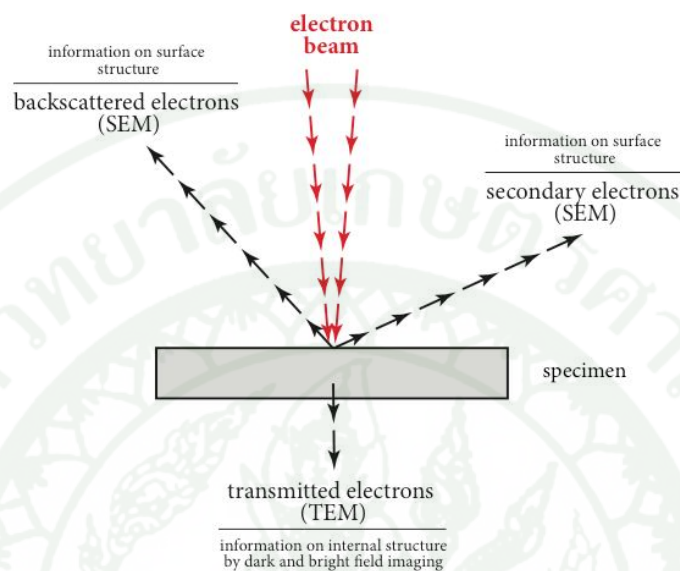
การสแกนใน CRT จะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบ raster scan พร้อมๆ กับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้อง ในขณะที่ความสว่างของลำอิเล็กตรอนใน CRT จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจาก amplifier ถ้าสัญญาณแรงความสว่างของลำอิเล็กตรอนก็จะมาก เมื่อส่องไปบนจอที่ฉาบด้วยสารเรืองแสงก็จะปรากฏเป็นจุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเบาหรือน้อย จุดที่เกิดขึ้นก็จะมีความสว่างน้อย ซึ่งจากการทำงานของจอภาพก็จะทำให้สัญญาณที่มาจากผิวตัวอย่างเกิดการเรียงกันของจุดสัญญาณ เมื่อนำจุดสัญญาณมาเรียงจนเต็มเฟรมก็จะได้ภาพออกมา

ถ้าจอ CRT มีขนาดเป็น 20 เซนติเมตร และกำหนดให้การกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้อง 1 เฟรม มีขนาดเป็น 20 เซนติเมตร ด้วยอัตราส่วนการขยายภาพ จะขยายภาพเป็น 1 เท่า แต่ถ้ากำหนดให้การกวาดลำอิเล็กตรอน 1 เฟรม มีขนาดเป็น 1 เซนติเมตร จะขยายภาพเป็น 20 เท่า แต่ในความเป็นจริงนั้น สามารถควบคุมขนาดของเฟรมในกล้องให้เล็กมากถึงระดับไมโครเมตร ดังนั้นกำลังขยายจึงได้ถึงระดับหมื่นเท่า

#### 4.2 ตัวอย่างและสัญญาณอิเล็กตรอน

อิเล็กตรอนจาก column หรือ เรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) เมื่อตกกระทบลงบนผิวตัวอย่างจะเหนี่ยวนำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามคุณสมบัติ

ทางกายภาพของตัวอย่างออกมา อนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเหล่านี้ในเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะเรียกว่า “สัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal)”



ภาพที่ 23 สัญญาณที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนชนกับชิ้นตัวอย่าง

ที่มา: Graham (1997)

สัญญาณที่เกิดจากราตงค้ประกอบในตัวอย่าง มีหลายชนิดที่เกิดขึ้นแต่สามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ 2 กลุ่ม คือ

#### 4.2.1 Inelastic Scattering ได้แก่

- 1) Secondary Electrons (SE)
- 2) X-rays
- 3) Photons
- 4) Transmitted Electrons
- 5) Cathodoluminescence



#### 4.2.2 Elastic Scattering ได้แก่ Back Scattered Electron (BSE)

สัญญาณที่ได้จาก interaction ของ primary electron กับผิวตัวอย่างที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์โดย SEM ได้นั้นมี 4 ชนิด ได้แก่

ก. Secondary Electron (SE) เป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจาก primary electron ไปชนเอาอิเล็กตรอนที่ผิวตัวอย่างหลุดออกมา ซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะหลุดออกมาจากผิวตัวอย่างที่มีความลึกจากผิวไม่เกิน 10 นาโนเมตร และให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง โดยความเข้มของ SE นี้จะขึ้นกับมุมที่ primary electron ตกใส่ตัวอย่างและสภาพพื้นผิวของตัวอย่าง ภาพที่ได้จาก SE จะเรียกว่า Secondary Electron Image (SEI)

ข. Back Scattered Electron (BSE) คือ primary electron ที่กระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง กล่าวคือเมื่อ primary electron วิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชน nucleus ของอะตอมบนผิวตัวอย่าง จะเกิดการเปลี่ยนทิศทางและกระเจิงกลับออกมาจากผิวตัวอย่าง ซึ่งจะเกิด BSE มากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูงๆ สำหรับความเข้มของสัญญาณ BSE จะขึ้นกับมุมที่ primary electron ตกใส่ตัวอย่างและเลขอะตอมของธาตุที่ผิวตัวอย่าง ภาพที่ได้จาก BSE เรียกว่า Back Scattered Electron Image (BEI) หรือบางครั้งเรียกว่า Primary Electron Image

ค. Characteristic X-Ray เกิดจากการที่เมื่ออิเล็กตรอนวงในของธาตุที่ผิวตัวอย่างถูกชนโดย primary electron จนหลุดออกไป จะเกิดเป็นระดับพลังงานที่ว่างทำให้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานสูงกว่าลดระดับชั้นพลังงานลง และพร้อมกันนี้ก็จะปลดปล่อยพลังงานในรูปรังสี X ออกมา โดยระดับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาของแต่ละธาตุนั้นจะแตกต่างกัน สามารถที่จะวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบที่ผิวตัวอย่างได้ ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ภาพที่ได้เรียกว่า X-Ray map

ง. Cathodoluminescence ธาตุบางชนิด เมื่อได้รับการถ่ายทอดพลังงานจาก primary electron จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของ visible light หรือ UV ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงที่ตามองเห็นได้ เกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากลำอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนในระดับพลังงานชั้นนอกเคลื่อนเข้าสู่สถานะที่ถูกกระตุ้น และกลับเข้าสู่สถานะปกติ (ground state) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตัวอย่างบางชนิดเท่านั้น จึงไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก



### 4.2.3 ข้อจำกัดและสภาวะในการเดินเครื่อง SEM

ใน SEM เครื่องหนึ่งถ้าควบคุมสภาวะในการเดินเครื่องที่ต่างกันจะทำให้ถ่ายภาพออกมาได้ต่างกันสภาวะเหล่านี้ บางข้อนั้นเป็นข้อจำกัดของการทำงานของเครื่องด้วย โดยข้อจำกัดและสภาวะที่สำคัญมีดังนี้

1) Resolution และกำลังขยายของ SEM ไม่ได้ถูกกำหนดที่ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนเหมือนกับ Transmission Electron Microscope (TEM) แต่มันจะถูกจำกัดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน (beam diameter) กล่าวคือ เมื่อวางตัวอย่างห่างจากปลาย column ที่ระยะหนึ่ง ใช้ลำอิเล็กตรอนที่เล็กลงเครื่องจะมีกำลังแยกที่ดีขึ้น แต่เครื่องโดยทั่วไปสามารถบีบลำอิเล็กตรอนได้เล็กที่สุดประมาณ 5 นาโนเมตรใน SEM บางรุ่นบางยี่ห้ออาจจะบีบได้เล็กกว่านี้แต่ต้อง operate ที่ศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาในเรื่องความคลาดเคลื่อนของเลนส์สูง และการใช้งานยากขึ้น

กำลังขยายของ SEM จะสัมพันธ์กับ beam diameter โดยถ้าในการสแกน 1 เฟรม ถูกกำหนดให้มี 2,000 จุด และ 2,000 เส้น และหน้าจอ CRT สำหรับแสดงภาพมีขนาด 20 เซนติเมตร แล้ว นั่นคือแต่ละเส้นจะมีขนาดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งค่านี้ก็คือค่า screen resolution ของจอโดยกำลังขยายสูงสุดของเครื่องสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{กำลังขยาย} &= \text{screen resolution} / \text{beam diameter} \\ &= 0.1 \text{ มิลลิเมตร} / 5 \text{ นาโนเมตร} \\ &= 20,000 \text{ เท่า}\end{aligned}$$

ค่ากำลังขยาย 20,000 เท่า เป็นกำลังขยายสูงสุดของ SEM ทั่วไปที่มีอยู่แต่ในสเปกเครื่องส่วนมากมักจะระบุกำลังขยายสูงสุดเกินค่านี้ไป ซึ่งภาพที่ได้จากการขยายเกินจุดนี้มักจะขาดความคมชัดไป

2) Accelerating Voltage คือศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอนมีหน่วยเป็น กิโลโวลต์ (kV) โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนของเลนส์อิเล็กตรอน (chromatic aberration) จะลดลงเมื่อใช้ accelerating voltage ที่สูงขึ้นแต่อิเล็กตรอนที่ศักย์ไฟฟ้าสูงจะมีค่าพลังงานสูงมากซึ่งจะมีผลให้รังสีทะลุเข้าไปในตัวอย่างที่มีเลขอะตอมต่ำได้ลึกเกินความต้องการ ทำให้ภาพที่ได้ไม่

คมชัดดังความต้องการ ทำให้เกิดความร้อนที่ตัวอย่างเป็นผลให้เกิดความเสียหายของตัวอย่างได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดการสะสมประจุที่ผิวตัวอย่างสูง (charge up)

3) Scan Speed กล่าวง่ายๆ คือความเร็วที่อิเล็กตรอนสแกนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งถ้าใช้ความเร็วสูงจะแสดงภาพหยาบมีสัญญาณรบกวนมาก ใน SEM โดยทั่วไปจะสแกนได้เร็วที่สุด 25 เฟรม/วินาที ซึ่งเท่ากับการสแกนในโทรทัศน์ ดังนั้นจึงเรียกการสแกนแบบนี้ว่า TV mode ซึ่งมีประโยชน์มากในการปรับตำแหน่งของตัวอย่าง เพราะจะแสดงภาพได้เร็วขึ้น แต่ถ้าวัดการสแกนช้าลงสัญญาณที่ได้ก็จะดีขึ้นมีความคมชัดมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของจุดลำอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่างนั้นจะมีสัญญาณอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีการเคลื่อนที่เร็วประสิทธิภาพของการให้สัญญาณจะน้อย สัญญาณที่เข้าสู่ detector จะน้อยด้วย amplifier ที่ขยายสัญญาณจะต้องขยายสัญญาณมากขึ้น เป็นผลให้สัญญาณรบกวนถูกขยายตามไปด้วย ดังนั้นสัญญาณที่ส่งไปยังจอ CRT จึงขาดความคมชัด เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมากนั่นเอง ในทางกลับกันถ้าใช้ scan speed ที่ช้าลง สัญญาณรบกวนไม่ถูกขยาย ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัดมากขึ้น แต่การแสดงผลจะช้าและอาจเกิดความร้อนบนผิวตัวอย่าง ซึ่งถ้าตัวอย่างมีความเปราะบางจะทำให้เกิดความเสียหายของตัวอย่างเกิดขึ้น และอาจเกิด charging up ได้

4) Spot Size คือขนาดของจุดอิเล็กตรอน แม้ว่า resolution ของ SEM จะขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลำอิเล็กตรอน (spot size) แต่ถ้าใช้ spot size ที่เล็กมากจะทำให้สัญญาณอิเล็กตรอนจากผิวตัวอย่างออกมาน้อยด้วย เป็นผลให้ amplifier ต้องขยายสัญญาณมาก สัญญาณรบกวนจึงมากตามไปด้วย ดังนั้นในการใช้กำลังขยายสูงที่มีความจำเป็นต้องใช้ spot size ขนาดเล็ก จึงต้องใช้ scan speed ที่ช้า ในทางกลับกันถ้าต้องการกำลังขยายต่ำสามารถทำงานได้ง่าย และเร็วขึ้น โดยการใช้ spot size ที่ใหญ่ขึ้นและใช้ scan speed ที่ค่อนข้างเร็วทั้งนี้ spot size ที่ใหญ่จะให้สัญญาณอิเล็กตรอนได้มากจึงชดเชยกับการใช้ scan speed ที่เร็วขึ้นได้นั่นเอง

5) Working Distance ใน SEM คือระยะห่างระหว่างวัตถุกับ final objective lens โดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5-40 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อใช้ค่า working distance มากก็ทำให้มีความชัดลึกของภาพสูง แต่ในขณะที่หากต้องการถ่ายภาพที่มีกำลังขยายสูงๆ จะต้องใช้ working distance ต่ำ

6) Aperture Size เป็นแผ่นโลหะบางๆ ที่มีรูอยู่ตรงกลาง โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 25 ถึง 1,000 ไมโครเมตร aperture จะช่วยลดการคลาดเคลื่อนของเลนส์อิเล็กตรอนได้ถ้าต้องการถ่ายภาพที่มีกำลังขยายสูงและมีความชัดลึกมากต้องใช้ aperture ขนาดเล็ก แต่ภาพที่ได้จะมี

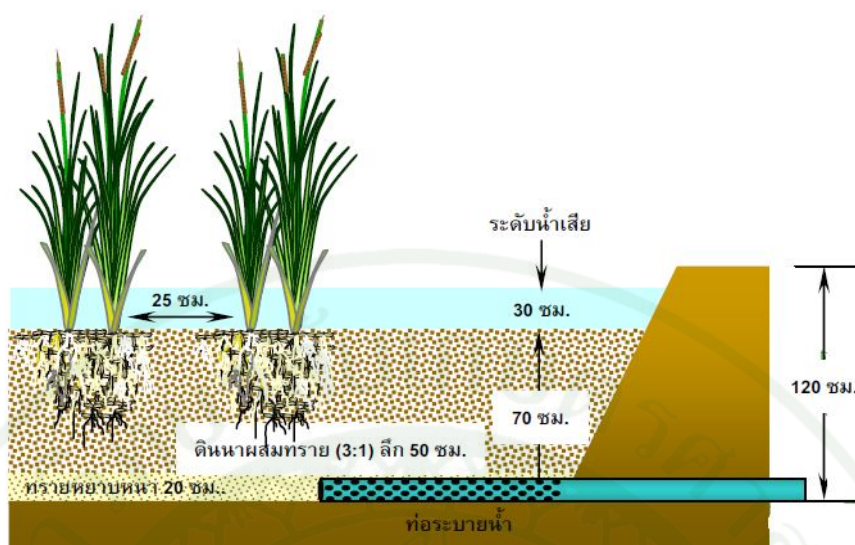
สัญญาณรบกวนสูงในทางกลับกัน ภาพที่กำลงขยายต่ำไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อerture เล็ก แต่จะมีความชัดลึกไม่ดี ดังนั้นในการเลือกใช้นาของ aperture ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับภาพที่ต้องการ

ดังนั้นในการใช้งาน SEM เพื่อถ่ายภาพให้ได้ตามที่ต้องการ จึงต้องอาศัยความเข้าใจในด้านพื้นฐานมากพอสมควร และต้องมีความชำนาญอยู่บ้างจึงจะได้ภาพที่สวยงามตามความต้องการ แม้ว่าในปัจจุบันกล้อง SEM จะมีระบบปรับ focus, brightness และ contrast ได้โดยอัตโนมัติก็ตาม แต่สำหรับการปรับที่ละเอียดหรือการปรับที่กำลงขยายสูงยังคงต้องใช้การปรับด้วยมือ

## 5. ระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมและระบบหล้งกรองน้ำเสีย

### 5.1 พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland)

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



ภาพที่ 24 โครงสร้างภายในและภายนอกของระบบบำบัดน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

ที่มา: ธนิศร์ (2548)

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

#### 5.1.1 การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสีย

การใช้พื้นที่ชุ่มน้ำในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสำคัญ 4 ประการ คือ ชนิดของพืชโตเร็วที่เลือกปลูก (vegetation) ลักษณะการไหลของน้ำ (water column) ชนิดของหน้าดิน (substrate) และชนิด จำนวนจุลินทรีย์ในพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น (microbiological population) นอกจากนี้อัตราการทางชลศาสตร์ (hydraulic loading) ควรอยู่ในระหว่าง 0.16 ถึง 12



เฮกเตอร์ ต่อ 1,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537) โดยปกติบึงประดิษฐ์จะสร้างขึ้นโดยมีคันขอบดินสูงประมาณ 1 เมตร พื้นที่กันบึงปรับระดับเสมอกันเพื่อขังน้ำ ดินพื้นควรมีคุณสมบัติให้พืชน้ำยืคเกาะได้ดี เมื่อการก่อสร้างงานดินเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงนำพืชน้ำมาปลูก ซึ่งจะมีทั้งที่มีรากเกาะดิน เช่น ฐูปญาณี กก บัว พืชที่ลอยอยู่บนผิวน้ำ เช่น จอก แหน และพืชที่ลอยอยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย บึงประดิษฐ์สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการไหลของน้ำเป็น 2 ประเภท (อุดร, 2537) ได้แก่

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

ข. แบบไหลเบื้องล่าง (subsurface flow) เป็นแบบที่ให้น้ำไหลลงไปในชั้นตัวกลาง โดยบึงจะบรรจุชั้นตัวกลางเพื่อให้รากพืชยึดเกาะตัวกลาง ได้แก่ กรวด ผสมดินชนิดต่างๆ ความหนาของชั้นตัวกลางประมาณ 60 ถึง 70 เซนติเมตร ด้านล่างคาคด้วยดินเหนียว หรือวัสดุกันซึม เพื่อรักษาระดับน้ำในบึง ซึ่งจะต่ำกว่าผิวน้ำตัวกลางเล็กน้อย น้ำเสียจะไหลผ่านตัวกลางและรากของพืชน้ำ ชั้นตัวกลางนี้จะมีสถานะไร้อากาศ แต่ออกซิเจนจากรากพืชจะช่วยดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในดินชนิดใช้อากาศที่อาศัยอยู่ตามรากพืช

#### 5.1.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พื้นที่ชุ่มน้ำ

ในระบบนิเวศของพื้นที่ชุ่มน้ำประกอบด้วยส่วนสำคัญ คือ ดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ หรือถูกน้ำท่วมขัง พืชและจุลินทรีย์ 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; ลักษณี, 2539) ซึ่งสารปนเปื้อนในน้ำเสียที่พื้นที่ชุ่มน้ำสามารถบำบัดได้ เช่น บีโอดี ของแข็งแขวนลอย ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และเชื้อโรคบางชนิด โดยใช้กลไกการบำบัดทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 2537)



### 5.1.3 หลักการระบบบำบัดน้ำเสียแบบขังน้ำสลับแห้ง (flooding and drying system)

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

ก. การเกิดสภาพที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อดินมีน้ำขังการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างอากาศในดิน และบรรยากาศจะถูกยับยั้ง ซึ่งโดยปกติออกซิเจนในบรรยากาศจะเข้าไปสู่ดินได้โดยการแพร่กระจาย (diffusion) แต่เมื่อดินถูกน้ำขังการแพร่กระจายของออกซิเจนจะต้องผ่านชั้นของน้ำที่อยู่เหนือดิน ทำให้อัตราการแพร่กระจายผ่านเข้ามาช้ามาก ( $1/1,000$  เท่าของในบรรยากาศ) จากนั้นดินก็จะอยู่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน ออกซิเจนที่มีอยู่เดิมซึ่งถูกกักเก็บไว้ตามช่องว่างในดินที่ถูกน้ำขังจะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน (aerobic bacteria) และจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) นำมาใช้ในการหายใจจนหมดไปอย่างรวดเร็ว และจะเกิดการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่นๆ ในดิน โดยการสะสมและค่อยๆ เพิ่มความกดดันจนเกิดเป็นฟองสูญหายออกจากดิน องค์ประกอบของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไปในดินที่ขังน้ำย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจุลเคมี และชีวภาพของระบบได้ (ไพบุลย์, 2528)

ข. การเกิดรีดักชันและปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสีย ภายหลังจากการขังน้ำ ทำให้ออกซิเจนในดินถูกใช้หมดโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน หลังจากนั้นจุลินทรีย์ที่ใช้ ออกซิเจนจะหยุดกิจกรรมชะงักการเจริญเติบโตและตายไป ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งที่ต้องการออกซิเจนและไม่ต้องการออกซิเจนจะเริ่มหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้สารประกอบต่างๆ ในดินซึ่งมีระดับออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุ ก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน สารประกอบที่สามารถที่สามารถเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินนั้น ได้แก่ ไนเตรต แอมโมเนีย ไนโตรเจนไดออกไซด์ เฟอร์ริกออกไซด์ ซัลเฟต และสารประกอบอินทรีย์ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ตามลำดับทาง thermodynamic และสมการต่างๆ โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชัน ชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันอยู่กับ ปัจจัย 5 ประการ คือ ธรรมชาติและปริมาณของอาหาร

จุลินทรีย์หรือตัวให้อิเล็กตรอน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณและชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน และระยะเวลาที่มีน้ำแช่แข็ง (สิทธิชัย, 2538)

## 5.2 การบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย (Grass filtration system) เป็นเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอย่างง่าย ประหยัด มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อาศัยกระบวนการทางธรรมชาติในการบำบัด ซึ่งเป็นลักษณะการก่อสร้างดัดแปลงพื้นที่บำบัดน้ำเสียให้เป็นระบบพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะ และนำระบบนิเวศดินนาข้าวมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีหญ้ากรองน้ำเสีย โดยปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านพื้นที่แปลงที่มีความลาดเอียงที่ทำการปลูกพืชหรือหญ้า ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านผิวดินและต้นหญ้าหรือพืชจนกระทั่งไหลผ่านจากแปลง ในระหว่างที่น้ำเสียไหลผ่านแปลงจะเกิดกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติ ซึ่งน้ำเสียจะได้รับการบำบัดให้มีคุณภาพดีขึ้นโดยการให้น้ำเสียผ่านแปลงในลักษณะเลื่อนไหลไปในแนวระดับ (Horizontal) น้ำเสียจะได้รับการบำบัดทั้งในแนวระดับและในแนวดิ่ง (Vertical) เนื่องจากน้ำเสียจะมีการซึมลงสู่ชั้นใต้ดิน โดยผ่านการกรองและบำบัดของระบบดิน จุลินทรีย์และพืช ซึ่งองค์ประกอบทั้ง 3 จะทำหน้าที่ร่วมกัน โดยอาศัยกลไกทางกายภาพ เคมี และชีวภาพในการบำบัด และให้ระบายน้ำเสียในลักษณะการขังสลับ การแห้งน้ำ (Flooding and drying) หรือกล่าวได้ว่า ในการบำบัดน้ำเสียจะทำการขังน้ำสลับกับการปล่อยให้พื้นที่แปลงบำบัดแห้งน้ำ

### 5.2.1 โครงสร้างและลักษณะการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยนำหลักการบำบัดน้ำเสียของระบบพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการปลูกพืชหรือหญ้า โดยโครงสร้างของพื้นที่แปลงบำบัดน้ำเสียที่สร้างขึ้นนั้นจะสร้างเลียนแบบธรรมชาติ ซึ่งลักษณะแปลงหญ้ากรองน้ำเสียจะมีขนาดพื้นที่ 2.5 x 30 ตารางเมตร สร้างคันดิน (Berm) สูงประมาณ 0.30 เมตร พื้นดินเป็นดินอัดแน่น ปรับพื้นที่ให้มีความลาดชัน 1: 1000 และรองพื้นด้วยทรายหยาบสูง 20 เซนติเมตรเสมอ กันทั้งแปลง และปรับให้พื้นทรายด้านบนมีความลาดชัน 1: 1000 เพื่อให้ น้ำเสียไหลในอัตราที่เหมาะสม ดินที่ใช้ส่วนบนเป็นดินผสมซึ่งมีส่วนดิน: ทราย เป็น 3: 1 และมีความหนา 50 เซนติเมตรเท่ากันทั้งแปลง ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากทำให้การยึดเกาะและการเจริญเติบโตของหญ้า และการเจริญของจุลินทรีย์ในดินอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสีย (สิทธิชัย, 2538) ในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสียนี้ จะทำการปล่อยน้ำเสียไหลเข้าแปลงทดลอง น้ำเสีย

จะไหลไปตามระยะทางในแนวระดับของพื้นที่แปลงที่มีความลาดเอียง นอกจากนี้ น้ำเสียจะไหลในแนวตั้ง โดยผ่านรากหญ้า และชั้นดิน ซึมลงสู่ชั้นทรายและไหลไปตามชั้นทราย ในขั้นตอนนี้น้ำเสียจะได้รับการบำบัดทั้งในแนวระดับและแนวตั้ง ทั้งการเพิ่มออกซิเจนจากพืชและบรรยากาศ และกระบวนการบำบัดต่างๆ ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ที่อาศัยตัวกลางคือจุลินทรีย์ ดิน และหญ้า โดยรากหญ้าและดินจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกรองน้ำเสีย รากหญ้ายังทำหน้าที่ดูดซึมสารปนเปื้อนในน้ำเสีย และเป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์ที่เป็นตัวบำบัดน้ำเสียอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำหลักการระบบนิเวศดินนา มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้หลักการที่ให้พื้นที่แปลงมีน้ำขังสลับกับการระบายน้ำออกจากแปลงให้แห้งซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีววิทยา ทำให้มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละประเภท การถ่ายทอดอิเล็กตรอนของสารต่างๆ ในดิน รวมทั้งการดูดซึมธาตุอาหารและโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยหญ้าภายในระบบ

### 5.2.2 กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสีย

กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสียจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกลไกของระบบนิเวศพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะตามธรรมชาติ โดยอาศัยกระบวนการกรองตามธรรมชาติ การตกตะกอน และกระบวนการต่างๆ ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เพื่อลดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสียจะอาศัยกลไกการบำบัด 2 ประการ คือ การนำหลักการของระบบนิเวศดินนา โดยการระบายน้ำเสียแบบการขังน้ำสลับแห้งมาประยุกต์ใช้ และใช้พื้นที่ลุ่มและตัดแปลงร่วมกับการปลูกพืชเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรอง ซึ่งต้องอาศัยตัวกลางที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ ดิน พืช หรือหญ้า และจุลินทรีย์ ทำหน้าที่ในการบำบัดร่วมกัน

### 5.2.3 หลักการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียแบบขังสลับแห้ง

หลักการบำบัดน้ำเสียของระบบหญ้ากรอง ได้ใช้หลักการของระบบ Flooding and drying system การระบายน้ำแบบขังน้ำสลับแห้ง โดยจะยึดหลักของระบบนิเวศดินนา มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และชีวภาพ ทั้งขณะการระบายน้ำออกเพื่อปล่อยให้ดินแห้งซึ่งจะเป็นสภาพที่มีออกซิเจน และขณะปล่อยน้ำเข้าแปลงและขังน้ำไว้จะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนและเกิดสภาวะรีดักชัน (Reduction) โดยจะมีผลดี และผลเสียต่อระบบนิเวศเมื่อดินมีการขังน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของดิน และปัจจัยที่ควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ เมื่อมีการขังน้ำและระบายน้ำออกปล่อยให้ดินแห้งบางส่วน (สิทธิชัย, 2538) ซึ่งหลักการขังน้ำที่กล่าวมานี้สามารถใช้เป็นหลักการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรองน้ำเสียได้ดังนี้



ก. การเกิดสภาพที่ไร้ออกซิเจน ดินขณะที่มีการขังน้ำจะเกิดการลดลงของออกซิเจนจนทำให้ไม่มีออกซิเจนในดิน โดยน้ำที่ขังอยู่บริเวณหน้าดินจะป้องกันออกซิเจนจากบรรยากาศไม่ให้ซึมผ่านลงไปดินได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของโมเลกุลออกซิเจนผ่านน้ำจะช้ากว่าในอากาศมากกว่า 10,000 เท่า จากนั้นดินจะอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจน และออกซิเจนเดิมที่ถูกกักไว้ตามช่องดินที่ถูกน้ำท่วมขัง จะถูกจุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจน (Aerobic microorganism) และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในสภาพที่มีหรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ (Facultative microorganism) นำมาใช้เพื่อการหายใจจนหมดไปอย่างรวดเร็ว จากนั้นจะเกิดการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่นๆ ในดิน โดยการสะสมและค่อยๆ เพิ่มความกดดันจนเกิดเป็นฟองสูญหายไปจากดินได้ องค์ประกอบของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไปในดินที่ขังน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางจุลเคมี และชีวภาพของระบบได้ (ไพบูลย์, 2528)

ข. การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกี่ยวข้องในระบบบำบัด ในช่วงที่มีน้ำท่วมขังจะทำให้ออกซิเจนหมดไปเนื่องจากถูกจุลินทรีย์ชนิดที่ต้องการออกซิเจนใช้ไปอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจุลินทรีย์ดังกล่าวจะหยุดกิจกรรมและชะงักการเจริญเติบโต ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน และจุลินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกซิเจนเลยจะสามารถมีกิจกรรมต่อไปได้โดยใช้สารประกอบต่างๆ ในดินซึ่งมีระดับออกซิเดชันสูงเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งได้มาจากอินทรีย์วัตถุก่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันต่างๆ สารประกอบอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในดินนั้นได้แก่ไนเตรต ( $\text{NO}_3^-$ ) แมงกานีส (IV) ออกไซด์ ( $\text{MnO}_2$ ) เฟอริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) และสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งได้มาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆ ตามลำดับ ทาง Thermodynamic และสมการต่างๆ ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่เคมีพลศาสตร์ของการเกิดรีดักชัน ชนิด ตลอดจนปริมาณของสารที่ได้จากการเกิดรีดักชันขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้ง 5 ประการ ได้แก่ธรรมชาติและปริมาณอาหารของจุลินทรีย์ (อินทรีย์วัตถุ) หรือตัวให้อิเล็กตรอน อุณหภูมิ พีเอช ปริมาณและชนิดของตัวรับอิเล็กตรอน และระยะเวลาที่มีน้ำแช่ขัง (สิทธิชัย, 2538)

ค. การประยุกต์การเปลี่ยนแปลงของดินนาขังน้ำเพื่อใช้ในระบบบำบัด ในสภาวะที่ดินถูกน้ำขังจะทำให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนในดิน จะทำให้คุณสมบัติของดินเปลี่ยนไปโดยการ ลดลงของค่า Redox potential (Eh) ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และเมื่อมีการระบายน้ำออกให้ดินแห้งหรือการไม่มีน้ำขังทำให้ดินมีการถ่ายเทอากาศ จะทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชัน ดังนั้นการระบายน้ำขังน้ำสลับแห้ง จะทำให้เกิดสภาวะรีดักชันและสภาวะออกซิเดชันสลับกัน ซึ่งจะสามารถบำบัดน้ำเสียจากชุมชนได้โดยลดปริมาณของ BOD และเป็นที่ยึดซึมโลหะหนักต่างๆ จากน้ำเสียได้โดยร่วมกับพืชบางชนิดที่เติบโตได้ดีในสภาพน้ำขัง เช่น ธูปฤาษี กกกลม หนุ่ยคาล่า เป็นต้น และระบายน้ำออก



ให้ดินแห้งสลับกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแปรสภาพสารอินทรีย์ในโตรเจนในดินที่มีน้ำขังไปเป็นแอมโมเนียซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช เพราะการขาดออกซิเจนจะทำให้เกิดดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) (ไพบูลย์, 2528) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mitsui (1995) พบว่าการตากดินให้แห้งก่อนขังน้ำจะทำให้การปลดปล่อยแอมโมเนียสูงกว่าเดิมที่ขังน้ำอย่างเดียวถึง 2 เท่า รวมทั้งการที่ค่าพีเอชสูงถึง 8.5 จะเร่งการผลิตแอมโมเนียทั้งนี้เนื่องจากการจัดการดินก่อนการขังน้ำจะทำให้เกิดการส่งเสริมการเกิด Ammonification โดยฮิวมัสที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากคอลลอยด์ดิน (Harada et al., 1995) นอกจากนี้ระบบการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ดินในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโลหะหนักและธาตุอาหารพืชที่มีอยู่ในน้ำเสีย โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีปริมาณโลหะหนักและธาตุอาหารพืชที่ลดลง โดยธาตุอาหารที่ลดลงนั้นจะพบสะสมอยู่ในดินและพืช ส่วนโลหะหนักจะพบสะสมอยู่ในเฉพาะพืช (ปกรณ, 2540) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Kadlac (1962) ที่พบว่าในช่วงน้ำแห้งจะก่อให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุอาหารต่างๆ ที่วิกฤตในขณะที่ธาตุอาหารเหล่านั้นจะไม่เป็นประโยชน์กับพืชเลยภายใต้สภาวะน้ำท่วมขังอย่างถาวรจะอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน การที่น้ำท่วมขังสลับแห้งจะเหมาะสมกับพืชบางชนิด นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของประชากรจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ดินที่มีน้ำขังจะมีเสถียรภาพ ทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากผลการศึกษาต่างๆ จะเห็นว่าลักษณะการบำบัดน้ำเสียที่ใช้หลักการขังน้ำสลับการแห้งน้ำในพื้นที่บำบัด สามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงพิจารณานำมาใช้กับวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย

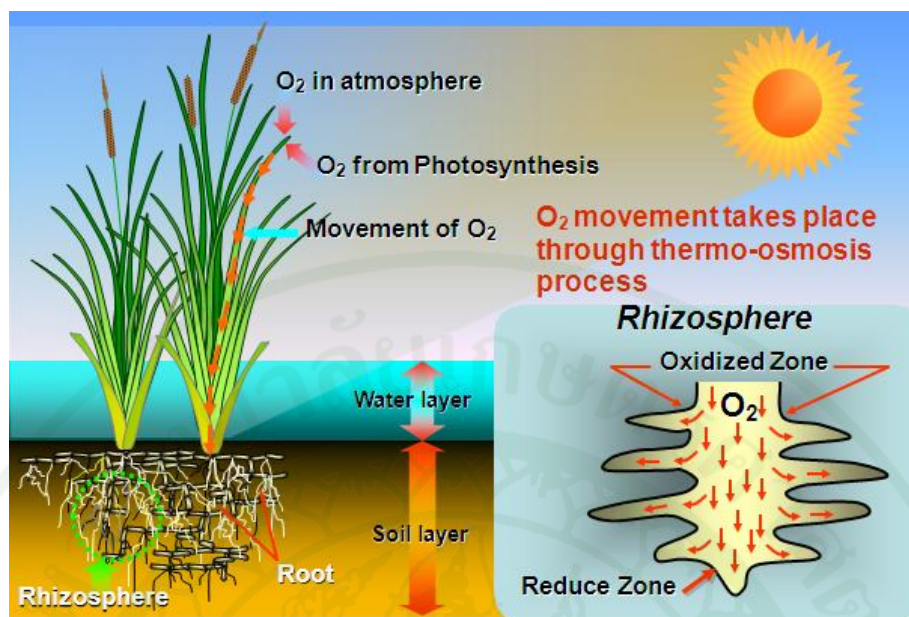
#### 5.2.4 การใช้พืชเพื่อกำจัดมลสารในน้ำเสีย

แปลงบ่อบำบัดน้ำเสียเปรียบเสมือนการจำลองระบบนิเวศพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะระบบหนึ่งที่มีความสมดุลของมวลภายในระบบโดยมีการหมุนเวียนของธาตุอาหาร มีการสะสมและเปลี่ยนรูป (transformer) และสารต่างๆ อย่างสมดุล โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือกำจัดสารพิษและสารที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำ ให้อยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ เช่น เปลี่ยนฟอสฟอรัสและไนโตรเจน ไปเก็บไว้ในตะกอนดินและสิ่งมีชีวิตหรือถูกใช้โดยสิ่งมีชีวิต

หญ้าเป็นพืชที่มีความสามารถในการบำบัดและกำจัดธาตุอาหาร เพราะหญ้าสามารถดูดเอาธาตุอาหารในรูปไอออนต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งต่อไปใช้ในการสังเคราะห์ให้เป็นสารอินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตและทำหน้าที่เป็นที่เกาะของจุลินทรีย์บางชนิดที่ช่วยในการย่อยสลายสารต่างๆ ในดินด้วย

นอกจากพืชจะมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว แต่ถึงอย่างไรการคัดเลือกพืชที่เหมาะสมก็เป็นอีกข้อจำกัดหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ โดยสรุปคุณสมบัติของพืชที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (พัฒน์, 2536) มีดังนี้

- ก. มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง
- ข. มีความทนทานต่อโรคและแมลง
- ค. มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสารต่างๆ ได้ดี
- ง. สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของสารพิษได้กว้าง
- จ. สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ในท้องถิ่นนั้น นอกจากนี้ยังต้องสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง
- ฉ. มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนได้สูง พืชจะนำเอาออกซิเจนจากบรรยากาศส่งผ่านมาตามใบ ลำต้น และราก (ภาพที่ 19) เช่น พืชจำพวกธูปฤาษีจะมีชั้นรากหนาประมาณ 30 เซนติเมตร และรากพืช กก แผลก จะหยั่งลึกลงถึง 70 เซนติเมตร ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเพิ่มออกซิเจน
- ช. สะดวกต่อการจัดการโดยเฉพาะการนำพืชออกจากระบบ เนื่องจากพืชสามารถลดปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ผลดี พืชจะต้องถูกนำออกจากระบบบ้างโดยไม่ผลต่อการเจริญของพืชที่เหลือ ไม่ทำให้พืชอยู่อย่างหนาแน่นเกินไปจนระบบขาดประสิทธิภาพ



ภาพที่ 25 พืชในระบบที่ลุ่มชื้นแฉะ สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงที่ระบบรากในสภาวะที่ไร้อากาศ

ที่มา: โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (2550)

การใช้พืชที่มีอยู่ตามธรรมชาติในการบำบัดน้ำเสียจะมีข้อดี เพราะได้มีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพภูมิอากาศ และสภาพดินและมีแนวโน้มที่จะประสบความสำเร็จในการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ลุ่มชื้นแฉะที่ถูกตัดแปลง พืชที่นำมาจากแปลงอื่นมักจะตายหรือเติบโตช้าและบางทีอาจเป็นปัญหาให้กับแหล่งน้ำตามธรรมชาติ (Hermer and Bastian, 1989)

## 6. พืชที่ใช้เป็นพืชบำบัดในระบบหมุนเวียนน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

### 6.1 ต้นกกกลม

ชื่อสามัญ คือ Egyptian paper plant, Papyrus, Egyptian paper reed

ชื่อท้องถิ่น คือ กกต้นกลม, กกขนาก, หญ้าลังดา, กกดอกแดง

### 6.1.1 การจัดอนุกรมวิธานของกกกกลม



ภาพที่ 26 ลักษณะของต้นกกกกลม *Cyperus corymbosus* Rottb.

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

กกกกลมเป็นวัชพืชนิดหนึ่งมีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้ (จเร, 2538)

Kingdom Plantae

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Order Poales

Family Cyperaceae

Genus *Cyperus*

Species *corymbosus*

### 6.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

กกกกลมหรือกกจันทบูรน์ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cyperus corymbosus* Rottb. ชื่อสามัญคือ Sedge จัดอยู่ในตระกูล CYPERACEAE เป็นไม้ล้มลุก (herb) และเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวพบ



กระจายอยู่ทั่วโลก มีประมาณ 4,000 ชนิด ชอบที่ชื้นและ ขึ้นในที่ระดับต่ำตามหนอง บึง ทางระบาย  
 คันคูน้ำและโคลนเลน ใน 46 ประเทศจัดกเป็นวัชพืชในนาข้าว สำหรับกกทราย หรือกกหัวแดง  
 (*Cyperus iria*) พบใน 22 ประเทศ มีหลายชนิดใช้เป็นอาหาร เช่น *Eleocharis toberosa* และ *Scirpus*  
*toberosus* และหลายชนิดใช้สานเสื่อทำกระจาด กระเช้า หมวก เช่น *Scirpus mucronatus*, *Lepironia*  
*mucronata*, *Carex brizoides* เป็นต้น



ภาพที่ 27 ลักษณะของกกในแบบชนิดอื่นๆ

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

### 6.1.3 ลักษณะทั่วไปของกก

ใบ (Foliage): ใบเดี่ยว ลดรูปเป็นเกี๊ยวหรือแผ่นสีน้ำตาล เรียงตัวเป็นกระจุกสาม  
 ระนาบรอบโคนต้น

ผล (Fruit): ผลแห้ง รูปรีหรือรูปไข่ กว้าง 0.4-0.5 มิลลิเมตร ยาว 0.9-1 มิลลิเมตร  
 สีเหลืองอมน้ำตาล เปลือกแข็ง มีเมล็ดเดี่ยว

ลำต้น: กกมักมีลำต้นตัน (solid) และเป็นสามเหลี่ยมหรือสามมุม (three-angled) บางชนิดมีผนังกันแบ่งเป็นห้องๆ (septate) มีกาบใบอยู่ชิดกันมาก และที่สำคัญคือเกือบไม่มีลิ้นใบ (ligule) บางชนิดไม่มีเลย



ภาพที่ 28 ลักษณะต้นและดอกกก

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

ดอก (Flower): สีนํ้าตาลปนแดง ออกเป็นช่อ แบบช่อซี่ร่มย่อยที่ปลายกิ่ง ช่อดอกแตกแขนงย่อย 100-200 แขนง ยาว 12-30 เซนติเมตร มีใบประดับรองรับช่อดอก 4-10 ใบ กว้างประมาณ 15 มิลลิเมตร ยาว 15-35 เซนติเมตร แต่ละแขนงมีดอกย่อยช่อละ 20-30 ดอก ดอกย่อยมีกาบหุ้มกว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร ยาว 1.5-2 มิลลิเมตร ดอกย่อยบานเต็มที่กว้าง 1.5-2 มิลลิเมตร ช่อดอกกกจะเกิดที่ปลายลำต้นเป็นหลายแบบ เช่น panicle, umbel หรือ spike และมีดอกขนาดเล็กเป็นทั้งดอกที่สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์เพศ โดยมีดอกรวมเรียกว่า spikelet ซึ่งประกอบด้วยดอกย่อย หนึ่งหรือหลายดอก แต่ละดอกมี glume หรือรี้วประดับ รองรับ ส่วนกลีบดอกนั้นไม่มี หรืออาจมีแต่เปลี่ยนรูปร่างไปเป็นเกล็ด (scale) หรือขนแข็งเล็กๆ (bristle) ในดอกกกจะมีเกสรเพศผู้แยกกันอยู่ ส่วนเกสรเพศเมียจะมีก้านแยกเป็นสอง-สามแฉก หรือบางครั้งแยกเป็นสอง-สามเส้น และมีรังไข่อยู่เหนือกลีบดอก (superior) ภายในมีห้องเดียวและมีหนึ่งเมล็ด

#### 6.1.4 ชนิดของกก

1) Carex เป็นไม้ล้มลุกอายุหลายฤดู ลำต้นตั้งตรงเป็นสามเหลี่ยม บางชนิดมีไหลเลื้อยไปได้ดิน ใบเรียวยาวแคบช่อดอกมีทั้ง panicle, raceme และ spike มีดอกรวมหรือ spikelet ประกอบด้วย

ดอกย่อย (floret) เพียงดอกเดียว หรือ spikelet เท่ากับ floret มีทั้งดอกที่มีก้านและไม่มีก้านดอก และไม่มีกลีบดอกส่วนดอกเป็นดอกไม่สมบูรณ์เพศ หรือมีเพศแยกกันอยู่คนละดอก แต่อยู่ในช่อดอกเดียวกันและเกสรเพศผู้มี 3 อัน เนื่องจากกมมีลักษณะคล้ายหญ้า จึงทำให้มีผู้เรียกเป็นหญ้าด้วย แต่ความจริงแล้วน่าจะเรียกว่ากมมากกว่า ซึ่งจะได้แยกออกไปจากหญ้าได้บ้าง เช่น

- 1.1) หญ้าคมบาง (กกคมบาง) *Carex baccans* Nees
- 1.2) หญ้าคมบางเล็ก (กกคมบางเล็ก) *Carex indica* Linn.
- 1.3) หญ้าคมบางขาว (กกคมบางขาว) *Carex cruciata* Vahl
- 1.4) หญ้ากระทิง (กกกระทิง) *Carex thailandica* T. Koyama
- 1.5) หญ้าดอกดิน (กกดอกดิน) *Carex tricephala* boeck.



ภาพที่ 29 กกคมบาง

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

2) *Cyperus* เป็นไม้ที่มีอายุฤดูเดียวและหลายฤดู มีทั้งต้นตั้งตรง ลำต้นตันเป็นสามเหลี่ยม บางครั้งก็กลม ใบเหมือนใบหญ้า ใบที่อยู่แถบโคนต้นจะเปลี่ยนเป็นเกล็ดหรือแน่นห่อหุ้มโคนต้นและไหล ช่อดอกเกิดที่ปลายต้นเป็นหลายแบบ ดอกรวม (spikelet) ประกอบด้วยดอกย่อยดอกเดียวหรือหลายดอกและเป็นดอกที่สมบูรณ์เพศ มีเกสรเพศผู้ 1-3 อัน เกสรเพศเมีย 2-3 แฉก พืชสกุลนี้มีหลายชนิดเป็นวัชพืชเป็นสมุนไพร ประกอบยารักษาโรคเป็นอาหารและใช้ทำภาชนะเครื่องใช้ต่างๆ *Cyperus* ชนิดต่างๆ ได้แก่

2.1) กกขนาก *cyperus difformis* L. เป็นวัชพืชในนาข้าวและพืชไร่ ลักษณะคล้ายกกทั่วไป แต่ที่สังเกตง่ายคือ ดอกมีขนาดเล็กจะรวมกันอยู่เป็นกลุ่มคล้ายหัวกลมๆ



ภาพที่ 30 ลักษณะลำต้นและดอกกกขนาก

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

2.2) กกทรายหรือกกหัวแดง *Cyperus iria* เป็นวัชพืชพบในนาข้าวและพืชไร่เช่นเดียวกับกกขนาก ลักษณะที่เด่นของวัชพืชนี้คือรากมีสีแดงปนเหลือง ช่อดอกสีเหลือง กระจายกว้าง ใบประดับอันล่างสุดที่รองรับช่อดอกมีความยาวกว่าช่อดอก



ภาพที่ 31 ลักษณะลำต้นและดอกกกทราย

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

3) *Fimbristylis* เป็นไม้ล้มลุกอายุฤดูเดียวและหลายฤดู มีไหลสั้นๆ ลำต้นตั้งตรง มีทั้งต้นกลมและเป็นเหลี่ยม ใบรวมกันอยู่ที่โคนต้น ช่อดอกเกิดที่ปลายต้นคล้ายสกุล *Cyperus* มีดอกรวมประกอบด้วยดอกย่อย ตั้งแต่หนึ่งถึงหลายดอกและเป็นดอกที่สมบูรณ์เพศมีเกสรเพศผู้ 1-3 อัน เกสรเพศเมียมี 2-3 แฉก กกสกุลนี้ส่วนมากเป็นวัชพืช พวกที่ใช้เป็นสมุนไพรประกอบด้วยรักษาโรค เช่น กกรัดเขียด (หญ้าหนวดแมว) (*Fimbristylis milliaces* Vall) และกกหัวขอ (หญ้าหัวขอ) (*Fimbristylis*



*aestivalis* Vahl) ใช้ทาแผลงัดและแก้โรคผิวหนัง ตามลำดับ สำหรับพวกที่เป็นวัชพืชและพบบ่อยในนาข้าวและแปลงปลูกพืช เช่น กกเปลือยกระเทียมทราย (*Fimbristylis acuminata* Vahl) กกนึ่งหนู (*Fimbristylis dichotoma* Vahl) กกกุ๊กหมู (*Fimbristylis monostachyos* Hassk.)



ภาพที่ 32 ลักษณะกกในตระกูล Fimbristylis

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

4) *Scirpus* เป็นไม้อายุฤดูเดียวและหลายฤดูมีไหลใต้ดิน ลำต้นตั้งตรงเป็นเหลี่ยม บางครั้งเกือบกลม บางชนิดจมอยู่ใต้ดินหรือลอยที่ผิวน้ำ ใบมีรูปร่างแตกต่างกันออกไป บางครั้งก็ไม่มีช่อดอกเกิดที่ปลายต้น หรือบางครั้งเกิดที่ด้านข้างของลำต้นแต่ก่อนไปทางส่วนยอด ดอกรวมประกอบด้วยหลายดอกย่อย และเป็นดอกที่สมบูรณ์เพศมีเกสรเพศผู้ 1-3 อัน และเกสรเพศเมีย 2-3 แฉก พวกที่เป็นวัชพืชและรู้จักกันดีคือ กกสามเหลี่ยมหรือกกตะกรับ (*Scirpus grosus* L.) มีลำต้นตั้งตรง มีขนาดใหญ่และเป็นสามเหลี่ยม ผิวลำต้นเรียบเป็นมัน ช่อดอกเกิดที่ปลายต้น



ภาพที่ 33 ลักษณะกกลังกา

ที่มา: ภาควิชาพืชศาสตร์ (2550)

#### 6.1.5 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

กกกลมเป็นวัชพืชน้ำ (aquatic weeds) เจริญเติบโตอยู่ในน้ำ ริมน้ำ หรือตามตลิ่งน้ำ ช้างต่างๆ บริเวณที่มีน้ำตื้นๆ โดยที่เป็นวัชพืชที่โผล่เหนือน้ำมีรากและลำต้นเจริญอยู่ในดินใต้น้ำ แล้ว ส่วนของใบและดอกขึ้นมาเจริญเหนือน้ำ กกกลมสามารถแพร่กระจายทั่วประเทศไทย และพบ ขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ โดยเฉพาะแถบจังหวัดจันทบุรี ตราด ระยอง

#### 6.1.6 การใช้ประโยชน์

ในปัจจุบันกกกลมเป็นพืชที่ได้มีการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในลักษณะพื้นที่ ชุ่มชื้นและแฉะ เช่น ใช้ในโครงการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติ ตามแนวพระราชดำริ หนองหาร จังหวัดสกลนคร ร่วมกับพืชชนิดอื่นๆ (ลักษณี, 2539) ทั้งนี้ สุจินต์ (2539) และ Buddhawong (1996) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกกกลม โดยใช้ต้นกกกลมในการบำบัดน้ำเสียชุมชนและบำบัดโครเมียม ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน จากการใช้กกกลมในการบำบัด น้ำเสียดังกล่าวนั้น พบว่า สามารถลดปริมาณสารปนเปื้อนต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียได้ดี

กกกลมถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทั้ง เช่น ในโครงการบำบัดน้ำทั้ง โดยวิธี ธรรมชาติตามแนวพระราชดำริหนองหาร จังหวัดสกลนคร และโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนา สิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี เป็นต้น ส่วนของลำต้นเมื่อ นำมาตากแดดสามารถนำมาทำหัตถกรรม ภาชนะเครื่องใช้ เช่น ท่อเสื่อ ตลอดจนนำมาเผาเป็นถ่าน

เพื่อใช้เป็นวัสดุคลุมดินแบบต่างๆ ส่วนดอกและใบสามารถใช้ทำเชื้อกระดาก (สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2553)

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

#### 6.1.7 การขยายพันธุ์กก

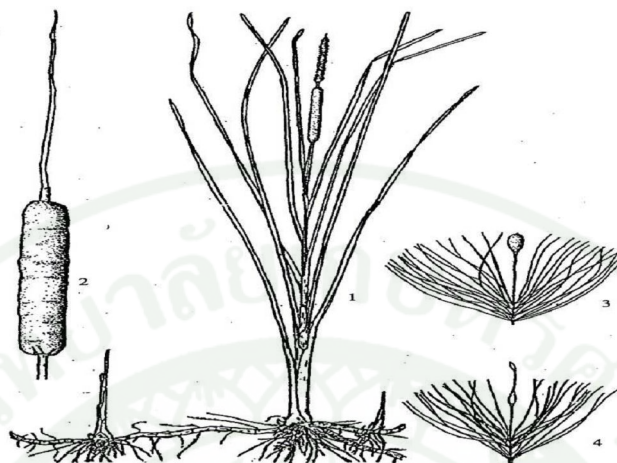
ขยายพันธุ์ด้วยหน่อหรือลำต้น เป็นพืชที่ชอบขึ้นตามหนองน้ำ คลอง บึง นา Лугุมที่มีน้ำขัง เจริญงอกงามดีในดินโคลนสีดำ ดินเหนียว และดินร่วนปนทราย การปลูกกกจะได้ผลดีจะต้องมีการเตรียมดินที่ดี การปลูกกกนิยมปลูกในฤดูฝน ประมาณเดือนพฤษภาคม- มิถุนายน โดยใช้หน่อของต้นกกมาตัดส่วนบนของลำต้นให้เหลือประมาณ 30 เซนติเมตร

#### 6.2 ต้นธูปฤาษี

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

ชื่อท้องถิ่น คือ ธูปฤาษี (กรุงเทพฯ), กกช้าง (กลาง), หญ้าสลาบลวง (เหนือ), เพื้อ, หญ้าเพื้อ, ปรีอ, หญ้าปรีอ และหญ้ากกช้าง (ดวงพร และรังสิต, 2544)

### 6.2.1 การจัดอนุกรมวิธานของรูปถ่าย



ภาพที่ 34 รูปถ่าย *Typha angustifolia* Linn.

ที่มา: สุชาดา (2542)

รูปถ่ายเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งมีการจัดอนุกรมวิธานดังนี้

Division Magnoliophyta

Class Liliopsida

Subclass Commelinidae

Order Typhales

Family Typhaceae

Genus *Typha*

Species *angustifolia*

### 6.2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ รูปถ่ายเป็นพืชอวบน้ำอายุหลายปี ขึ้นในที่ลุ่มมีน้ำขัง เจริญตั้งตรงเป็นกอสูงประมาณ 1-2 เมตร มีลำต้นใต้ดินเรียกว่า เหง้า ซึ่งสามารถแตกเป็นกอใหม่ได้ ใบเป็นใบเดี่ยวแบนเรียบเรียวยาวแหลม ความกว้างของใบประมาณ 5-8 มิลลิเมตร ยาวมากกว่า 1 เมตร กลางใบมีลักษณะเซลล์ที่มีความยืดหยุ่นเหมือนฟองน้ำ โคนใบแผ่เป็นกาบประกบกัน กาบใบด้าน



ในมีเมือกเหนียว ดอกออกเป็นช่อแบบสไปค์ (spike) ช่อดอกกลมคล้ายรูป ดอกตัวผู้กับดอกตัวเมีย จะแยกกันอยู่คนละส่วนในช่อดอกเดียวกัน คือส่วนที่เป็นดอกตัวผู้อยู่ด้านบนของช่อดอก ดอกย่อย อยู่กันหลวมๆ รอบก้านช่อดอก มีความยาว 15-30 เซนติเมตร ส่วนล่างเป็นดอกตัวเมีย ดอกย่อยเรียง ตัวอัดกันแน่นความยาวช่อดอก 7-28 เซนติเมตร เมล็ดขนาดเล็กกว้าง 0.2-0.3 มิลลิเมตร ยาว 0.5-1.0 มิลลิเมตร เมล็ดมีขนสั้นละเอียด สีขาวคล้ายไหม (silky) ปกคลุม ปลายทั้งสองด้านเรียวยาวโดยปลาย ด้านหนึ่ง มีหางหรือเส้นยาวยื่นออกมาจากเมล็ด มีลักษณะเป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขน (สุรชัย, 2538; ดวงพรและรังสิต, 2544; อำพล, 2544)

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

### 6.2.3 ลักษณะทางนิเวศวิทยา

รูปถ่ายจัดเป็นวัชพืชใน กลุ่มวัชพืชชายตลิ่ง มีถิ่นกำเนิดในทวีปยุโรปและอเมริกา แพร่กระจายทั่วไปในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และยังพบได้ในอเมริกาเหนือ และชายฝั่งแปซิฟิก สำหรับประเทศไทยนั้นพบขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เช่น ในบริเวณหนองน้ำ บึง นาข้าว ร่องน้ำข้างถนน และอ่างเก็บน้ำ เป็นต้น ต้นรูปถ่ายที่อยู่ในเขตที่ลุ่มจะมีการเจริญเติบโต ได้ตลอดทั้งปี ขยายพันธุ์โดยเหง้า และเมล็ด ออกดอกตั้งแต่เดือนสิงหาคมเป็นต้นไปช่อดอกมี ลักษณะ คล้ายก้านรูปขนาดใหญ่สีน้ำตาล มีเมล็ดประมาณ 20,000-700,000 เมล็ด เมื่อเมล็ดแก่จัดจะเริ่มแตก เป็นปุยสีขาวคล้ายปุยขนและปลิวกระจายทั่วไป ในสภาพที่มีแสงจัดเมล็ดสามารถงอกและเจริญเติบโต อย่างรวดเร็วจนมีจำนวนหนาแน่นทำให้ลดปริมาณแสงที่ส่องลงมาด้านล่าง เป็นการขัดขวางการ เจริญของพืชชนิดอื่น (อำไพ, 2538; อำพล, 2544) นอกจากนั้นยังสามารถเจริญเติบโตในสภาพดิน และน้ำที่มีความเค็มสูงได้ (Wilcox, 1996)

รูปถ่าย ถือเป็นวัชพืชนิดหนึ่งที่ทำให้ความเสียหายต่อสภาวะแวดล้อมและการใช้ ประโยชน์จากแหล่งน้ำ เช่น กีดขวางทางไหลของน้ำทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ความจุน้ำลดลง ทำให้น้ำ มีกลิ่นเหม็น หรือน้ำที่เก็บกักไว้ใช้มีสีผิดปกติเป็นอุปสรรคต่อการใช้น้ำและการพักผ่อนหย่อนใจ การควบคุมและกำจัดวัชพืชนิดนี้ทำ ได้หลายวิธี เช่น ตัด เผา ควบคุมและใช้สารเคมี อย่างไรก็ตาม การควบคุมและกำจัดด้วยวิธีการดังกล่าวไม่สามารถทำให้ต้นรูปถ่ายหมดไปจากพื้นที่ได้ เนื่องจาก

กำจัดได้เฉพาะส่วนที่อยู่เหนือน้ำเท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการนำ รูปถ่ายมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้แก่ใช้เป็นอาหารสัตว์ทำเครื่องจักรสาน บำบัดน้ำเสีย ใช้เป็นเชื้อเพลิง และปุ๋ยหมัก เป็นต้น

#### 6.2.4 การใช้ประโยชน์

รูปถ่ายสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ส่วนของลำต้นและใบ สามารถนำมาเป็นวัสดุปลูกหลังคา ทำตะกร้า ทำเชือก เครื่องสาน เครื่องใช้ได้แก่ เสื่อ เก้าอี้ อย่างไรก็ตาม พบว่า รูปถ่ายนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ แต่หากไม่ควบคุมแล้วจะกลายเป็นตัวทำลายพื้นที่ชุ่มน้ำได้ เนื่องจากเจริญเติบโตแทนที่พืชที่เป็นอาหารสัตว์ต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว และการควบคุมสามารถทำได้โดยการถ่ายน้ำออกจากพื้นที่ การตัดต้นรูปถ่ายสามารถลดความหนาแน่น ต่อพื้นที่เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณ

รูปถ่ายมีลักษณะใบยาวและเหนียวนิ่มใช้ทำเครื่องจักสาน เช่น เสื่อ ตะกร้า ใช้ปลูกหลังคา และทำเชือก ดอกแก่จัดมีขนปุยนุ่มมีลักษณะคล้ายปุยขนุนจึงนิยมนำมาใช้แทนขนุน ยอดอ่อนกินได้ทั้งสดและทำให้สุก ซ่อดอกปิ้งกินได้ แป้งที่ได้จากลำต้นได้ดินและรากใช้บริโภคได้เช่นกัน ในอินเดียเคยใช้ก้านช่อดอกทำปากกา และเชื่อว่าลำต้นได้ดินและรากใช้เป็นยาบำบัดโรคบางชนิด เช่น ขับปัสสาวะ เยื่อ (pulp) ของต้นนำมาใช้ทำใยเทียม (rayon) และกระดาษได้ มีเส้นใย (fibre) ถึงร้อยละ 40 เส้นใยนี้มีความชื้นร้อยละ 8.9 เซลลูโลส (cellulose) ร้อยละ 63 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ร้อยละ 8.7 ลิกนิน (lignin) ร้อยละ 9.6 ไข (wax) ร้อยละ 1.4 และเถ้า (ash) ร้อยละ 2 เส้นใยมีสีขาวหรือน้ำตาลอ่อน นำมาทอเป็นผ้าใช้แทนฝ้ายหรือขนสัตว์ สามารถนำมาใช้เป็นพืชคลุมดิน เพื่อลดการพังทลายของหน้าดิน เนื่องจากมีระบบรากที่ดี มีปริมาณโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตค่อนข้างสูง กากที่เหลือจากการสกัดเอาโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตออกแล้วใช้แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) ย่อยจะให้แก๊สมีเทน (methane) ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ผลมี long chain hydrocarbon 2 ชนิด คือ pentacosane 1-triacontanol สารพวก phytosterol 2 ชนิด คือ B-sitosterol และ B-sitosteryl-3-O-B-D-glucopyranoside นอกจากนี้สามารถกำจัดไนโตรเจนจากน้ำเสียในทีละม่อไร้ได้ถึง 400 กิโลกรัมต่อปี และสามารถดูดเก็บโพแทสเซียมต่อไร่ได้ถึง 690 กิโลกรัมต่อปี จึงเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งที่จะมีบทบาทเป็นพืชเศรษฐกิจในอนาคต (วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 2556)

#### 6.2.4 การขยายพันธุ์รูปถาปี

การขยายพันธุ์รูปถาปี จะใช้วิธีเดียวกับกกกลม คือ ขยายพันธุ์ด้วยหน่อหรือลำต้น ซึ่งรูปถาปีเป็นพืชที่ชอบขึ้นตามหนองน้ำ คลอง บึง นาทุ่งที่มีน้ำขัง เจริญงอกงามดีในดินโคลนสีดา ดินเหนียว และดินร่วนปนทราย การปลูกกกจะได้ผลดีจะต้องมีการเตรียมดินที่ดี การปลูกกกนิยม ปลูกในฤดูฝน ประมาณเดือนพฤษภาคม- มิถุนายน โดยใช้หน่อของต้นมาตัดส่วนบนของลำต้นให้ เหลือประมาณ 30 เซนติเมตร จากนั้นปักลงในบริเวณที่มีน้ำขุ่นและ

#### 7. ระบบนิเวศรอบรากพืช

ราก (root) เป็นอวัยวะที่สำคัญของพืชที่ทำหน้าที่ในการดูดน้ำและแร่ธาตุที่สามารถละลาย น้ำได้ไปเลี้ยงลำต้นช่วยให้พืชมีการเจริญเติบโตและพัฒนาได้เป็นปกติ ทำหน้าที่ยึดลำต้นให้ติดอยู่ กับพื้นดินและยังเป็นแหล่งสำคัญในการผลิตฮอร์โมนพืชหลายชนิด เช่น ไซโทไคนินและจิบเบอเรลลิน ซึ่งจะถูกลำเลียงไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของส่วนลำต้น ส่วนยอดและส่วนอื่นๆ ของพืช นอกจากนี้รากพืชยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบราก ได้แก่ จุลินทรีย์ ไส้เดือนและสัตว์ต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันจนเกิดเป็นระบบนิเวศรอบ ราก (สมบุญ, 2537)

ระบบนิเวศรอบรากพืช (rhizosphere) หมายถึง อาณาบริเวณในดินที่รากพืชมีอิทธิพลแผ่ไป ถึงเป็นบริเวณที่มีกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินมากและจะแตกต่างจากบริเวณภายนอกของระบบราก อย่างมาก (วิทยา, 2526) ถูกใช้ครั้งแรกโดย Hiltner ในปี ค.ศ. 1904 โดย Hiltner ใช้อธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างแบคทีเรียที่สามารถตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation bacteria) กับการเข้าสร้างปมบริเวณ รากกับ พืชตระกูลถั่ว (Sylvia et al., 1998) โดยทั่วไปบริเวณรอบรากพืชจะมีอาณาเขตจากบริเวณผิว ราก (rhizoplane) ขึ้นออกมาถึงบริเวณดินรอบรากประมาณ 5 มิลลิเมตร (Maier et al., 2000) ซึ่งใน บริเวณดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์กันระหว่างรากพืช สารอินทรีย์ อนินทรีย์ดินและจุลินทรีย์ชนิด ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดแต่ในพืชบางชนิดอาจมีอาณาเขต บริเวณรอบรากมากกว่า 5 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากรากพืชแต่ละชนิดจะปลดปล่อยสารอาหาร (root exudates) บางชนิดออกมาในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งสารดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดขนาดของบริเวณ รอบรากพืช ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเหนี่ยวนำแบคทีเรียชนิดต่างๆ ให้เข้ามาอยู่อาศัยในดินบริเวณ รอบรากพืช จึงส่งผลให้สภาพแวดล้อมของดินบริเวณรอบรากแตกต่างจากดินทั่วไป แบคทีเรียที่ เจริญอยู่บริเวณรอบรากพืชจะมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยจะเป็นตัวแปรสภาพสารอินทรีย์

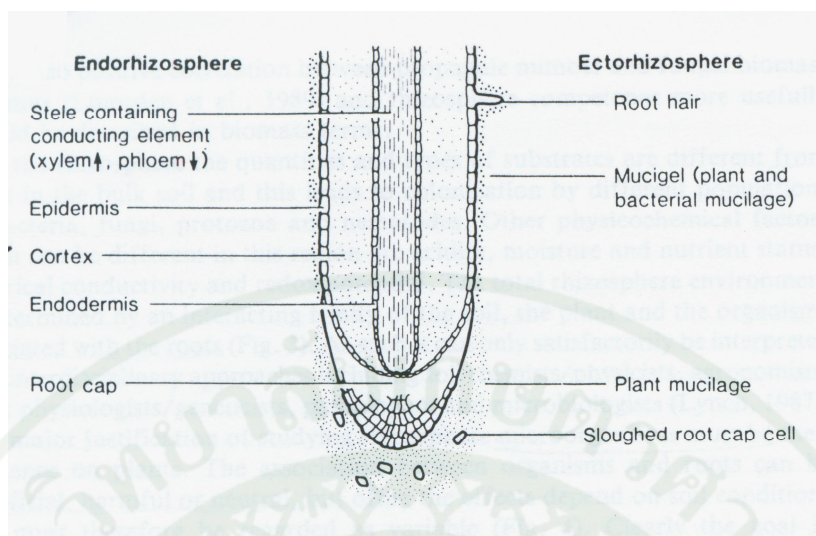
ให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้แต่ก็มีแบคทีเรียบางชนิดที่อาศัยอยู่บริเวณรอบรากพืชและสามารถก่อโรคต่อพืชได้เช่นกัน (Sylvia et al., 1998)

แบคทีเรียที่มีบทบาทต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ แบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบรากพืช โดยเฉพาะแบคทีเรียที่อาศัยอยู่กับรากพืช (rhizobacteria) จะสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ เรียกว่า plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) เช่นจากการศึกษาของ Difuza and Gisela (2003) ได้ทำการเพาะเชื้อ *Pseudomonas fluorescens* PsIA12, *Pantoea agglomerans* 050309 และ *Mycobacterium* sp. ลงไปยังบริเวณรอบรากพืชพบว่าสามารถทำให้พืชดังกล่าวมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและยังเพิ่มความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารของพืชอีกด้วยและเป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วแต่จะมีความหลากหลายน้อยกว่าแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบราก (rhizosphere soil) และแบคทีเรียในดินบริเวณรอบนอก (non rhizosphere soil) แบคทีเรียที่อาศัยอยู่กับรากพืชมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับแบคทีเรียที่พบทั้งหมดในดินบริเวณรอบรากพืช แสดงให้เห็นว่ามีแบคทีเรียเฉพาะบางชนิดเท่านั้นที่สามารถเข้าไปอาศัยอยู่กับรากพืชได้ (Blaine, 1993)

#### 7.1 การจัดแบ่งอาณาบริเวณระบบนิเวศรอบรากพืช

การจัดแบ่งอาณาบริเวณระบบนิเวศรอบรากพืช สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ อาณาบริเวณรากส่วนใน (endorhizosphere) และอาณาบริเวณรากส่วนนอก (ectorrhizosphere) (Lynch, 1990) โดยในแต่ละส่วนจะมีโครงสร้างและหน้าที่ที่แตกต่างกันดังนี้ (ภาพที่ 35)





ภาพที่ 35 อาณาบริเวณระบบนิเวศรอบรากพืช

ที่มา: Lynch (1990)

#### 7.1.1 อาณาบริเวณรากส่วนใน

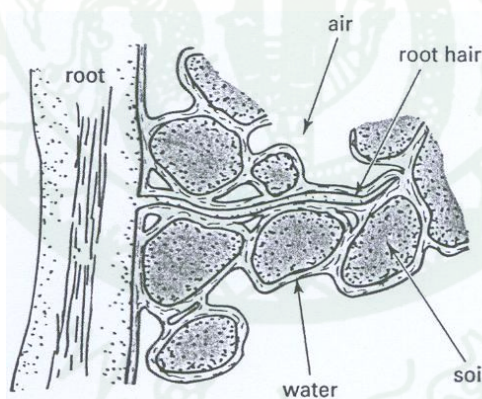
อาณาบริเวณรากส่วนใน คือ บริเวณภายในรากพืช ประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อเจริญที่มีการแบ่งตัวควบคุมการขยายขนาดของเซลล์มีผลทำให้รากยาวและถูกดันลงไปในดิน โดยจะมีหมวกกราก (root cap) คลุมอยู่ที่บริเวณปลายราก มีลักษณะชุ่มชื้นหรือชุ่มเป็นเมือกเพื่อช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นให้ดิน ซึ่งจะง่ายต่อการชอนไชและยังช่วยป้องกันเนื้อเยื่อเจริญที่อยู่ถัดเข้าไปไม่ให้ได้รับอันตรายหรือถูกขาดขณะที่รากชอนไชลงสู่ดิน นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งอาหารแก่จุลินทรีย์ เนื่องจากเมือกที่ผลิตจากหมวกกรากมีส่วนประกอบของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนชนิดต่างๆ (Lynch, 1990) และในขณะที่เนื้อเยื่อเจริญเคลื่อนลงสู่ส่วนปลายราก (ตลอดเวลา) เซลล์ตอนบนจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงและพัฒนาไปเป็นเนื้อเยื่อถาวร ได้แก่ เอพิเดอร์มิส คอร์เท็กซ์ เอนโดเดอร์มิส ไชเลมและโฟลเอ็ม เป็นต้น ซึ่งแต่ละเนื้อเยื่อจะมีหน้าที่ที่ต่างกันออกไป

สำหรับอาณาบริเวณรากส่วนในจะพบความสัมพันธ์ระหว่างจุลินทรีย์กับรากพืชได้เช่นกันในรูปแบบของการดำรงชีวิตแบบถ้อยที่ถ้อยอาศัย (symbiosis) ระหว่างแบคทีเรียกับรากพืชชั้นสูง เช่น พืชตระกูลถั่วกับไรโซเบียม (สุกมาศ, 2529)

### 7.1.2 อาณาบริเวณรากส่วนนอก

อาณาบริเวณรากส่วนนอก คือ อาณาบริเวณตั้งแต่ผิวรากยื่นออกไปในดินรอบราก มีรัศมีประมาณ 5 มิลลิเมตรหรืออาจมากกว่านั้นในพืชบางชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืช อายุพืช และปัจจัยแวดล้อมต่างๆ (Sylvia et al, 1998 and Maier et al, 2000) โดยในอาณาบริเวณรากส่วนนอกสามารถเรียกได้อีกชื่อหนึ่ง คือ ระบบนิเวศรอบรากพืชเป็นส่วนของดินสัมผัสกับรากและจะมีกิจกรรมต่างๆ ของจุลินทรีย์เกิดขึ้นมากมาย ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1) ขนราก (root hair) ขนรากเป็นส่วนของเอพิดอร์มิสที่เปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยื่นยาวออกมาชอนไชไปตามอนุภาคดิน เพื่อทำหน้าที่ในการดูดน้ำและแร่ธาตุ (ภาพที่ 36) แต่การชอนไชของขนรากจะดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับเนื้อดิน น้ำในดิน อากาศในดิน ความเค็มและความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (Tsutomu, 1993) ขนรากจะมีอายุสั้นในพืชบางชนิดจะมีอายุเพียง 2-3 วันหรืออาจนานถึง 2-3 สัปดาห์ เมื่อขนรากอันเก่าสลายไปจะมีการสร้างขนรากขึ้นใหม่จากเซลล์ที่อยู่ในลำดับที่อยู่ใกล้กับปลายรากขึ้นมาเรื่อยๆ



ภาพที่ 36 ขนราก

ที่มา: Singer and Munns (1999)

2) เซลล์หวมรากที่หลุดออกมา (sloughed root cap cell) อาจในระหว่างที่รากชอนไชไปตามอนุภาคดินทำให้เซลล์หวมรากหลุดออกมา ซึ่งเซลล์ที่หลุดออกมดังกล่าวจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารอย่างดีสำหรับจุลินทรีย์

3) สารอาหารที่รากพืชปลดปล่อยออกมา (root exudates) รากพืชจะปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ มีโมเลกุลขนาดเล็กและมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ได้แก่ กรดอะมิโน น้ำตาลชนิดต่างๆ กรดอินทรีย์ โปรตีน โพลีแซคคาไรด์ วิตามินและ growth factors เป็นต้น ซึ่งจะส่งเสริมให้จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบรากและที่อาศัยอยู่บนผิวรากมีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน โดยโพลีแซคคาไรด์และน้ำตาลชนิดต่างๆ จะเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานให้กับจุลินทรีย์กลุ่ม heterotroph ซึ่งมีอาศัยอยู่มากในดินบริเวณรอบราก ส่วนโปรตีนและกรดอะมิโนชนิดต่างๆ จะเป็นแหล่งไนโตรเจนให้จุลินทรีย์ใช้เพื่อการเจริญเติบโต สำหรับกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่รากพืชปลดปล่อยออกมามีผลต่อระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินบริเวณรอบรากพืชทำให้เกิดการแปรสภาพของธาตุอาหารพืชในดินจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์เปลี่ยนไปเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ สารประกอบอินทรีย์เหล่านี้สามารถแบ่งออกได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ exudates secretions mucilages mucigel และ lysates (ตารางที่ 1) แต่สารประกอบอินทรีย์ที่รากพืชปลดปล่อยออกมามีความแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (Blaine, 1993) เช่น ชนิดพืช โดยในรากพืชแต่ละชนิดจะปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ออกมาในชนิดและปริมาณที่แตกต่างกันและจากการศึกษาของ Rovira (1996) พบว่าข้าวโอ๊ตจะปลดปล่อยกรดอะมิโนออกมา 22 ชนิด ส่วนถั่วเขียวจะปลดปล่อยกรดอะมิโนออกมา 14 ชนิด นอกจากนี้การเจริญเติบโตของพืชก็มีส่วนต่อการปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์เช่นเดียวกัน ขึ้นอยู่กับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ยิ่งพืชมีการสังเคราะห์แสงมากก็จะมี การปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ออกมามาก โดยคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชประมาณร้อยละ 5-60 จะผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ของเซลล์พืชและถูกปลดปล่อยออกมาทางราก (Walker et al., 2003) และจะมีการปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ออกมามากถ้ามีช่วงความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย (Janis et al., 2003) นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมอื่นๆ ยังมีผลต่อการปลดปล่อยสารจากรากได้ เช่น ความชื้นของดิน ถ้าดินแห้งมากจะทำให้ปากใบปิด การเคลื่อนที่ของสารอาหารจากใบสู่รากจะเกิดขึ้นช้าลง ซึ่งทำให้สารที่ขับออกจากรากลดลง แต่ถ้าดินอยู่ในสภาพน้ำท่วมขังก็จะทำให้ชนิดของสารที่ขับออกจากรากเปลี่ยนไป

ตารางที่ 1 กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่รากพืชปลดปล่อยออกมา

| สารประกอบอินทรีย์ | คุณสมบัติ                                                                                                                                                                                          |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Exudates          | เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไหลซึมออกมาจากเซลล์ราก โดยจะไม่ได้ผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ (non-metabolic process) มีมวลโมเลกุลต่ำ ได้แก่ น้ำตาลและกรดอะมิโนชนิดต่างๆ เป็นต้น                      |
| Secretions        | เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกขับออกมาจากเซลล์ราก โดยผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ (metabolic process)                                                                                             |
| Mucilages         | เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นเมือก ถูกขับออกมาจากกอลจิโบดี้ที่อยู่ภายในหดราก นอกจากนี้ยังเกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสสารประกอบโพลีแซคคาไรด์ของเนื้อเยื่อเอพิเดอร์มิสบริเวณหดราก โดยจุลินทรีย์ |
| Mucigel           | มีลักษณะเจลเคลือบอยู่บนผิวรอบราก ประกอบไปด้วย mucilages จุลินทรีย์ และสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ราก รวมทั้งธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดิน                                   |
| Lysates           | เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาจากเอพิเดอร์มิสบริเวณราก                                                                                                                                      |

ที่มา: Blaine (1993) and Sylvia et al. (1998)

7.2 ปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ในระบบนิเวศรอบราก (rhizosphere environment) เป็นปัจจัยภายนอกที่มีความสำคัญต่อระบบนิเวศรอบราก ได้แก่

7.2.1 ความชื้นจะมีผลโดยตรงต่อการเข้าอยู่อาศัยของเชื้อจุลินทรีย์ในดินบริเวณรอบราก เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในดินที่มีความชื้นต่ำจะทำให้การเข้าอยู่อาศัยของจุลินทรีย์ลดลง นอกจากนี้อัตราการแพร่ของสารที่ปลดปล่อยออกมาจากรากก็จะเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการแพร่ของธาตุอาหารพืชในดินก็จะลดน้อยลง แต่ไม่ได้หมายความว่าดินที่มีความชื้นสูงจะมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ดี เนื่องจากดินที่มีความชื้นสูง น้ำในดินจะไปแทนที่ออกซิเจนจนหมด



7.2.2 ออกซิเจนดินในบริเวณรอบรากพืชจะมีออกซิเจนแทรกอยู่ตามอนุภาคดินซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 5-15 (Tsutomu, 1993) จึงทำให้เกิดการขาดแคลนออกซิเจนได้ง่ายในกรณีที่ดินมีความชื้นสูง ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ของจุลินทรีย์

7.2.3 เนื้อดินเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง โดยถ้าเนื้อดินมีความพรุนจะทำให้รากพืชชอนไชไปในดินได้มาก โอกาสในการแพร่สารต่างๆ เพื่อเพิ่มอาณาบริเวณรอบรากก็มีมาก ส่งผลให้จุลินทรีย์เข้ามาอยู่อาศัยในบริเวณดังกล่าวมากไปด้วย

7.2.4 อุณหภูมิมีบทบาทต่อการเข้าอยู่อาศัยของจุลินทรีย์เช่นกัน โดยจุลินทรีย์จะเข้าอยู่ในดินบริเวณรอบรากต่อเมื่ออุณหภูมิดินบริเวณรอบรากต่ำกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดนั้นๆ (Sylvia et al., 1998)

7.2.5 ความเป็นกรดเป็นด่างซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมของรากพืชก็มีส่วนสำคัญต่อการเจริญของจุลินทรีย์ได้เช่นกัน โดยถ้ารากพืชดูดเอาไนเตรตไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต รากพืชจะปลดปล่อยคาร์บอนออกมา ส่งผลให้ดินมีความเป็นด่างเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อกลุ่มจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบราก

7.3 จุลินทรีย์บริเวณรอบรากพืช (rhizosphere microorganism) เนื่องจากบริเวณรอบรากพืชเป็นบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณรอบรากพืชมีด้วยกันหลายชนิด มีความแตกต่างกันในทางสรีรวิทยา สันฐานวิทยาและอนุกรมวิธาน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นของจุลินทรีย์สูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความใกล้ชิดราก ความลึกของดิน ชนิดของพืช อายุของพืชและสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยจากรากพืช ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *Bacillus* sp. และยังเป็นแบคทีเรียที่ต้องการกรดอะมิโนสำหรับการเจริญมากที่สุด (Andrew et al., 1996)

## 8. แบคทีเรียในดิน

ดินมีลักษณะเป็นวัสดุพูนที่มีทั้งอากาศ น้ำและธาตุอาหารต่างๆ จึงเป็นแหล่งธรรมชาติที่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีวิตและเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตมากมายตั้งแต่พืชและสัตว์ชนิดต่างๆ ตลอดจนจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย แอคติโนมัยซีท เชื้อรา สาหร่ายและไวรัส ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีทั้งชนิดและปริมาณมากและเป็นตัวที่ก่อให้เกิดกิจกรรมต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของดิน ตลอดจนสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมโดยเฉพาะแบคทีเรีย ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุด在地ดินประมาณ  $10^8$ - $10^9$  โคโลนีต่อกรัมดินแห้ง และเป็นจุลินทรีย์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง (activesurface area) สามารถพบในดินชั้นบนมากกว่าดินชั้นล่าง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544) ดังแสดงในตารางที่ 2

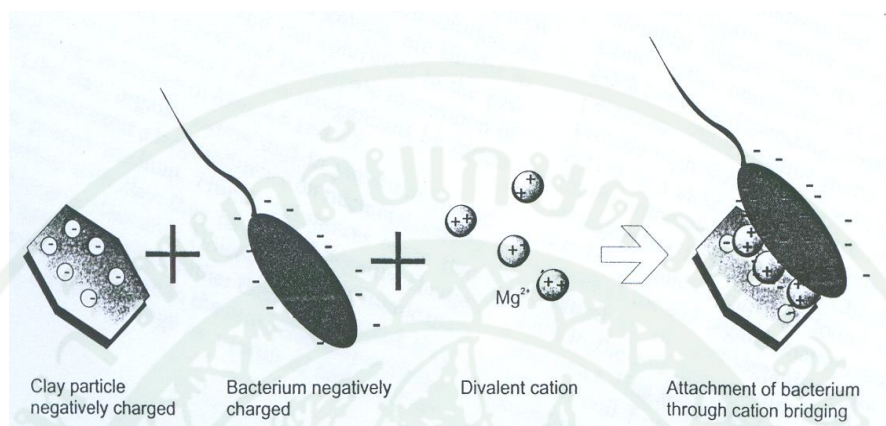
ตารางที่ 2 การกระจายตัวของจุลินทรีย์ในดินที่ระดับความลึกต่างๆ

| ความลึก<br>(ซม.) | แบคทีเรีย<br>(โคโลนี/กรัมดินแห้ง) | แอคติโนมัยซีท<br>(โคโลนี/กรัมดินแห้ง) | รา<br>(โคโลนี/กรัมดินแห้ง) | สาหร่าย<br>(โคโลนี/กรัมดินแห้ง) |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 3 - 8            | 9,750,000                         | 2,080,000                             | 119,000                    | 25,000                          |
| 20 - 25          | 2,179,000                         | 245,000                               | 50,000                     | 5,000                           |
| 35 - 40          | 570,000                           | 49,000                                | 14,000                     | 500                             |
| 65 - 75          | 11,000                            | 5,000                                 | 6,000                      | 100                             |
| 135 - 145        | 1,400                             | -                                     | 3,000                      | -                               |

ที่มา : Gerard et al. (2004)

นอกจากนี้แบคทีเรียยังเป็นจุลินทรีย์ที่มีรูปแบบการดำรงชีวิตที่หลากหลาย มีทั้งพวกที่ไม่เคลื่อนที่และเคลื่อนที่แต่ส่วนใหญ่จะยึดเกาะอยู่บนอนุภาคดินโดยอาศัยเอนไออนชนิดต่างๆ เป็นตัวกลาง (ภาพที่ 37) และเจริญเติบโตเป็นโคโลนีเล็กๆ หลายชนิดสามารถสังเคราะห์แสง บางชนิดสังเคราะห์สารอินทรีย์จากคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการกลายการสังเคราะห์แสงของพืชแต่ใช้พลังงานจากการออกซิไดส์สารอนินทรีย์แทน (chemoautotroph) บางชนิดสามารถเจริญเติบโตในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน (anaerobe) หรือบางชนิดสามารถทนต่อความเป็นกรดเป็นด่างของดินที่เป็นกรดจัด แบคทีเรียส่วนใหญ่ที่พบในดินส่วนมากจะเป็นพวกที่มีความสามารถในการย่อยสลาย

สารอินทรีย์ (heterotroph) จำพวกซากพืชซากสัตว์เป็นอาหาร (saprophyte) ดังนั้นแบคทีเรียจึงมีบทบาทสำคัญมากในระบบนิเวศของดิน เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและอินทรีย์สารต่างๆ ในดินได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)



ภาพที่ 37 การยึดเกาะของแบคทีเรียบนอนุภาคดิน

ที่มา: Maier et al. (2000)

### 8.1 แบคทีเรียที่พบในดิน

แบคทีเรียในดินอยู่ในคลาส Schizomycetes มี 10 ออเดอร์ แต่มีอยู่ 3 ออเดอร์ที่พบมาก และ มีบทบาทที่สำคัญต่อคุณสมบัติและปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในดิน ดังนี้ (สมศักดิ์, 2548)

#### 8.1.1 ออเดอร์ Pseudomonadales

แบคทีเรียในออเดอร์ Pseudomonadales มีลักษณะเซลล์เป็นท่อนสั้น ดิคส์แกรมลบ ไม่สร้างสปอร์ ต้องการออกซิเจนและสามารถสร้างเม็ดสีสีน้ำเงินหรือสีเขียวสะท้อนแสงได้ เช่น *Pseudomonas* sp.

### 8.1.2 ออเดอร์ Eubacteriales

แบคทีเรียในออเดอร์ Eubacteriales มีอยู่ 5 แฟมมิลี ได้แก่ แฟมมิลี Rhizobiaceae มีลักษณะเป็นท่อนสั้นดิดีแกรมลบ ไม่สร้างสปอร์ สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน เช่น *Rhizobium* sp., *Chromobacterium* sp. และ *Agrobacterium* sp. เป็นต้น แฟมมิลี Achromobacteriaceae มีลักษณะเป็นท่อนดิดีแกรมลบ ไม่สร้างสปอร์ เช่น *Achromobacter* sp. และ *Flavobacterium* sp. เป็นต้น แฟมมิลี Micrococcaceae มีลักษณะเซลล์เป็นทรงกลมและดิดีแกรมไม่แน่นอน เซลล์เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ เช่น *Micrococcus* sp. และแบคทีเรียทรงกลมอยู่กันเป็นกลุ่มและดิดีแกรมบวก เช่น *Sarcina* sp. แฟมมิลี Corynebacteriaceae มีลักษณะเป็นท่อน หรือท่อน โค้งเล็กน้อย ต้องการออกซิเจน และดิดีแกรมบวก เช่น *Corynebacterium* sp. แบคทีเรียรูปแท่ง ดิดีแกรมไม่แน่นอนและพัฒนาเป็นทรงกลมในระยะเวลาต่อมาและดิดีแกรมบวก เช่น *Arthrobacter* sp. และแฟมมิลี Bacillaceae มีลักษณะเซลล์เป็นท่อนดิดีแกรมบวกและสร้างสปอร์ เจริญได้ในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจนก็ได้ เช่น *Bacillus* sp. และแบคทีเรียรูปท่อนดิดีแกรมบวก สร้างสปอร์และไม่ต้องการออกซิเจน เช่น *Clostridium* sp.

### 8.1.3 ออเดอร์ Actinomycetales

แบคทีเรียในออเดอร์ Actinomycetales มีลักษณะเซลล์เป็นรูปท่อนดิดีแกรมบวก และสีทึบกรด ต้องการออกซิเจน ได้แก่ แฟมมิลี Mycobacteriaceae เช่น *Mycobacterium* sp.

## 8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน

การเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียในดินขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยด้านอาหารและปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมต่างๆ ดังนี้

### 8.2.1 ปัจจัยด้านอาหาร

1) แหล่งพลังงาน มีความสำคัญมากเนื่องจากแบคทีเรียในดินต้องการพลังงานเป็นจำนวนมากเพื่อนำมาใช้ในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน สามารถแบ่งได้ 3 แหล่ง คือ แสง แบคทีเรียที่ใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานจะมีความสามารถในการสังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria) แต่บทบาทของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากจะพบได้ในบริเวณที่มีแสงส่องถึง เช่น



ผิวดินหรือน้ำที่ไม่มีสิ่งปกคลุม แหล่งที่สองคือ สารอินทรีย์ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะได้พลังงานจากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ (chemoheterotroph) เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกระบวนการสำคัญๆ ในดิน ได้แก่ การย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) และการเกิดแก๊สมีเทน (methanogenesis) เป็นต้น แหล่งพลังงานสุดท้าย คือ สารอนินทรีย์ แบคทีเรียในกลุ่มนี้สามารถออกซิไดซ์สารประกอบอนินทรีย์ได้เป็นพลังงานออกมา (chemoautotroph) มีความสำคัญต่อการแปรสภาพของแร่ธาตุต่างๆ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) การออกซิไดซ์เหล็ก (iron oxidation) การออกซิไดซ์กำมะถัน (sulfur oxidation)

2) แหล่งคาร์บอน คาร์บอนเป็นธาตุอาหารหลักที่แบคทีเรียในดินต้องการในปริมาณมากเพื่อนำมาใช้สร้างองค์ประกอบเซลล์ เช่น คาร์โบไฮเดรตและกรดอะมิโน เป็นต้น แบคทีเรียพวก autotroph จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์จากในดิน ซึ่งมีอยู่ในปริมาณมากเป็นแหล่งคาร์บอน โดยได้พลังงานมาจากแสงหรือกระบวนการออกซิไดซ์สารประกอบอนินทรีย์ ส่วนแบคทีเรียพวก heterotroph จะใช้สารอินทรีย์ต่างๆ เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อพิจารณาแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน สามารถแบ่งแบคทีเรียในดินออกได้เป็นกลุ่มตามตารางที่ 3 ได้ดังนี้

**ตารางที่ 3** การจำแนกแบคทีเรียโดยอาศัยความแตกต่างของแหล่งพลังงานและแหล่งคาร์บอน

| กลุ่ม            | แหล่งพลังงาน | แหล่งคาร์บอน     | ตัวอย่างแบคทีเรีย                                                        |
|------------------|--------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Photoautotroph   | แสง          | คาร์บอนไดออกไซด์ | แบคทีเรียสังเคราะห์แสง พวก purple sulfur และ green sulfur bacteria       |
| Photoheterotroph | แสง          | สารอินทรีย์      | แบคทีเรียสังเคราะห์แสง พวก purple nonsulfur และ green nonsulfur bacteria |
| Chemoautotroph   | สารอนินทรีย์ | คาร์บอนไดออกไซด์ | แบคทีเรียพวก nitrifying bacteria sulfur bacteria และ iron bacteria       |
| Chemoheterotroph | สารอินทรีย์  | สารอินทรีย์      | แบคทีเรียส่วนใหญ่ แอคติโนมัยซีตา รา และโปรโตซัว                          |

ที่มา: คณาจารย์ภาควิชาจุลชีววิทยา(2544)

3) ตัวรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียสามารถออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งผลของการออกซิไดส์สารดังกล่าวจะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา เมื่อนำอิเล็กตรอนไปผ่านกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transport system) จะได้สารประกอบที่มีพลังงานสูงออกมา เช่น ATP (adenosine triphosphate) ไว้ใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน เรียกว่า ตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) ได้แก่ ออกซิเจน ไนโตรที่ไนเตรท แมงกานีส เฟอริก ซัลเฟต คาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารอินทรีย์ สารเหล่านี้มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4) ดังนั้นในกระบวนการผลิตพลังงานของแบคทีเรียจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดจึงขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรับอิเล็กตรอนและความสามารถของจุลินทรีย์ในการใช้สารดังกล่าวเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

4) แร่ธาตุ เซลล์แบคทีเรียทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้ถ้าขาดแร่ธาตุ บางชนิดถึงแม้จะมีพลังงานและคาร์บอนมากขนาดไหนก็ตามความต้องการแร่ธาตุของแบคทีเรียแต่ละชนิดก็แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความจำเป็นในการนำไปสร้างสารประกอบอินทรีย์ภายในเซลล์ แร่ธาตุบางชนิดมีหน้าที่ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาหรือกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ แร่ธาตุที่แบคทีเรียต้องการมาก ได้แก่ ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส ส่วนแร่ธาตุที่แบคทีเรียต้องการน้อย ได้แก่ โพแทสเซียม โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ และ เหล็ก เป็นต้น โดยแร่ธาตุเหล่านี้เมื่ออยู่ในเซลล์จะอยู่ในรูปของประจุช่วยในการทำงานของเอนไซม์และการสร้างโปรตีน

ตารางที่ 4 ลำดับการใช้สารเป็นตัวรับอิเล็กตรอนของแบคทีเรีย

| ตัวรับอิเล็กตรอนและผล<br>ของปฏิกิริยารีดักชัน | กระบวนการที่เกิด    | Redox potential<br>ที่ pH7 (mV) | ตัวอย่างแบคทีเรีย          |
|-----------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|
| $O_2 + e^- \longrightarrow H_2O$              | aerobic respiration | + 380 ถึง + 320                 | Aerobic bacteria           |
| $NO_3^- + e^- \longrightarrow N_2$            | denitrification     | + 280 ถึง + 220                 | <i>Pseudomonas</i> sp.     |
| $Mn^{4+} + e^- \longrightarrow Mn^{3+}$       | manganese reduction | + 280 ถึง + 220                 | <i>Bacillus</i> sp.        |
| $Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$       | iron reduction      | + 180 ถึง + 150                 | <i>Pseudomonas</i> sp.     |
| $SO_4^{2-} + e^- \longrightarrow H_2S$        | sulphate reduction  | - 120 ถึง - 180                 | <i>Desulfovibrio</i> sp.   |
| $CO_2 + e^- \longrightarrow CH_4$             | methanogenesis      | - 200 ถึง -280                  | <i>Methanobactrium</i> sp. |

ที่มา: ทศนีย์ (2543)

5) growth factor เป็นสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียจำเป็นต้องได้รับจากสภาพแวดล้อม เพื่อให้การเจริญเติบโตสามารถดำเนินไปได้อย่างปกติ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กรดอะมิโน พิวรีน/ไพริมิดีน และวิตามิน ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ในการช่วยสร้างโปรตีน กรดนิวคลีอิกและช่วยในการทำงานของเอนไซม์บางชนิด

## 8.2.2 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม

1) การระบายอากาศของดิน การระบายอากาศเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณออกซิเจนและค่า redox potential ของดิน ซึ่งมีผลต่อชนิดของตัวรับอิเล็กตรอนที่แบคทีเรียนำไปใช้ในกระบวนการสร้างพลังงานของแบคทีเรียในแต่ละกลุ่ม

2) ความชื้นในดิน เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในดิน เนื่องจากช่วยละลายสารอาหารต่างๆ ใช้เป็นที่อยู่อาศัยและมีบทบาทต่อสภาพการระบายอากาศในดิน

3) อุณหภูมิดิน อุณหภูมิมีอิทธิพลในการช่วยเร่งอัตราการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่างๆ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกิจกรรมของแบคทีเรียก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

4) สภาพกรดด่างของดิน สภาพกรดด่างของดินมีผลต่อการละลายของแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหรือความเป็นพิษของแร่ธาตุที่ละลายออกมา นอกจากนี้ยังมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ ของแบคทีเรีย แบคทีเรียส่วนใหญ่จะเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH ที่เป็นกลาง (6-8) ถ้าเป็นกรดแบคทีเรียจะลดลง และเชื้อราซึ่งสามารถทนกรดได้ดีจะเจริญเติบโตแทน

5) ความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนของดิน ความเป็นประจุลบของดินมีผลต่อแบคทีเรียทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น มีผลต่อการดูดซับธาตุอาหารซึ่งส่วนใหญ่มีประจุบวกไว้ให้แบคทีเรียได้นำไปใช้ นอกจากนี้ยังช่วยเกาะยึดเชื่อมโยงกับประจุลบบนเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เซลล์สามารถเกาะยึดบนผิวอนุภาคดินได้

6) ความลึกของดิน ดินชั้นบนจะมีแบคทีเรียมมากกว่าดินชั้นล่าง แต่บนผิวดินต่างๆ จะมีแบคทีเรียน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะมีความชื้นไม่มากและอิทธิพลของแสงแดดมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนแบคทีเรียไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากนี้ความลึกยังมีผลกระทบต่อปริมาณของออกซิเจน

คาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้น pH และธาตุอาหารต่างๆ ทั้งหมดนี้ล้วนมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสิ้น

โดยทั่วไปแบคทีเรียในดินจะเพิ่มจำนวนขึ้นในช่วงที่มีสารอาหารสูง และจะลดจำนวนเมื่อสารอาหารหมดไป จนในที่สุดจะคงปริมาณอยู่ในระดับต่ำหรือปรับลดอัตราเมตาบอลิซึมของเซลล์ให้อยู่ในระดับต่ำเพื่อให้สมดุลกับปริมาณอาหารที่เหลือน้อย แต่สำหรับแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในดินบริเวณใกล้รากพืช ซึ่งจะได้รับสารอาหารที่ถูกปลดปล่อยจากรากพืชตลอดเวลา กิจกรรมและปริมาณแบคทีเรียในบริเวณรากจึงสูงอย่างต่อเนื่อง และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้มากกว่า (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

### 8.3 บทบาทและความสำคัญของแบคทีเรียในดิน

กิจกรรมต่างๆ ของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในดินจะส่งผลกระทบต่อสมบัติของดินและระบบนิเวศของดิน ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของวัฏจักรแร่ธาตุที่ดำเนินไปอย่างเหมาะสมและส่งเสริมการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ โดยเฉพาะการเจริญเติบโตของพืช กระบวนการหลักที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของพืชมักเกี่ยวข้องอยู่กับการแปรสภาพสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ตลอดจนการมีภาวะอยู่ร่วมกัน (symbiosis) ระหว่างแบคทีเรียกับพืช ดังนี้

#### 8.3.1 การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ

การย่อยสลายอินทรีย์วัตถุเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้แร่ธาตุองค์ประกอบของสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายอยู่ในรูปสารประกอบอนินทรีย์อีกครั้ง ธาตุอาหารที่ถูกกักเก็บไว้จะถูกปลดปล่อยออกมาให้พืชหรือจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

1) แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุแบคทีเรียกลุ่มที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุและพบมากที่สุดในดิน ได้แก่ heterotroph ซึ่งแต่ละชนิดจะมีเอนไซม์ที่แตกต่างกันไป บางชนิดมีเอนไซม์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้หลายชนิด แต่ก็ยังมีบางชนิดที่มีเอนไซม์จำกัดอยู่กับสารอินทรีย์ชนิดเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถจำแนกชนิดของเอนไซม์ได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ intracellular enzyme คือ เอนไซม์ที่เกิดขึ้นและอยู่ภายในเซลล์ อีกกลุ่มหนึ่ง คือ extracellular enzyme เป็นเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นแล้วถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์หรืออินทรีย์วัตถุ เนื่องจาก



จะช่วยย่อยสลายสารที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น เซลลูโลส เฮมิ-เซลลูโลส หรือโพลีแซคคาไรด์ ให้มีโมเลกุลที่เล็กลงจนสามารถซึมผ่านผนังเซลล์เข้าไปได้ นอกจากนี้ extracellular enzyme ยังเป็นเอนไซม์ที่มีความแตกต่างจากเอนไซม์ชนิดอื่น เนื่องจากเป็นเอนไซม์ประเภท adaptive enzyme คือ เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นต่อเมื่อมีอาหารชนิดนั้นอย่างจำเพาะเจาะจงอยู่ในสภาพแวดล้อมภายนอกเซลล์เท่านั้น

สำหรับกระบวนการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุและสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย นั้นแบคทีเรียจะใช้คาร์บอนส่วนหนึ่งมาสร้างพลังงานสำหรับการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวน เรียกกระบวนการนี้ว่า assimilation คาร์บอนอีกส่วนจะถูกออกซิไดซ์เปลี่ยนเป็นสารประกอบคาร์บอน และถ้ามีการออกซิไดซ์ที่เกิดขึ้นสมบูรณ์ คาร์บอนในอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์

2) การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุและสารอินทรีย์ที่ไถลงในดิน การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุและสารประกอบอินทรีย์คาร์บอน จะเปลี่ยนจากสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ เรียกกระบวนการนี้ว่า mineralization ซึ่งจะถูกควบคุมด้วยหลายปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ จนถึงสภาพแวดล้อมต่างๆ ภายในดิน เช่น อุณหภูมิ การระบายอากาศ ความชื้น pH และอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) ของอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ที่ไถลงไปดิน

2.1) อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมีส่วนควบคุมความเร็วของการสลายตัว ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะมีการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของแบคทีเรียที่ทำการย่อยสลายด้วย โดยทั่วไปการย่อยสลายจะเกิดขึ้นช้าที่อุณหภูมิต่ำ และจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา อย่างไรก็ตามการสลายตัวจะเกิดขึ้นได้ในอัตราสูงสุดเมื่ออุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียในดิน

2.2) การระบายอากาศเป็นตัวที่ควบคุมอัตราการสลายตัว เนื่องจากออกซิเจนมีความสำคัญต่อแบคทีเรีย โดยจะถูกใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ถ้ามีออกซิเจนเพียงพอก็จะเกิดการย่อยสลายที่สมบูรณ์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของเซลล์ออกมา แต่ถ้ามีออกซิเจนอย่างจำกัด เช่น ในกรณีที่ดินมีการขังน้ำ อัตราการย่อยสลายตัวจะช้าลงและเกิดการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ จะได้มีเทนและแก๊สไฮโดรเจน รวมทั้งกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ออกมา เช่น กรดแลคติกและกรดอะซิติก เป็นต้น

2.3) ความชื้น การย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุและสารอินทรีย์ในดินจะดีเมื่อมีความชื้นในดินจะต้องมีออกซิเจนเพียงพอด้วย ในกรณีที่ดินมีความชื้นมากๆ การสลายตัวมักเกิดขึ้นไม่ดี ทั้งนี้เนื่องจากน้ำจะไปแทนที่อากาศในดินทำให้อากาศไม่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรีย และเกิดการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ตามมา โดยทั่วไปแล้วการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุและสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อดินมีความชื้นอยู่ระหว่าง 60-80 WHC (water holding capacity of soil)

2.4) pH การย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุและสารอินทรีย์ในดินจะดีเมื่อดินมี pH ที่เหมาะสม ซึ่งแบคทีเรียแต่ละชนิดก็จะมีความต้องการช่วง pH ที่ต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตาม pH ในช่วงที่เป็นกลางจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้ดีที่สุด

2.5) C:N ratio สำหรับการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ที่ใส่ลงไปดิน ถ้ามีไนโตรเจนสูงจะเกิดการย่อยสลายที่รวดเร็วและมีการปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชและสิ่งมีชีวิตออกสู่ดิน ได้แก่ แอมโมเนียมและไนเตรท ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีไนโตรเจนน้อยหรือมีไม่เพียงพอ การย่อยสลายจะเกิดได้ดีต่อเมื่อมีไนโตรเจนจากภายนอก (จากดิน) อยู่ในปริมาณมากเท่านั้น ทำให้แบคทีเรียดูดเอาสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนในดินไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มาก จนอาจทำให้ดินบริเวณนั้นเกิดภาวะขาดแคลนธาตุ ดังนั้นจะเห็นว่าปัจจัยที่ควบคุมการสลายตัวที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ C:N ratio ของอินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ที่ใส่ลงในดิน โดยอัตราการสลายตัวสูงๆ จะเกิดขึ้นเมื่อ C:N ratio มีค่าอยู่ในช่วงแคบและจะลดลงเรื่อยๆ จน C:N ratio มีค่าประมาณ 10:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจนของฮิวมัสในดิน (5:1 ถึง 15:1) และยิ่งใกล้เคียงกับอัตราส่วนของจุลินทรีย์ในดินอีกด้วย (เฉลี่ย 10:1)

### 8.3.2 การแปรสภาพสารอินทรีย์

กิจกรรมของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการแปลงสภาพของสารอินทรีย์มักเกี่ยวข้องกับกระบวนการที่แบคทีเรียไปใช้สารเหล่านั้นเป็นอาหาร โดยมีกระบวนการหลักๆ ดังนี้

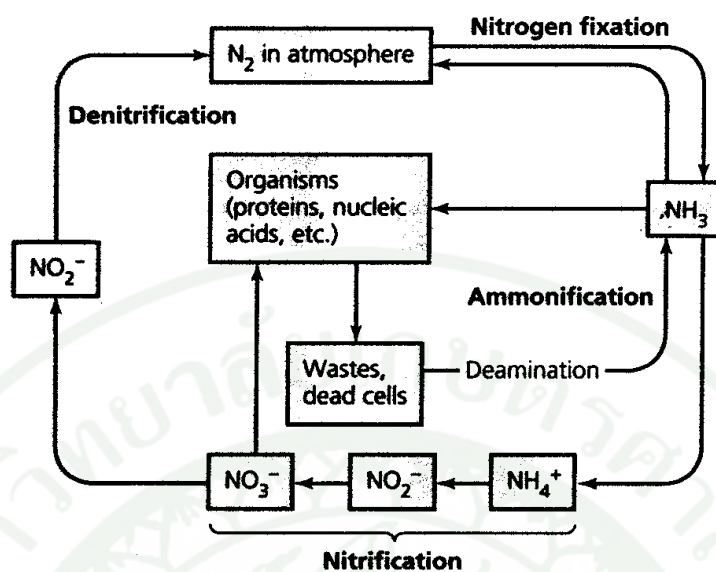
1) อิมโมบิไลเซชัน เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร เช่น แบคทีเรียจะดูดเอาแอมโมเนียม ไนเตรท ซัลเฟตและแคลเซียมจากดินเข้าไปใช้สร้างสารประกอบภายในเซลล์ หรือใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่างๆ ในกรณีที่สภาพแวดล้อมในดินเหมาะสม

แบคทีเรียเหล่านี้ จะเจริญและเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแล้วคุณใช้ธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ไปมากจนในบางครั้งอาจทำให้ดินบริเวณนั้นเกิดภาวะขาดแคลนธาตุอาหารมีผลทำให้พืชขาดแคลนธาตุอาหารไปด้วย

2) ออกซิเดชัน เป็นกระบวนการที่แบคทีเรียออกซิไดส์สารประกอบอนินทรีย์เพื่อให้ได้พลังงานไปใช้ในการดำรงชีวิต เช่น การออกซิไดส์ของแอมโมเนียม ซัลเฟต เพอร์ไรต์ หรือแมงกานีส ไปเป็นไนเตรท ซัลเฟต เพอร์ริกหรือแมงกานีส ตามลำดับ กระบวนการนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียกลุ่ม chemoautotroph ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนเป็นกระบวนการที่แปรสภาพสารอนินทรีย์จากรูปที่ถูกรีดิวซ์ ไปอยู่ในรูปที่ถูกออกซิไดส์มากขึ้น เช่น การออกซิเดชันของแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรท์ และไนเตรท ตามลำดับ ด้วยกระบวนการ nitrification ในวัฏจักรไนโตรเจน (ภาพที่ 38) โดยแบคทีเรียกลุ่ม nitrifying bacteria ได้แก่ *Nitrosomonas* sp. และ *Nitrobacter* sp. และการออกซิเดชันของซัลเฟตไปเป็นซัลเฟต โดยแบคทีเรีย ได้แก่ *Beggiatoa* sp. และ *Thiobacillus* sp. (ภาพที่ 39)

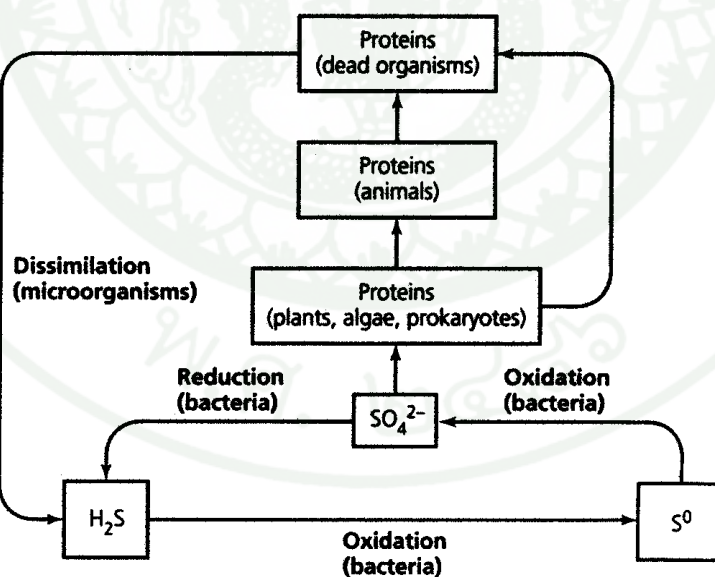
3) รีดักชัน โดยปกติปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดจากการที่แบคทีเรียใช้สารอนินทรีย์ไปเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการสร้างพลังงาน ซึ่งปกติแบคทีเรียจะใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน แต่ในสภาพที่ขาดแคลนออกซิเจนแบคทีเรียสามารถใช้ไนเตรท ซัลเฟต เพอร์ริก หรือแมงกานีสเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ซึ่งสารเหล่านี้จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นแก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพอร์ไรต์หรือแมงกานีส ตามลำดับ กระบวนการรีดักชันที่เกิดขึ้น เช่น การรีดิวซ์ของไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ และแก๊สไนโตรเจน ตามลำดับ ด้วยกระบวนการ denitrification ในวัฏจักรไนโตรเจน โดยแบคทีเรียกลุ่ม denitrifying bacteria ได้แก่ *Pseudomonas* sp. และ *Bacillus* sp. (ภาพที่ 38) และการรีดิวซ์ของซัลเฟตไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยกระบวนการ dissimilatory sulfate reduction ในวัฏจักรซัลเฟต โดยแบคทีเรีย ได้แก่ *Desulfovibrio* sp. (ภาพที่ 39)

4) การตรึงไนโตรเจน การตรึงไนโตรเจนโดยแบคทีเรียเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน เนื่องจากเป็นกระบวนการหลักที่ช่วยเพิ่มไนโตรเจนในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยแบคทีเรียจะตรึงเอาแก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศเปลี่ยนมาเป็นแอมโมเนียในดิน ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (non-symbiotic bacteria) ได้แก่ *Azotobacter* sp. *Clostridium* sp. และ *Pseudomonas* sp. เป็นต้น ด้วยกระบวนการ non-symbiotic nitrogen fixation และแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนแบบถ้อยที่ถ้อยอาศัย (symbiosis) ได้แก่ *Rhizobium* sp. ด้วยกระบวนการ symbiotic nitrogen fixation (ภาพที่ 38)



ภาพที่ 38 วัฏจักรของไนโตรเจน

ที่มา: Gerard *et al.* (2004)



ภาพที่ 39 วัฏจักรของซัลเฟอร์

ที่มา: Gerard *et al.* (2004)



## 9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 9.1 งานวิจัยเกี่ยวกับถ่าน

Rong et al. (2002) ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากใบ-สังเคราะห์ ที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์พบว่า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเผา 0.5 ชั่วโมง สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุด โดยเพิ่มจาก 196.5 เป็น 723.6 มิลลิกรัม/กรัม และวัชรพงษ์ (2552) ได้ศึกษาผลของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าวพบว่าที่สภาวะเหมาะสม ได้แก่ พีเอช 5 ระยะเวลาปั่นกววนและระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม สามารถดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียได้ร้อยละ 25.58 ซึ่งกลไกการดูดซับเป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ที่สำคัญของวัสดุที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ต้องมีปริมาณคาร์บอนสูงแต่มีสารประกอบอินทรีย์สารต่ำ ตัวอย่างเช่น ไม้เนื้อแข็ง ถ่านลิกไนต์ ถ่านพีช และถ่านหิน เป็นต้น แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากวัสดุเหล่านี้จะมีราคาแพง และขั้นตอนในการผลิตถ่านกัมมันต์มีขั้นตอนที่ยุ่งยาก (Bansal, 1988; Attia et al., 2008) โดยใช้ทั้งกระบวนการทางฟิสิกส์ และกระบวนการทางเคมี โดยกระบวนการทางฟิสิกส์จะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้คือถ่านคาร์บอน (Ugurly et al., 2008) สำหรับกระบวนการทางเคมีจะเป็นการเพิ่มรูพรุนของถ่านคาร์บอนโดยใช้สารเคมี เช่น  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , และ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Guo and Rockstraw, 2006) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาอยู่ที่ประมาณ 400-500 องศาเซลเซียส

Shi et al. (2010) ได้ทำการศึกษาผลิตถ่านกัมมันต์จากรูปถ่านเพื่อใช้ในการดูดซับสี พบว่าการเตรียมถ่านจากรูปถ่านโดยใช้กรด  $\text{H}_3\text{PO}_4$  เข้มข้นร้อยละ 40 เป็นตัวกระตุ้น ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนของกรดที่ใช้ 2.5 แชนให้อมตัว 9 ชั่วโมง เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 80 นาที ได้ถ่านมีพื้นที่ผิว 1,279 ตารางเมตร/กรัม และขนาดรูพรุน 5.585 นาโนเมตร พบบริเวณพื้นผิวของถ่านจะมีหมู่ O และ P เป็นองค์ประกอบ บางกลุ่มเป็นหมู่คาร์บอกซิล กลไกการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มของแลงเมียร์คือดูดซับได้เพียงชั้นเดียว สามารถดูดซับสีได้ 192.30 มิลลิกรัม/กรัม และการฟื้นฟูถ่านสามารถทำได้โดยใช้ความร้อน จากการศึกษาทำให้ทราบว่าถ่านกัมมันต์จากรูปถ่านสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับสีที่มีประจุบวกในสารละลายได้

Boonamnuyvitaya et al. (2005) ได้ศึกษาถ่านที่เตรียมจากเปลือกกาแฟโดยใช้ตัวกระตุ้นที่แตกต่างกันได้แก่  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  และไอน้ำ เพื่อใช้ในการดูดซับไธระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ผลิตจากเปลือกกาแฟเตรียมด้วย  $\text{ZnCl}_2$  และใช้  $\text{N}_2$  เป็นตัวกระตุ้น ( $\text{CZn-N}_2$ ) สามารถดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้สูงสุดโดยยึดจับกับหมู่ฟังก์ชันแบบมีขั้ว O-H, C=O, C-O ที่บริเวณผิว สำหรับถ่านกัมมันต์เปลือกกาแฟที่เตรียมด้วย  $\text{ZnCl}_2$  และกระตุ้นด้วย  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  ( $\text{CZn-N}_2\text{-CO}_2$ ) จะได้พื้นที่ผิวสูงสุด (914 ตารางเมตร/กรัม) และให้ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (1.010 มิลลิกรัม/กรัม) พบหมู่ฟังก์ชันที่ไม่มีขั้วบริเวณผิวทำให้ดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้น้อยกว่า  $\text{CZn-N}_2$  สรุปได้ว่า การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านกัมมันต์จากเปลือกกาแฟ สามารถดูดซับบริเวณผิวด้วยกลไกทางเคมีมากกว่าลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ผิวและปริมาตรช่องว่าง

Kumagai et al. (2008) ได้ทำการศึกษาเรื่อง สมบัติการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และอะซีตัลดีไฮด์ของแกลบที่ผ่านการให้ความร้อน โดยศึกษาถึงการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ และอะซีตัลดีไฮด์ด้วยถ่านแกลบ ซึ่งเลือกใช้ถ่านแกลบเป็นตัวดูดซับแอลดีไฮด์ทั้งสองชนิด เตรียมถ่านแกลบมาโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 250-800 องศาเซลเซียส ด้วยแก๊สไนโตรเจน หรือทำให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 875 องศาเซลเซียส ใช้ดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ 1 มิลลิกรัม/ลิตร และอะซีตัลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ถ่านกัมมันต์จากถ่านแกลบที่อุณหภูมิ 875 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์และอะซีตัลดีไฮด์ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวและช่องว่างของถ่านกัมมันต์จากถ่านนั้นมียค่า 466.9 ตารางเมตร/กรัม และ 0.35 ลูกบาศก์เมตร/กรัม ตามลำดับซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว 1,119.7 ตารางเมตร/กรัม และ 0.57 ลูกบาศก์เมตร/กรัม ทั้งนี้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จากถ่าน ที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงมีสารอนินทรีย์ โพแทสเซียม และแคลเซียมอยู่ภายใน ซึ่งมีโอกาสที่จะมีพื้นผิวในการดูดซับแอลดีไฮด์มากกว่า

Lei et al. (2005) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยใช้ถ่านไม้ไผ่ โดยศึกษาถึงการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านไม้ไผ่ด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี ซึ่งพบว่า ภายใต้การดูดซับในสภาวะที่เหมาะสมที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านไม้ไผ่สูงสุดที่ 68.5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยที่การดูดซับครั้งนี้เป็นการดูดซับแบบกายภาพ

## 9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำ

วัชรพงษ์ และคณะ (2552) ทำการศึกษาการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเอทิลีนออกไซด์และเอทิลีนไกลคอล ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนผลิตจากกะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนผลิตจากแกลบข้าว จำนวนชนิดละ 2 กรัม และสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้จำนวน 50 มิลลิลิตร โดยทำการทดลองแบบเบทช์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนผลิตจากแกลบข้าว มีสภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 5 และ 3 ตามลำดับ ระยะเวลาปั่นกววนและระยะเวลาสัมผัสของถ่านทั้ง 2 ชนิด เท่ากับ 30 นาที ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ถ่านทั้ง 2 ชนิดสามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ร้อยละ 25.19 และ 15.09 ตามลำดับ สำหรับผลการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ 3 ครั้ง หลังจากการใช้งานแล้ว พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุนและถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มรูพรุน สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ร้อยละ 20.30, 15.68, 12.45, 10.58, 9.58 และ 9.16 ตามลำดับทั้งนี้ ข้อมูลดังกล่าวยังแสดงสภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์อีกด้วย ทั้งนี้โรชา และคณะ (2552) ทำการศึกษาการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเอทิลีนออกไซด์และเอทิลีนไกลคอลด้วยถ่านรูปถุณี โดยทำการทดลองแบบเบทช์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถุณี มีสภาวะเหมาะสมต่อการดูดซับ คือ พีเอชเท่ากับ 4 ความเร็วรอบปั่นกววน 100 รอบ/นาที ระยะเวลาปั่นกววน 60 นาที และระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ถ่านรูปถุณี 1 กรัมสามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ร้อยละ 21.26 ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวยังแสดงสภาวะสมดุลที่สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์อีกด้วย

Eiroa et al. (2004) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์และยูเรียในถังเร่งปฏิกิริยาด้วยจุลินทรีย์ โดยศึกษาถึงการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ทางชีวภาพด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและปฏิกิริยาดีไนตริฟิเคชันของยูเรียโดยทำการทดลองแบบเบทช์ สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ร้อยละ 99.5 และ Hidalgo et al. (2002) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งสังเคราะห์และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย *Rhodococcus erythropolis* พบว่า *Rhodococcus erythropolis* สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยที่ปริมาณการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์นั้นขึ้นอยู่กับจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น และความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ทั้งนี้วิธีการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการย่อยสลายทางชีวภาพนี้ยังเป็นอีกรูปแบบหนึ่งใน

การในการบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนฟีนอลิก และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเมลามีนเรซิน

Lotfy and Reshed (2002) ทำการศึกษาเรื่อง วิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อน โดยศึกษาถึงการย่อยสลายด้วยกระบวนการชีวภาพใช้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ ระหว่าง 31.5–125 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ภายใน 16 วัน แต่บำบัดได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์สูงกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร และ Soljam et al. (2001) ศึกษาเรื่อง การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเมลามีนเรซิน ผสมจุลินทรีย์ 3 ชนิด คือ *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas cepacia* และ *Trichosporon penicillatum* เพื่อใช้ย่อยฟอร์มาลดีไฮด์และกรดฟอร์มิกในน้ำทิ้งสังเคราะห์ และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเมลามีนเรซิน น้ำทิ้งมีการปนเปื้อนฟอร์มาลดีไฮด์ 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และกรดฟอร์มิก 500 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลาในการย่อย 24 ชั่วโมง พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัด ซีโอดี ฟอร์มาลดีไฮด์ เมทานอล และบิวทานอลสูงถึงร้อยละ 90 และพบว่าจุลินทรีย์ชนิด *Trichosporon penicillatum* สามารถจับตัวเกิดเป็นตะกอนได้ด้วยตัวเอง

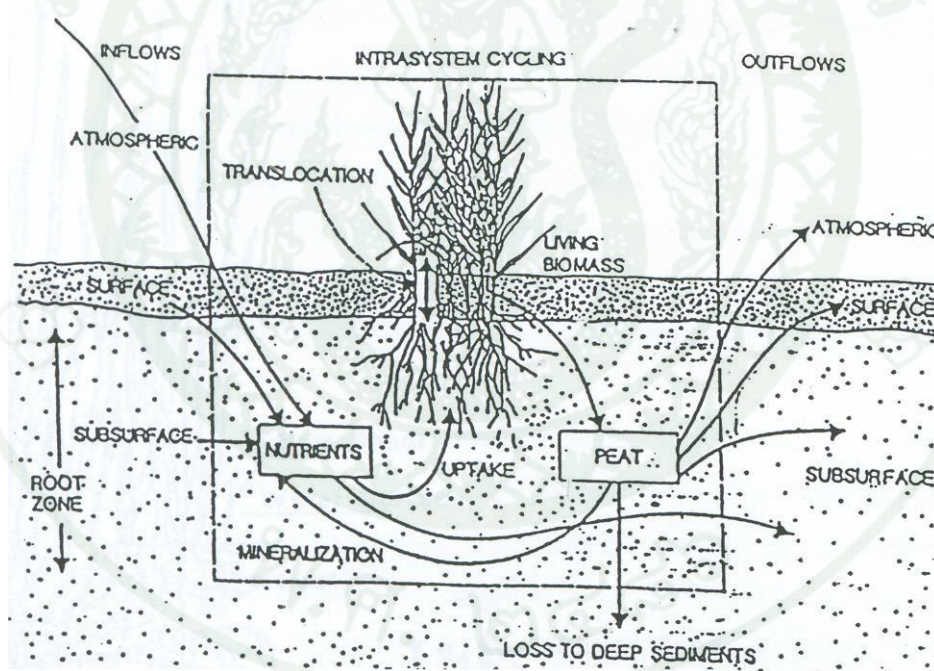
Vidal et al. (1999) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์และยูเรียในน้ำทิ้งด้วยกระบวนการย่อยสลายไมใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง โดยศึกษาถึงการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ และยูเรียในน้ำทิ้งในสภาวะไร้ออกซิเจนที่ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์สูงถึง 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และใช้กลูโคสเป็นตัว co-substrate ในระบบบำบัด UASB สามารถลดซีโอดีได้ร้อยละ 90 - 95 และสามารถย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์ และยูเรียได้อย่างสมบูรณ์

Zoutber and Frankin (1996) ได้ทำการศึกษาเรื่อง การบำบัดสารเคมีและน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเบียร์ด้วยปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไมใช้ออกซิเจนชนิดใหม่ (biobed EGSB) โดยศึกษาถึงการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเบียร์และโรงงานผลิตสารเคมีที่มีการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์จากเมทานอล น้ำทิ้งมีปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร และมีปริมาณเมทานอล 10,000 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยปฏิกิริยาย่อยสลายแบบไมใช้ออกซิเจนชนิดใหม่ พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีของน้ำทิ้งทั้งสองประเภทได้ร้อยละ 99



### 9.3 งานวิจัยเกี่ยวกับพืชบำบัดน้ำเสีย

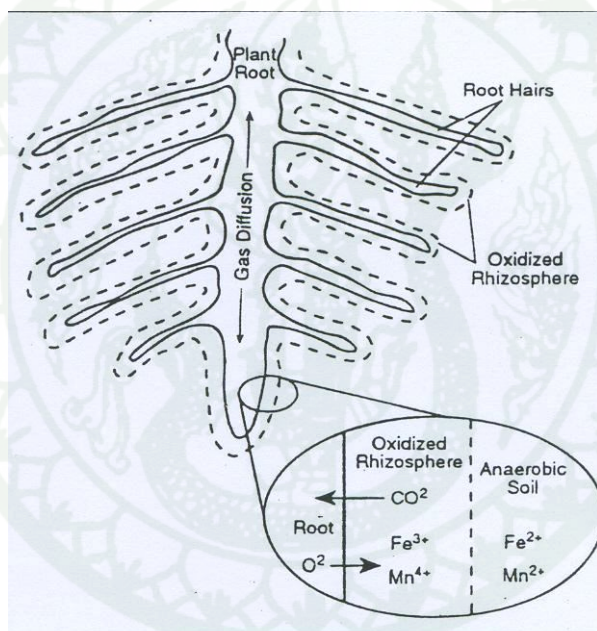
การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีพื้กรองน้ำเสียเป็นการเลียนแบบการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของระบบนิเวศพื้นที่ชุ่มน้ำที่ทำหน้าที่เสมือนหน่วยบำบัดน้ำเสียทางธรรมชาติซึ่ง William and Patrick (1994) ได้กล่าวว่าในพื้นที่ชุ่มน้ำจะมีความสมดุลของมวลภายในระบบ โดยจะมีการสะสมการเปลี่ยนแปลงและการหมุนเวียนธาตุอาหารและสารต่างๆ อย่างสมดุล ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้กรองน้ำเสียจึงมีสมดุลมวลสารดังแสดงในภาพที่ 40 ซึ่งความสมดุลของระบบจะเกิดจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชัน การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ การตกตะกอน การกรอง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและการดูดซึมธาตุอาหาร เป็นต้น ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปหรือบำบัดสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียให้ลดลง หรืออยู่ในรูปที่ปลอดภัยต่อแหล่งน้ำ



ภาพที่ 40 สมดุลมวลสารของระบบบำบัดน้ำเสียแบบพื้กรองน้ำเสีย

ที่มา: William and Patrick (1994)

ดังที่ได้กล่าวว่าพืชเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้หลักการของระบบนิเวศพื้นที่ชุ่มน้ำ โดยพืชจะทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียร่วมกับจุลินทรีย์และดิน ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบหล้ากรองน้ำเสียจึงต้องใช้พืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาพน้ำท่วมขังได้ ซึ่งพืชจะมีระบบรากซึ่งเป็นกลไกหนึ่งที่สำคัญ โดยระบบรากพืชจะดูดซึมธาตุอาหารและสารปนเปื้อนต่างๆ ในรูปไอออนเพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์แสงให้เป็นสารอินทรีย์เพื่อนำมาใช้ในการเจริญเติบโต ระบบรากยังทำหน้าที่เป็นที่ยึดเกาะของจุลินทรีย์บางชนิดที่ช่วยในการย่อยสลายสารต่างๆ ในดิน นอกจากนี้ระบบรากยังช่วยในการขนถ่ายออกซิเจนจากส่วนยอดไปยังรากและเคลื่อนย้ายออกซิเจนจากรากไปยังยอดพืช (ทัศนีย์, 2543) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ดียิ่งขึ้นดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 การขนถ่ายออกซิเจนของพืชในพื้นที่ชุ่มน้ำโดยอาศัยระบบราก

ที่มา: Kadlec and Knight (1996)

จะเห็นได้ว่าพืชที่มีโครงสร้างและหน้าที่ที่เหมาะสมและมีความสามารถในการนำมาใช้ปลูกเป็นพืชบำบัดในระบบบำบัดน้ำเสียแบบหล้ากรองน้ำเสียและมีบทบาทที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การใช้ประโยชน์จากพืชเพื่อการบำบัดน้ำเสียก็มีข้อจำกัด ซึ่งต้องเลือกชนิดของพืชให้มีความเหมาะสมที่สุดเพราะพืชแต่ละชนิด มีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน โดยสามารถสรุปคุณสมบัติของพืชที่เหมาะสมในการนำมาใช้บำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ต้องมีอัตราสังเคราะห์

แสงสูง มีความสามารถในการดูดซึมและเก็บสะสมสาร มีความสามารถในการส่งผ่านออกซิเจนจากใบผ่านลำต้นมายังรากได้สูง มีความทนทานต่อโรคและแมลงได้ดี ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารมลพิษได้กว้าง สามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้ดีและสามารถนำออกจากระบบได้ง่าย เนื่องจากการจะต้องมีการนำเอาพืชออกจากระบบเพื่อไม่ให้มีความหนาแน่นเกินไป

ในปัจจุบันได้มีผู้ศึกษาทดลองการนำพืชมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียกันมาก เช่น สุชาดา และคณะ (2537) ได้ทำการศึกษาทดลองคัดเลือกพันธุ์พืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยระบบหญ้ากรอง ซึ่งเป็นลักษณะการใช้ประโยชน์ของพื้นที่ชุ่มน้ำ พบว่า พืชจำพวก กกกลม กกสามเหลี่ยม หัวกระดาน และรูปฤาษี มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาใช้เป็นพืชทดลองเพราะมีการเจริญเติบโตดีมาก และยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางอื่นๆ ได้อีกด้วย และยังพบว่าหญ้าแฝกพันธุ์อินโดนีเซีย หญ้าแฝกพันธุ์ศรีลังกา หญ้าโคสโครอส หญ้ากาลล่า และหญ้าสมุท มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เพื่อการบำบัดน้ำเสีย สิทธิชัย (2538) ได้ทดลองเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียด้วยพืชในลักษณะเป็นพื้นที่ชุ่มน้ำในสภาพน้ำขังสลับแห้ง พบว่า กกกลม มีความเหมาะสมกับระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวมากที่สุด โดยสามารถลดค่า BOD และ COD ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ อารมณ์ (2539) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่ใช้พืชกกกลม และรูปฤาษี พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่ระยะเวลาการขังน้ำ 5 วัน สลับแห้ง 3 วัน เหมาะสมที่จะใช้เพื่อการบำบัด BOD และ COD มากที่สุด และกกกลมเป็นพืชที่เหมาะสมที่สุด และระบบบำบัดดังกล่าวสามารถบำบัดสารอินทรีย์ละลายและสารอินทรีย์แขวนลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Boyd (2010) พบว่า รูปฤาษีเป็นวัชพืชที่มีศักยภาพในการกำจัด และบำบัดน้ำเสีย เพราะรากของรูปฤาษีมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหาร ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ที่อยู่ในน้ำเสียได้ค่อนข้างสูง และสามารถดูดซับธาตุโลหะหนักได้ เช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นอกจากนี้ รูปฤาษีสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตจักสาน มุงหลังคา และกระดาด เนื่องจากก้านรูปฤาษีมีเยื่อไฟเบอร์มาก ทำให้มีความเหนียว รูปฤาษีมีปริมาณน้ำหนักแห้งต่อไร่ประมาณ 1.7-2.4 ตันต่อไร่ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ และมีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจนร้อยละ 2.33 ฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.51 และโปรแตสเซียม ร้อยละ 2.35 ค่อนข้างสูง เมื่อนำมาทำปุ๋ยหมักจะทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในปุ๋ยหมักสูงและใช้เป็นสารกำจัดแมลงได้เมื่อนำมาจุดไฟให้เกิดควัน นอกจากนี้ บรรจงและอนง (2553) ได้ทำการศึกษาวิจัยการบำบัดน้ำเสียโดยใช้พืชน้ำร่วมกับเครื่องเติมอากาศโครงการแก้ไขน้ำเสียอันเนื่องมาจากพระราชดำริโดยปลูกรูปฤาษีเต็มพื้นที่คลองระบายบริเวณหนองสนม จังหวัดสกลนคร ยาว 120 เมตร เป็นเวลา 3 เดือน ผลการทดลองพบว่า รูปฤาษีมี

ประสิทธิภาพในการลดค่าน้ำเสีย ได้แก่ ค่าบีโอดี ซีโอดี ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และสารแขวนลอย  
ลงได้ ร้อยละ 39 31 35 25 และ 68 ตามลำดับ





## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)
- 1.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)
- 1.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Surface Area Analyzer) ใช้วิธี Brunauer Emmett-Teller (BET Method)
- 1.4 ตู้อบ
- 1.5 เตาเผาถ่านแบบถัง ขนาดความจุ 200 ลิตร (ภาพที่ 20)
- 1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 4 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.0001 กรัม
- 1.7 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด 2 ตำแหน่ง อ่านค่าละเอียด 0.01 กรัม
- 1.8 เครื่องวัดการระเหยฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde Meter)
- 1.9 กระดาษกรอง GF/C ขนาด 0.45 ไมครอน
- 1.10 ตู้ดูดความชื้น
- 1.11 ชุดคอลัมน์แก้วพร้อมแคมป์จับและขาตั้ง
- 1.12 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยกรดและน้ำกลั่นจนสะอาด

### 1.13 กระบะทดลองปลูก ขนาด 49×49×52 เซนติเมตร



ภาพที่ 42 เตาเผาถ่านแบบถัง ขนาดความจุ 200 ลิตร

## 2. สารเคมี

2.1 สารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde;  $\text{HCHO}$ ) เข้มข้นร้อยละ 36 โดยปริมาตร

2.2 กรดโครโมโทรปิก (Chromotropic acid;  $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_2\text{S}_2$ )

2.3 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid;  $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

## 3. วัสดุดูดซับและวัสดุปลูก

3.1 ถ่านกกกลม

3.2 ถ่านรูปถ่าน

3.3 ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

3.4 คินนาผสมทราย (อัตราส่วน 3:1) จากโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อม  
แหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ

#### 4. พีชที่ใช้เป็นพืชบำบัด

##### 4.1 ต้นกกกลม

##### 4.2 ต้นรูปฤาษี

#### วิธีการ

##### 1. การเตรียมวัสดุดูดซับ

ถ่านที่ใช้ในการศึกษาวิจัย คือ ถ่านจากต้นกกกลม และถ่านจากต้นรูปฤาษี เตรียมโดยนำมาตัดเป็นชิ้นยาวประมาณ 1 นิ้ว แล้วตากให้แห้ง เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บถ่านที่ผ่านการเผาไว้ใช้ในการศึกษา ก่อนใช้ต้องนำถ่านมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง สำหรับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ก่อนใช้นำมาอบเพื่อไล่ความชื้นเช่นเดียวกัน

##### 2. การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของถ่านกกกลม ถ่านรูปฤาษี และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

###### 2.1 ตรวจลักษณะพื้นที่ผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2 ตรวจวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) และขนาดรูพรุน (pore size) โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน ใช้วิธี Brunauer Emmett-Teller (BET Method)

### 3. การเตรียมกราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้วิธีโครโมโทริกแอซิด สเปกโตรโฟโตเมตริก

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1,000.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 36 โดยปริมาตร 2.57 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์จากข้อ 3.1 มา 10.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.3 เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์จากข้อ 3.2 มา 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร แต่ละขวด ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ

3.4 ปิเปตสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 4.5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองชนิดมีฝาปิด ตักผงกรดโครโมโทริก 1 ช้อนตวงสาร ใส่ในหลอด ละลายให้เข้ากัน หลังจากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1.0, 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 มิลลิกรัม/ลิตร จากข้อ 3.3 มาอย่างละ 3.0 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดแต่ละหลอด เขย่า ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 10 นาที จะได้สารละลายสีม่วง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ โดยแกน X เป็นความเข้มข้นสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ และแกน Y เป็นค่าการดูดกลืนแสง

### 4. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100.0 มิลลิกรัม/ลิตร ที่เตรียมได้จากสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 36 ในข้อ 3.1 และ 3.2 มา 20.0 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น



## 5. การวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวอย่าง ด้วยวิธีโครโมโทกราฟิกแอซิด สเปกโตรโฟโตเมตริก

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.4 แต่เปลี่ยนจากสารละลายมาตรฐานฟอร์มัลดีไฮด์เป็นน้ำตัวอย่าง

## 6. การทดลองแบบเบตซ์

การทดลองแบบเบตซ์ ทำเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านชีวภาพ 3 ชนิด คือ ถ่านกกกลม ถ่านรูปถั่ว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านทั้ง 3 ชนิด

6.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ ทำการทดลองโดยชั่งถ่านทั้ง 3 ชนิด น้ำหนักชนิดละ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, และ 6.0 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ตามลำดับ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ขวดละ 100.0 มิลลิลิตร ปิดฝา นำไปเขย่า ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที นาน 30 นาที หลังจากนั้นนำมากรองผ่านกระดาษกรองเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มัลดีไฮด์ เช่นเดียวกับข้อ 5 และคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านทั้ง 3 ชนิด (ในหน่วย มิลลิกรัมฟอร์มัลดีไฮด์/กรัมตัวดูดซับ) โดยทำการทดลองชนิดละ 3 ซ้ำ

6.2 ศึกษาอิทธิพลของพีเอช โดยชั่งถ่านแต่ละชนิดน้ำหนักเท่ากับที่ได้ศึกษาจากข้อ 6.1 และทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.1 แต่ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 3, 5, 7 และ 9

6.3 ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการปั่นกวน ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.2 แต่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับพีเอชให้เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิดที่ศึกษาได้จากข้อ 6.2 โดยความเร็วรอบในการปั่นกวนที่ทำการศึกษาคือ 50, 100, 150 และ 200 รอบ/นาที

6.4 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาปั่นกวน ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.3 แต่ใช้ความเร็วรอบในการปั่นกวนที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิดที่ศึกษาได้จากข้อ 6.3 โดยระยะเวลาปั่นกวนที่ทำการศึกษาได้แก่ 10, 30, 60, 90 และ 120 นาที

6.5 ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาสัมผัส ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.4 แต่ใช้ระยะเวลาบ่มกวนที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิดที่ศึกษาได้จากข้อ 6.4 โดยระยะเวลาสัมผัสที่ทำการศึกษา ได้แก่ 10, 30, 60 และ 90 นาที

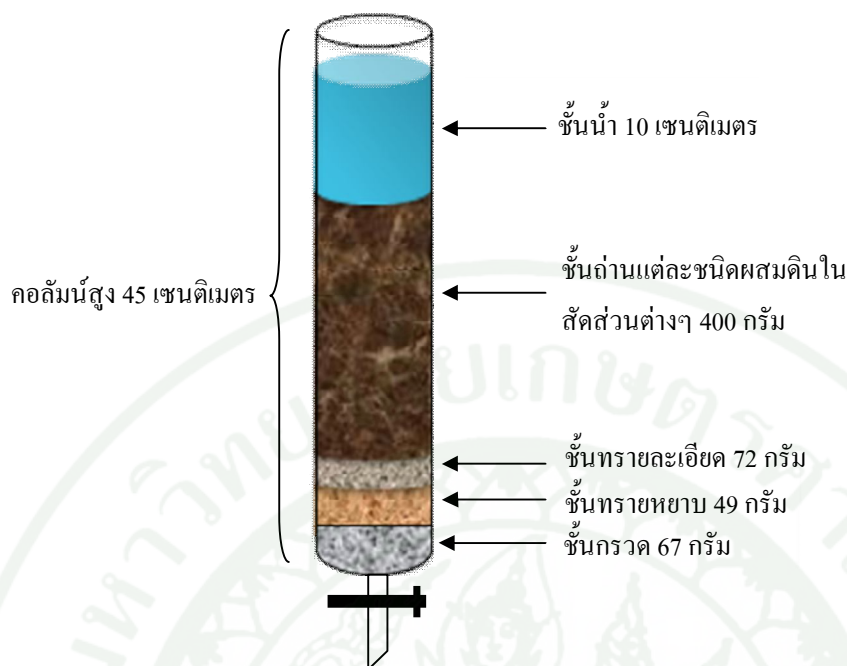
6.6 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 6.5 แต่ใช้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิดที่ศึกษาได้จากข้อ 6.5 โดยความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 และ 50.0 มิลลิกรัม/ลิตร

6.7 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 6.1 มาเขียนไอโซเทอร์มการดูดซับ เพื่อให้ได้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

## 7. การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง (continuous flow experiment)

เพื่อศึกษาอัตราส่วนของถ่านต่อดิน และวิธีการบำบัดที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้ดีที่สุด ดังนี้

7.1 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิดต่อดิน โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบหลุมกรองน้ำเสีย โดยทำการบรรจุชั้นวัสดุปลูกลงในคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 x ยาว 45 เซนติเมตร ดังภาพที่ 43 คือ กรวด 67 กรัม ทราฮายาบ 49 กรัม และทรายละเอียด 72 กรัม ซึ่งเป็นการเลียนแบบชั้นวัสดุปลูกของระบบหลุมกรองน้ำเสีย ของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมภาคแม่เปิน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ ส่วนชั้นบนสุดเป็นชั้นของถ่านแต่ละชนิดผสมดิน อัตราส่วนที่ทำการศึกษา ได้แก่ 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 แต่ละอัตราส่วนใช้น้ำหนัก 400 กรัม เติมน้ำเสียสังเคราะห์ในคอลัมน์ สูงเหนือชั้นดิน 10 เซนติเมตร (ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิลิตร) จากนั้นขังแช่ทิ้งไว้ 5 วัน ปิดปากคอลัมน์ เพื่อป้องกันการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ เมื่อครบ 5 วัน ปล่อยให้น้ำเสียไหลออกจากปลายคอลัมน์จนหมด แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ หลังจากนั้นปล่อยให้คอลัมน์แห้ง 2 วัน แล้วทำการทดลองเช่นเดิมซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพที่ 43 ลำดับชั้นการบรรจุวัสดุลงในคอลัมน์โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบห้วยกรองน้ำเสีย

7.2 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิดต่อดิน โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม โดยทำการบรรจุชั้นวัสดุปลูกของถ่านแต่ละชนิดผสมดินในอัตราส่วนเหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ 7.1 ใส่คอลัมน์ เปรียบเทียบกับดินอย่างเดียว ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 7.1 แต่ใช้วิธีบำบัดเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ด้วยอัตราการไหล 10.0 มิลลิลิตร/นาที่

## 8. ศึกษาการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก

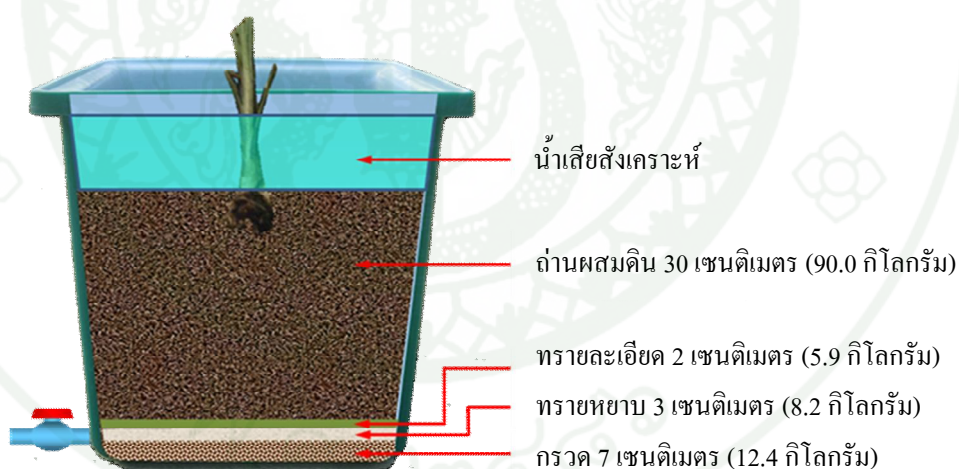
### 8.1 ศึกษาการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยระบบห้วยกรองน้ำเสียโดยใช้หน่วยทดลองขนาดเล็ก

การทดลองเป็นการเลียนแบบระบบห้วยกรองน้ำเสียตามหลักการของโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ โดยใช้กระบะพลาสติกขนาด 49×49×52 เซนติเมตร ภายในกระบะบรรจุชั้นกรวด 7 เซนติเมตร ทรายหยาบ 3 เซนติเมตร ทรายละเอียด 2 เซนติเมตร และถ่านผสมดิน 30 เซนติเมตร สัดส่วนของวัสดุที่บรรจุในกระบะดังภาพที่ 44 ใช้ถ่านแต่ละชนิดผสมดินในอัตราส่วนที่ได้จากข้อ 7.1 ปลูกต้นกกกลมและต้นรูปถ่ายมี กระบะละ 2 ต้น โดยให้ระยะห่างระหว่างต้นเท่ากับ 30 เซนติเมตร ทำการอนุบาลพืชจนมีความสูง 30 เซนติเมตร เปรียบเทียบระหว่างหน่วยทดลองที่บรรจุถ่านผสมดินและหน่วยทดลองที่บรรจุดินอย่างเดียว เดิม

น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 40.0 ลิตร ชั่งแช่ทิ้งไว้ 5 วัน เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส หลังจากนั้นก็ปล่อยให้หน่วยทดลองแห้ง 2 วัน แล้วทำการทดลองซ้ำ จนกระทั่งอัตราการเจริญเติบโต (growth rate) ของพืชทุกชนิดเท่ากับศูนย์ และในขณะทำการทดลองวัดอัตราการระเหยฟอสฟอรัสที่ผิวหน้าของหน่วยทดลอง

## 8.2 ศึกษาการบำบัดฟอสฟอรัสด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้หน่วยทดลองขนาดเล็ก

ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 8.1 แต่ใช้วิธีบำบัดเลียนแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่ไม่ได้ปลูกพืช เติมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลแตกต่างกัน คือ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที่ ในหน่วยทดลองของพืชแต่ละชนิด เก็บตัวอย่างน้ำทุก 1 ลิตร มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอสฟอรัส จนกระทั่งอัตราการเจริญเติบโตของพืชทุกชนิดเท่ากับศูนย์ ในขณะทำการทดลองวัดอัตราการระเหยฟอสฟอรัสที่ผิวหน้าของหน่วยทดลอง เมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่นำพืชทุกชนิดมาหามวลชีวภาพ (biomass) และนำดินบริเวณรอบรากพืชมาวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อกลุ่ม *Pseudomonas* sp.



ภาพที่ 44 ลำดับชั้นและวัสดุที่บรรจุในหน่วยทดลองของระบบหมุนเวียนน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม





ภาพที่ 45 หน่วยทดลองของระบบน้ำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการบำบัดฟอร์มัลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการดูดซับด้วยถ่านกกกลม และถ่านรูปถาญี ร่วมกับระบบบหล้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ได้ผลการทดลองดังนี้

### 1. ผลวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านชีวภาพ

จากการเตรียมถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกกกลม ถ่านรูปถาญี และถ่านกะลามะพร้าว เริงพาณิชย์ ดังภาพที่ 46 นำมาตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ผลดังภาพที่ 47 และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน ใช้วิธี BET ได้ผลดังตารางที่ 5



(ก)



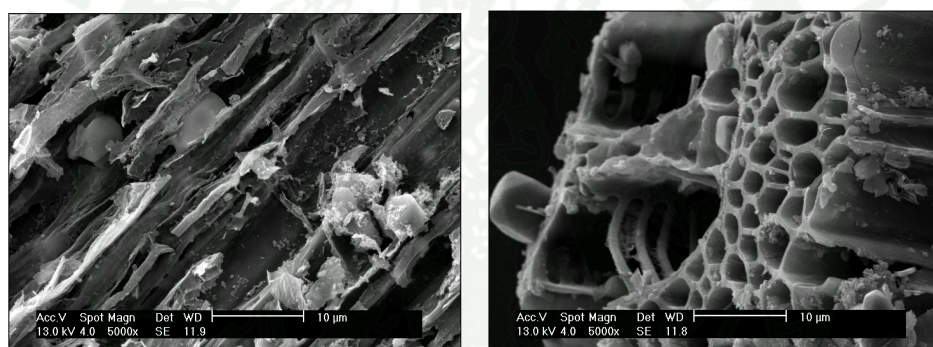
(ข)

ภาพที่ 46 ลักษณะของกกกลมและถ่านกกกลม (ก) รูปถาญีและถ่านรูปถาญี (ข) กะลามะพร้าว และถ่านกะลามะพร้าวเริงพาณิชย์ (ค)

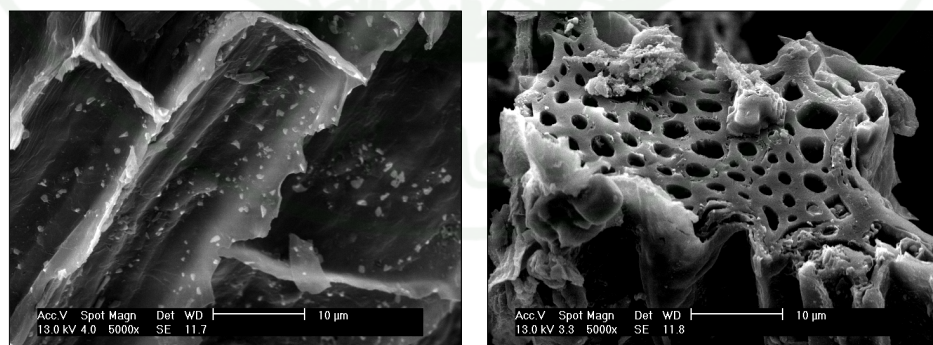


(ค)

ภาพที่ 46 (ต่อ)



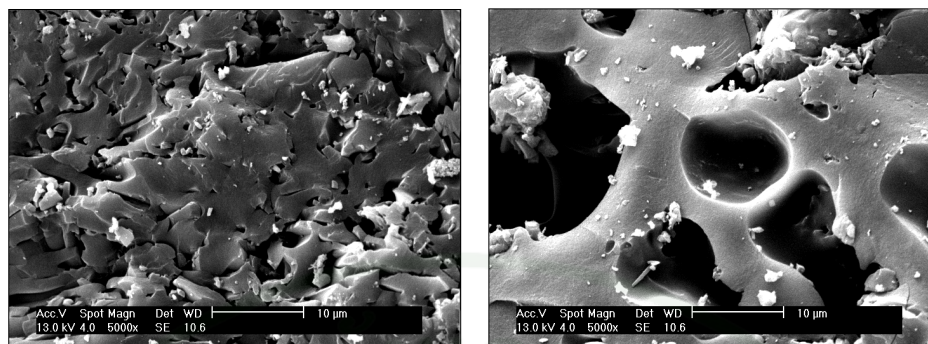
(ก)



(ข)

ภาพที่ 47 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกกกลม (ก) ถ่านรูปถาวยี่ (ข) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (ค)  
โดยใช้เครื่อง SEM กำลังขยาย 5,000 เท่า





(ค)

ภาพที่ 47 (ต่อ)

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด และขนาดรูพรุนของถ่านด้วยวิธี BET

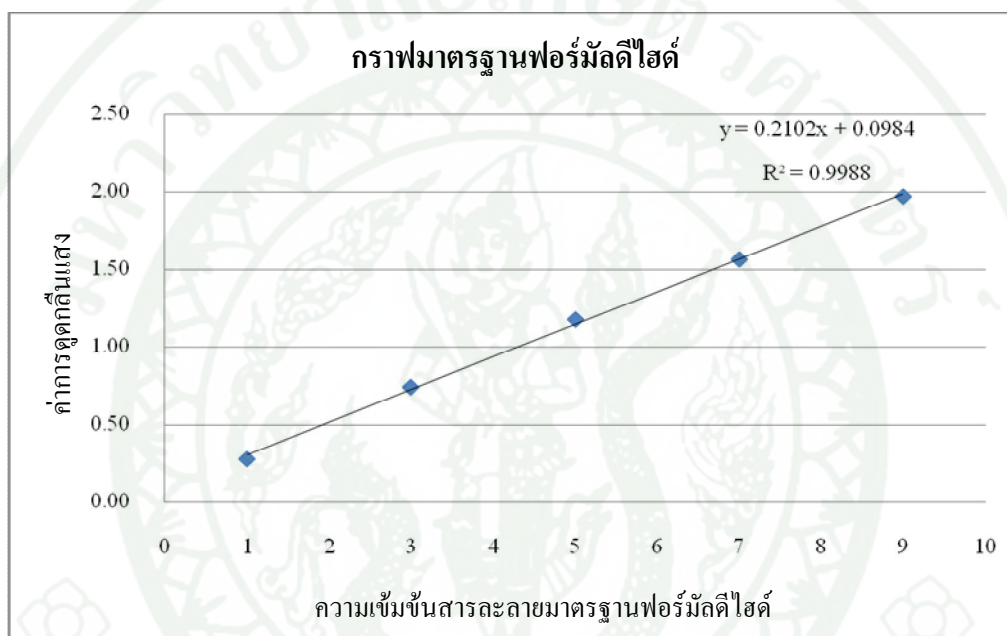
| ชนิดถ่าน                   | พื้นที่ผิว<br>(ตาราง<br>เมตร/กรัม) | ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด<br>ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม | ขนาดเส้นผ่าน<br>ศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย<br>(อังสตรอม) |
|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| ถ่านกกกลม                  | 17                                 | 2.41                                           | 56.34                                               |
| ถ่านรูปถั่ว                | 15                                 | 2.16                                           | 55.70                                               |
| ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ | 613                                | 0.34                                           | 22.19                                               |

จากตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกกกลม ถ่านรูปถั่ว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์เท่ากับ 17, 15 และ 613 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 2.41 2.16 และ 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 56.34, 55.70 และ 22.19 อังสตรอม ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ถ่านกกกลมและถ่านรูปถั่ว มีพื้นที่ผิวน้อยแต่มีปริมาตรรูพรุนมาก เนื่องจากถ่านทั้ง 2 ชนิดนี้มีเส้นใยที่เชื่อมต่อกันเป็นร่างแหตาข่ายจำนวนมากส่งผลให้ลักษณะของรูพรุนคล้ายร่างแหที่ซ้อนทับกันหลายชั้นและขนาดรูพรุนที่ใหญ่ ดังนั้นการดูดซับส่วนใหญ่จึงมีโอกาสดูดซับภายในรูพรุนมากกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์



## 2. กราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

จากการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์โดยวิธีตรวจวัดสี (colorimetric) ที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ได้กราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ดังภาพที่ 48 กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีสมการถดถอยเชิงเส้น คือ  $y = 0.2102x + 0.0984$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9988 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้



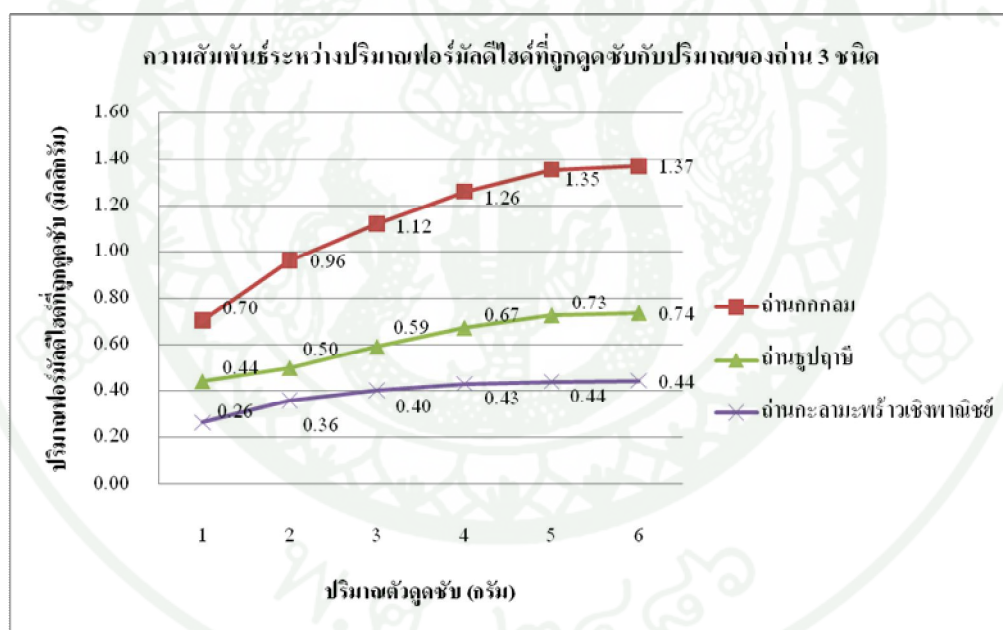
ภาพที่ 48 กราฟมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

## 3. ผลการทดลองแบบเบตซ์

เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยการดูดซับจากถ่านกักกลม ถ่านรูปถั่ว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในการทดลองใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปฏิกิริยาที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ (1-6 กรัม) พีเอช (3-9) ความเร็วรอบในการปั่นกววน (50-200 รอบ/นาที) ระยะเวลาปั่นกววน (10-120 นาที) ระยะเวลาสัมผัส (10-90 นาที) และความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ (10-50 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยแต่ละปฏิกิริยาใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 100.0 มิลลิลิตร พร้อมทั้งศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้ผลการทดลองดังนี้

### 3.1 อิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับ

ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกดูดซับด้วยถ่านทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มปริมาณถ่านประสิทธิภาพการดูดซับจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั่นเอง และเมื่อถึงจุด จุดหนึ่ง ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ เนื่องจากที่ทุกปริมาณถ่านใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากัน ดังนั้นถึงแม้จะเพิ่มปริมาณถ่านประสิทธิภาพการดูดซับยังคงใกล้เคียงเดิม โดยถ่านกกกลมและถ่านรูปถั่วมีปริมาณ 5 กรัม มีแนวโน้มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มคงที่ สามารถดูดซับได้ 1.35 และ 0.73 มิลลิกรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 49 สำหรับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ปริมาณ 4 กรัม มีแนวโน้มการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มคงที่เช่นเดียวกัน โดยสามารถดูดซับได้ 0.43 มิลลิกรัม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ ถ่านกกกลม ถ่านรูปถั่ว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ปริมาณ 5, 5 และ 4 กรัม ตามลำดับ ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในปัจจัยอื่นต่อไป

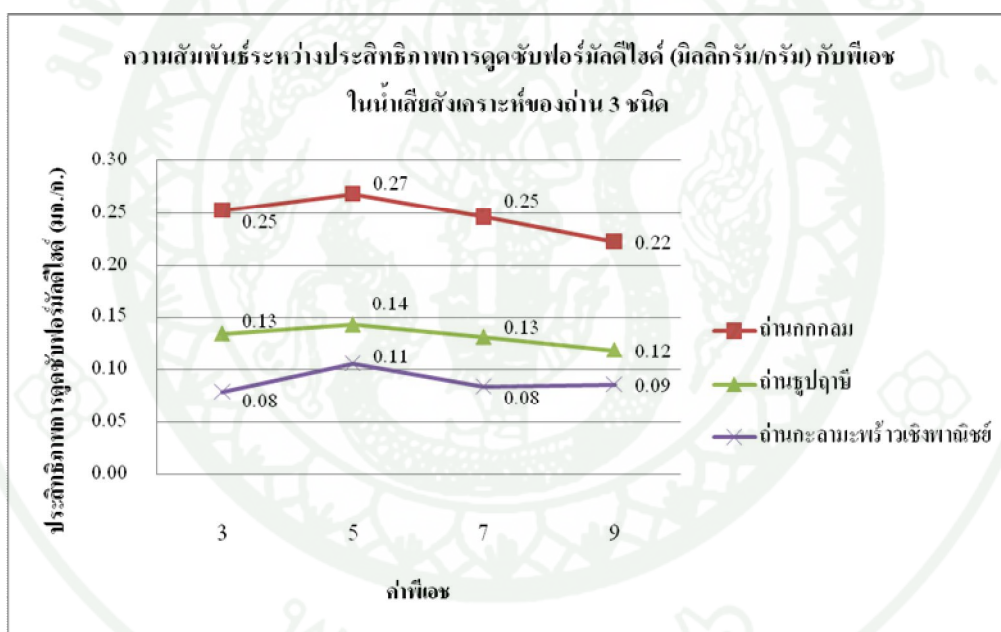


ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกดูดซับกับปริมาณของถ่าน 3 ชนิด

เมื่อทราบถึงปริมาณถ่านที่เหมาะสมแล้ว ดังนั้นในปัจจัยอื่นๆ ที่จะศึกษาต่อไป จะพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยของมิลลิกรัมฟอร์มาลดีไฮด์ที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่าน (มก./ก.)

### 3.2 อิทธิพลของพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

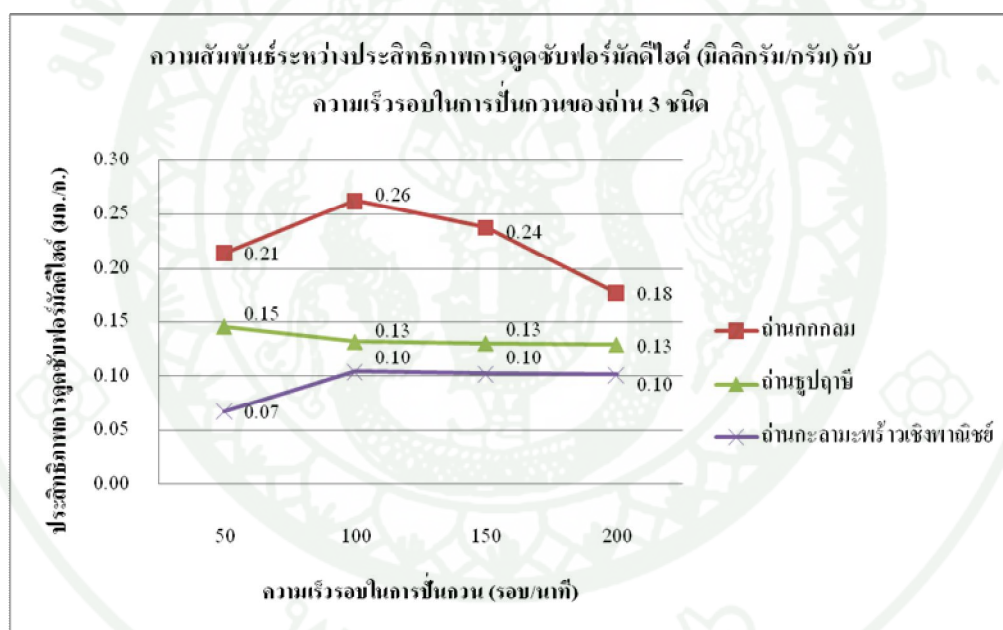
เมื่อปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5.0 ผ่านทั้ง 3 ชนิดให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ดีที่สุด เท่ากับ 0.27, 0.14 และ 0.11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 50 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวถ่านมีสภาพขี้เป็นลบเมื่อปรับพีเอชน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีสภาพเป็นกรด และทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์มีสภาพขี้เป็นบวก (เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลถูกโปรโทเนตด้วยไฮโดรเจนไอออน) จึงทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกดูดซับด้วยถ่านได้ดี เนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์มีพีเอชประมาณ 4.5-5.0 ซึ่งใกล้เคียงกับพีเอช 5.0 ที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีที่สุด และแต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นจากที่ไม่ปรับพีเอชเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นในการศึกษาต่อไป ผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาที่พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น



ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับพีเอช  
ในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่าน 3 ชนิด

### 3.3 อิทธิพลของความเร็วยรอบในการปั่นกวน

ความเร็วยรอบในการปั่นกวนของถ่านทั้ง 3 ชนิด ให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ สูงสุด เท่ากับ 100, 50 และ 100 รอบ/นาที ตามลำดับ สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้ 0.26, 0.15 และ 0.10 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 51 อธิบายได้ว่าเป็นการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวน ทำให้โมเลกุลฟอร์มาลดีไฮด์เคลื่อนที่มากขึ้น จึงมีโอกาสดัมผัสหรือถูกดูดซับด้วยถ่านทั้ง 3 ชนิด มากขึ้นนั่นเอง และการเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนยังทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ บางลง จึงทำให้โอกาสที่โมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์ถูกดูดซับที่ผิวของถ่านได้ง่ายขึ้น และมีโอกาส แพร่เข้าไปในรูพรุนเกิดการดูดซับภายในอีกด้วย แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบในการปั่นกวนเกินจุดเหมาะสม แนวโน้มการดูดซับลดลง อาจเนื่องมาจากแรงปั่นทำให้ตัวถูกดูดซับหลุดออกมา (นิพนธ์และคณิตา, 2550)



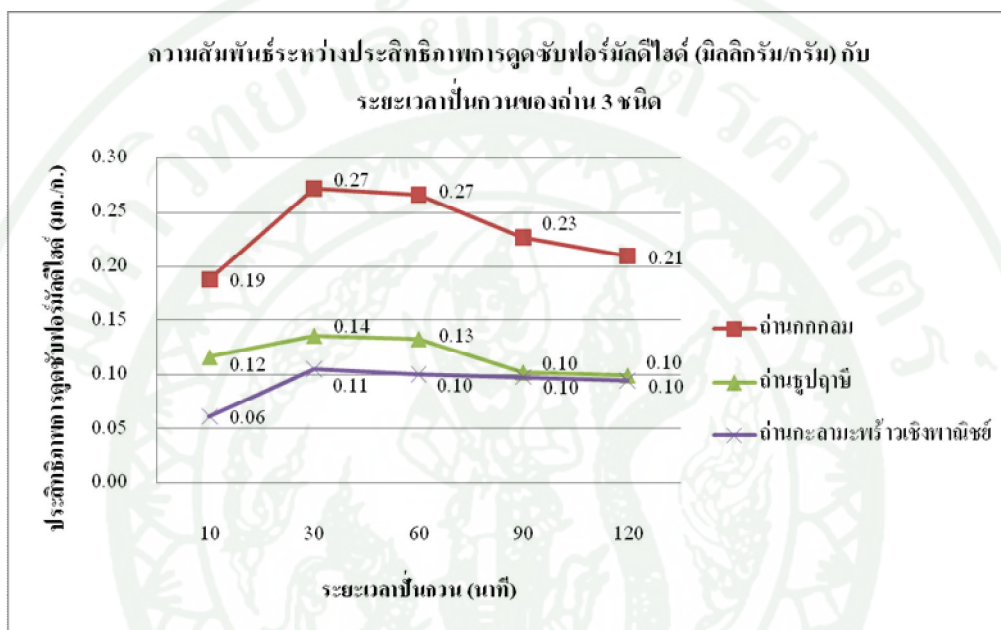
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับความเร็วยรอบในการปั่นกวน ของถ่านทั้ง 3 ชนิด

### 3.4 อิทธิพลของระยะเวลาปั่นกวนและระยะเวลาสัมผัส

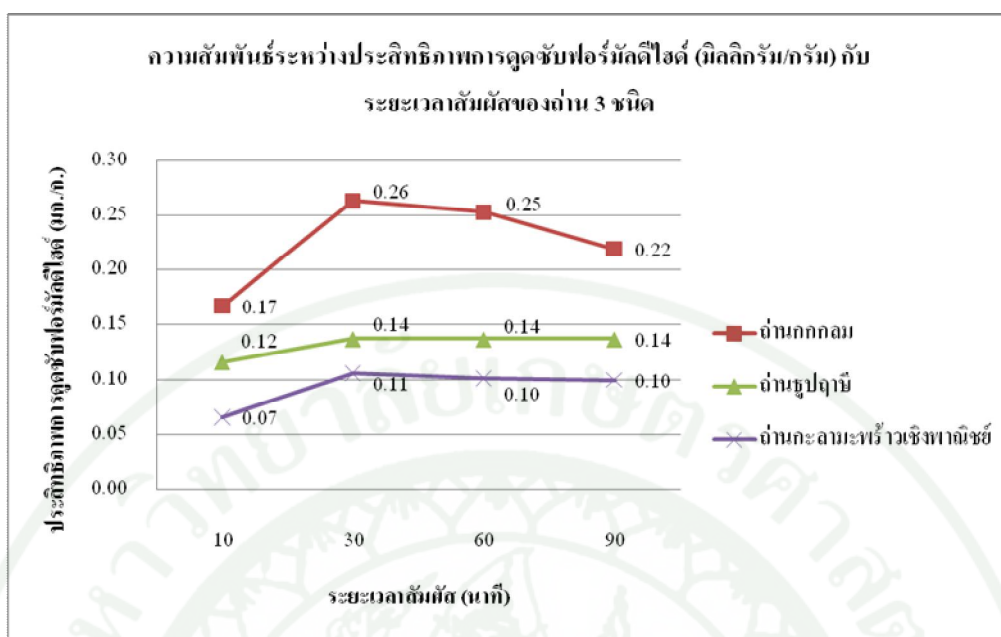
สำหรับระยะเวลาปั่นกวน พบว่าที่ระยะเวลา 30 นาที เป็นระยะเวลาที่ถ่านทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุด คือ 0.27, 0.14 และ 0.11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 52 และระยะเวลาสัมผัสที่ 30 นาที ให้ประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีเช่นกัน คือ 0.26, 0.14 และ 0.11 มิลลิกรัม/



กรัม ตามลำดับ ดังภาพที่ 53 ซึ่งให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเหมือนกัน ทั้งนี้ในระยะเวลาเริ่มต้น พื้นผิวของตัวดูดซับมีพื้นที่ในการดูดซับมาก ทำให้มีอัตราการดูดซับมากขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นผิวตัวดูดซับถูกครอบครองด้วยตัวถูกดูดซับ จนเข้าสู่ภาวะสมดุลซึ่งเป็นจุดที่ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ และหลังจากนั้น เมื่อปล่อยให้ระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง เนื่องจากเกิดกระบวนการคายซับ คือ ตัวถูกดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับ



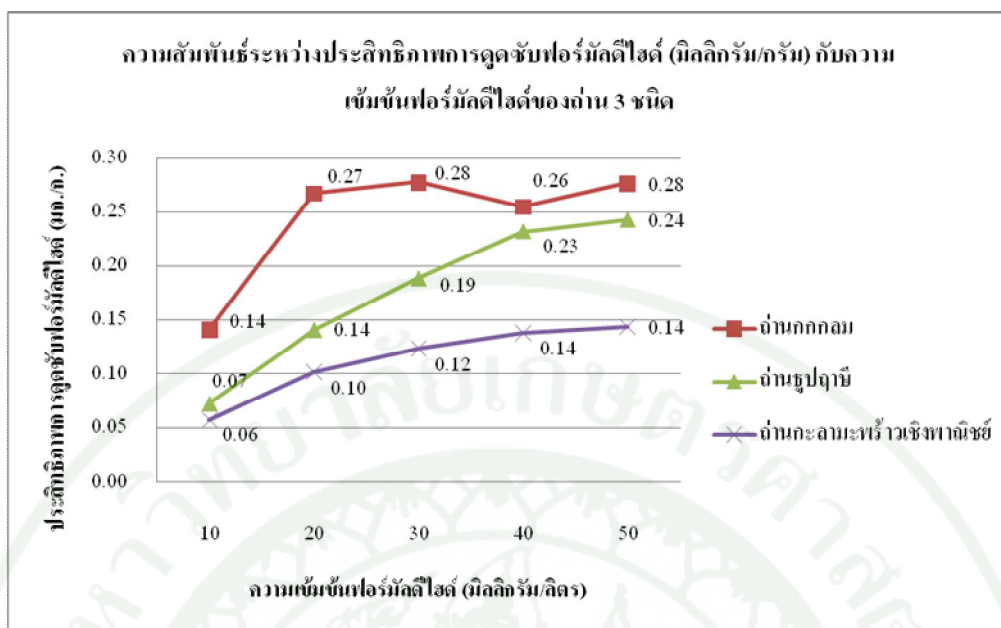
ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับระยะเวลาเป็นกวน ของถ่านทั้ง 3 ชนิด



**ภาพที่ 53** ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับระยะเวลาสัมผัส ของถ่านทั้ง 3 ชนิด

### 3.5 อิทธิพลของความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์

สำหรับความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับของถ่านทั้ง 3 ชนิด โดยใช้ ถ่านกกกลม ถ่านรูปญานิ และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ปริมาณ 5, 5 และ 4 กรัม ตามลำดับ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านโดยแปรผันปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ พบว่า ถ่านทุกชนิดมีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ ความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้น และคงที่ในที่สุด ดังภาพที่ 54 นั่นคือ การดูดซับของตัวดูดซับถึงจุดอิ่มตัว ไม่ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นเท่าไรก็มีความจุของการดูดซับเท่าเดิม และพบว่าความจุของการดูดซับสูงสุดของถ่านกกกลม ถ่านรูปญานิ และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ที่จุดสมดุล เท่ากับ 0.28, 0.24 และ 0.14 มิลลิกรัม/กรัม ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ



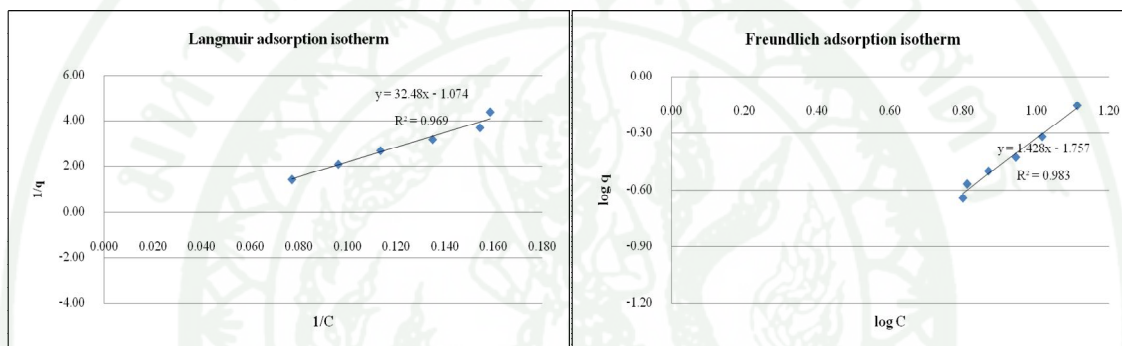
ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/กรัม) กับความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ ของถ่านทั้ง 3 ชนิด

### 3.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) จากไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิชในภาพที่ 55 (ก) และ (ข) ของถ่านกากกลบ และ (ค) และ (ง) ของถ่านรูปถั่ว พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.9690 และ 0.9830, 0.9460 และ 0.9090 ตามลำดับ ดังนั้นถ่านทั้งสองชนิดนี้ จึงมีกลไกการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์สอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช โดยกลไกการดูดซับแบบไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ คือ พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบลักษณะเดียวกันหมด มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่ หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว และสำหรับกลไกการดูดซับตามไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช คือ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวได้หลายชั้นบนพื้นผิวตัวดูดซับ (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ทั้งนี้การดูดซับของถ่านทั้งสองชนิดนี้ จะเกิดขึ้นได้ทั้งที่บริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุน เนื่องจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพพบว่า ถ่านทั้งสองชนิดมี

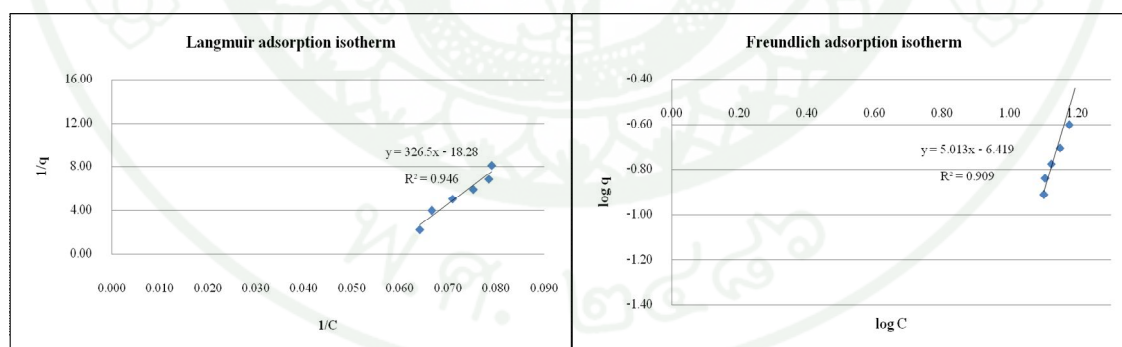
ปริมาณรพูนทั้งหมดสูงและมีขนาดรพูนที่ใหญ่กว่าถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ จึงเป็นสาเหตุให้กลไกการดูดซับสอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดิช

สำหรับถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ภาพที่ 55 (จ) และ (ฉ) พบว่า ค่า  $R^2$  ของไอโซเทอร์มฟรุนดิช เท่ากับ 0.9280 ซึ่งสูงกว่าไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ โดยมีค่าเท่ากับ 0.8280 และมีค่าต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงสอดคล้องกับไอโซเทอร์มฟรุนดิช ซึ่งการดูดซับจะเกิดได้ ด้บริเวณพื้นผิวและเกิดการดูดซับได้หลายชั้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านกะลามะพร้าวมีมากกว่า ถ่านอีกสองชนิดนั่นเอง ดังตารางที่ 5



(ก)

(ข)

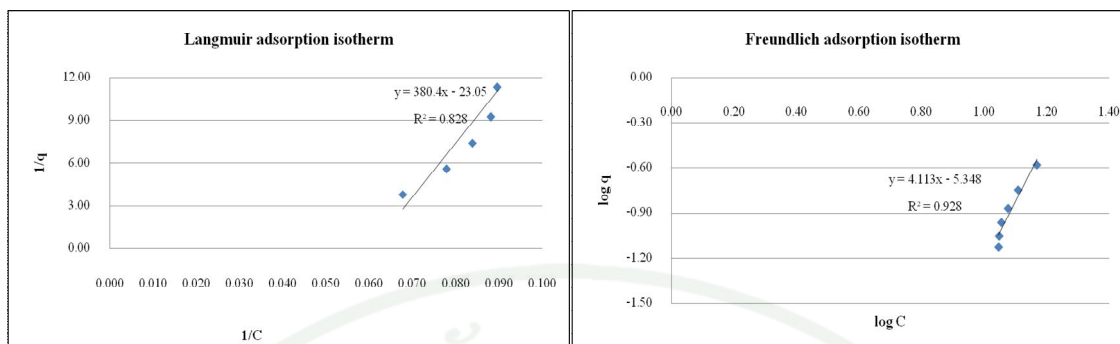


(ค)

(ง)

ภาพที่ 55 ไอโซเทอร์มแลงเมียร์ของการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ด้วย ถ่านกกกลม (ก) ถ่านรูปถาญี (ค) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (จ) และไอโซเทอร์มฟรุนดิชของการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ ด้วยถ่านกกกลม (ข) ถ่านรูปถาญี (ง) และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ (ฉ)





(จ)

(ฉ)

ภาพที่ 55 (ต่อ)

เมื่อนำสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (สมการที่ 1) และสมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิชรูปของล็อกการิทึม (สมการที่ 2) ของการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ด้วยถ่านกกกลมซึ่งเป็นถ่านที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้ดีกว่าถ่านอีกสองชนิดได้ดังนี้

สมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์

$$\frac{1}{q} = 32.480 \frac{1}{C} - 1.074 \quad \text{----- (1)}$$

จากสมการที่ 1 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 32.480 และจุดตัดบนแกน  $y$  เท่ากับ -1.074 นั่นคือ

$$\frac{1}{q_m K} = 32.480$$

$$\frac{1}{q_m} = -1.074$$

ดังนั้น  $K = -0.03$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ พบว่า ค่า  $K$  มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ แสดงว่าปริมาณฟอรั่มลดีไฮด์ถูกดูดซับได้น้อย

บนพื้นผิวของถ่านกกกลม ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจลักษณะทางกายภาพพบว่า ถ่านกกกลมมีพื้นที่ผิวน้อยนั่นเอง ดังตารางที่ 5

สมการไอโซเทอร์มฟรุนดิชรูปของล็อกการิทึม

$$\log q = -1.757 + 1.428 \log C \quad \text{-----} (2)$$

จากสมการที่ 2 เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ 1.428 และจุดตัดบนแกน y เท่ากับ -1.757 นั่นคือ

$$\log K = -1.757$$

$$1/n = 1.428$$

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรุนดิช พบว่า ค่า  $1/n$  มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณของสารถูกดูดซับได้มาก หรือบริเวณพื้นที่ดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับมีมาก ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ถ่านกกกลมมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมาก และขนาดรูพรุนใหญ่กว่าถ่านอีกสองชนิด (ตารางที่ 5) การดูดซับจึงเกิดขึ้นภายในรูพรุนได้ดีกว่าบริเวณพื้นผิวนั่นเอง

จากผลการทดลองแบบเบดซ์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยถ่านกกกลม ถ่านรูปถั่ว และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด มีสภาวะที่สามารถดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้สูงสุดเหมือนกัน คือ ที่พีเอช 5.0 ความเร็วรอบในการปั่นกววน เท่ากับ 100 รอบ/นาที ยกเว้นความเร็วรอบในการปั่นกววนของถ่านรูปถั่ว เท่ากับ 50 รอบ/นาที ระยะเวลาปั่นกววนและระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 30 นาที ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ของถ่านทั้ง 3 ชนิด โดยเฉลี่ยเท่ากับเท่ากับ 0.27, 0.14 และ 0.11 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ โดยพบว่าถ่านกกกลมสามารถดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์ได้สูงที่สุด โดยกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีภายในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับ Bansal et al. (1998) ที่กล่าวว่า วัสดุที่มีรูพรุน และมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 อังสตรอม จะดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ดีกว่าถ่านที่มีรูพรุนเล็ก และสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับ พบว่า ถ่านกกกลมและถ่านรูปถั่ว มีกลไกการดูดซับฟอร์มัลดีไฮด์สอดคล้องกับทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดิช

ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มีกลไกการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดิชเพียงอย่างเดียว

#### 4. การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง

จากการศึกษาอัตราส่วนของถ่านต่อดิน และวิธีการบำบัดที่ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีที่สุด มีผลดังนี้

4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิดต่อดิน โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบห้วยกรองน้ำเสียพบว่า อัตราส่วนของถ่านแต่ละชนิดผสมดินที่มีผลต่อการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ให้สูงจากชั้นถ่านผสมดิน 10 เซนติเมตร ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 200 มิลลิตร ชั่งแห้งทิ้งไว้ 5 วัน ปิดปากคอถ่มนึ่งเพื่อป้องกันการระเหยของฟอर्मัลดีไฮด์ จากนั้นปล่อยให้ น้ำเสียไหลออกจากปลายคอถ่มนึ่งจนหมด แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์ และคำนวณหาประสิทธิภาพดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์ จากนั้นปล่อยให้คอถ่มนึ่งแห้ง 2 วัน แล้วทำการทดลองเช่นเดิมซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งมีผลการทดลอง ดังตารางที่ 6, 7, 8, 9, 10 และ 11

ตารางที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกกกลมผสมดินและความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด

| การบำบัดครั้งที่ | ความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |      |      |      |      |      |
|------------------|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                  | อัตราส่วนถ่านกกกลม:ดิน                            |      |      |      |      |      |
|                  | 1:10                                              | 1:20 | 1:30 | 1:40 | 1:50 | 1:60 |
| 1                | 0.32                                              | 0.13 | 0.41 | 0.45 | 0.97 | 1.13 |
| 2                | 0.54                                              | 0.31 | 0.92 | 1.00 | 0.99 | 1.16 |
| 3                | 0.63                                              | 1.59 | 1.14 | 1.12 | 1.02 | 1.17 |
| เฉลี่ย           | 0.50                                              | 0.68 | 0.83 | 0.86 | 0.99 | 1.16 |

ตารางที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกกกลมผสมดินและประสิทธิภาพการบำบัด  
ฟอร์มาลดีไฮด์

| การบำบัดครั้งที่ | ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ |       |       |       |       |       |
|------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | อัตราส่วนถ่านกกกลม:ดิน       |       |       |       |       |       |
|                  | 1:10                         | 1:20  | 1:30  | 1:40  | 1:50  | 1:60  |
| 1                | 98.40                        | 99.36 | 97.93 | 97.76 | 95.15 | 94.35 |
| 2                | 97.28                        | 98.45 | 95.38 | 94.98 | 95.06 | 94.19 |
| 3                | 96.86                        | 92.06 | 94.29 | 94.42 | 94.90 | 94.13 |
| เฉลี่ย           | 97.51                        | 96.62 | 95.87 | 95.72 | 95.04 | 94.22 |

จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่า ในแต่ละอัตราส่วนของถ่านกกกลมผสมดินนั้นประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าสูงที่สุดในการบำบัดครั้งที่ 1 โดยอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 มีร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 98.40, 99.36, 97.93, 97.76, 95.15 และ 94.35 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์จะลดลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งการบำบัด เมื่อเปรียบเทียบกับรอบแรก เนื่องจากในการบำบัดครั้งต่อไป พื้นผิวของตัวดูดซับมีการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เอาไว้ หากมีการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านถ่านกกกลมผสมดินต่อไปอีก ตัวดูดซับจะอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนของถ่านกกกลมผสมดินมีประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มลดลงหรือคงที่ เมื่อปริมาณน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านมากขึ้นและจำนวนครั้งการบำบัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วนถ่านกกกลมต่อดิน เท่ากับ 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ใช้ถ่านน้อยแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์สูงคือ เหลือปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เฉลี่ย 0.99 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางที่ 6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดคือ ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร



ตารางที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่วงรูปถ่ายผสมดินและความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์  
ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด

| การบำบัดครั้งที่ | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |      |      |      |      |      |
|------------------|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                  | อัตราส่วนถ่วงรูปถ่าย:ดิน                          |      |      |      |      |      |
|                  | 1:10                                              | 1:20 | 1:30 | 1:40 | 1:50 | 1:60 |
| 1                | 0.84                                              | 0.99 | 1.01 | 1.06 | 1.19 | 1.54 |
| 2                | 1.05                                              | 1.15 | 1.13 | 1.37 | 1.30 | 2.09 |
| 3                | 1.32                                              | 1.28 | 1.39 | 1.56 | 1.53 | 2.45 |
| เฉลี่ย           | 1.07                                              | 1.14 | 1.18 | 1.33 | 1.34 | 2.03 |

ตารางที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่วงรูปถ่ายผสมดินและประสิทธิภาพการบำบัด  
ฟอร์มาลดีไฮด์

| การบำบัดครั้งที่ | ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ |       |       |       |       |       |
|------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | อัตราส่วนถ่วงรูปถ่าย:ดิน     |       |       |       |       |       |
|                  | 1:10                         | 1:20  | 1:30  | 1:40  | 1:50  | 1:60  |
| 1                | 95.81                        | 95.07 | 94.94 | 94.69 | 94.07 | 92.28 |
| 2                | 94.77                        | 94.27 | 94.37 | 93.13 | 93.50 | 89.53 |
| 3                | 93.39                        | 93.61 | 93.04 | 92.19 | 92.35 | 87.76 |
| เฉลี่ย           | 94.66                        | 94.32 | 94.12 | 93.34 | 93.31 | 89.86 |

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่า ในแต่ละอัตราส่วนของถ่วงรูปถ่ายผสมดินนั้นประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าสูงที่สุดในการบำบัดครั้งที่ 1 โดยอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 มีร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 95.81, 95.07, 94.94, 94.69, 94.07 และ 92.28 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์จะลดลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งการบำบัดเช่นเดียวกับถ่านกกกลม

ผู้วิจัยเลือกอัตราส่วนถ่วงรูปถ่ายต่อดิน เท่ากับ 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ใช้ถ่านน้อยแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

สูงใกล้เคียงกับอัตราส่วน 1:40 และเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบถ่วงถักกลม ในการทดลองขั้นต่อไป อีกด้วย

**ตารางที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดินและความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือหลังจากผ่านการบำบัด

| การบำบัดครั้งที่ | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |      |      |      |      |      |
|------------------|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                  | อัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์:ดิน           |      |      |      |      |      |
|                  | 1:10                                              | 1:20 | 1:30 | 1:40 | 1:50 | 1:60 |
| 1                | 0.58                                              | 0.56 | 0.71 | 0.75 | 1.08 | 1.34 |
| 2                | 0.80                                              | 0.73 | 1.03 | 1.19 | 1.14 | 1.63 |
| 3                | 0.98                                              | 1.43 | 1.27 | 1.34 | 1.28 | 1.81 |
| เฉลี่ย           | 0.78                                              | 0.91 | 1.00 | 1.09 | 1.17 | 1.59 |

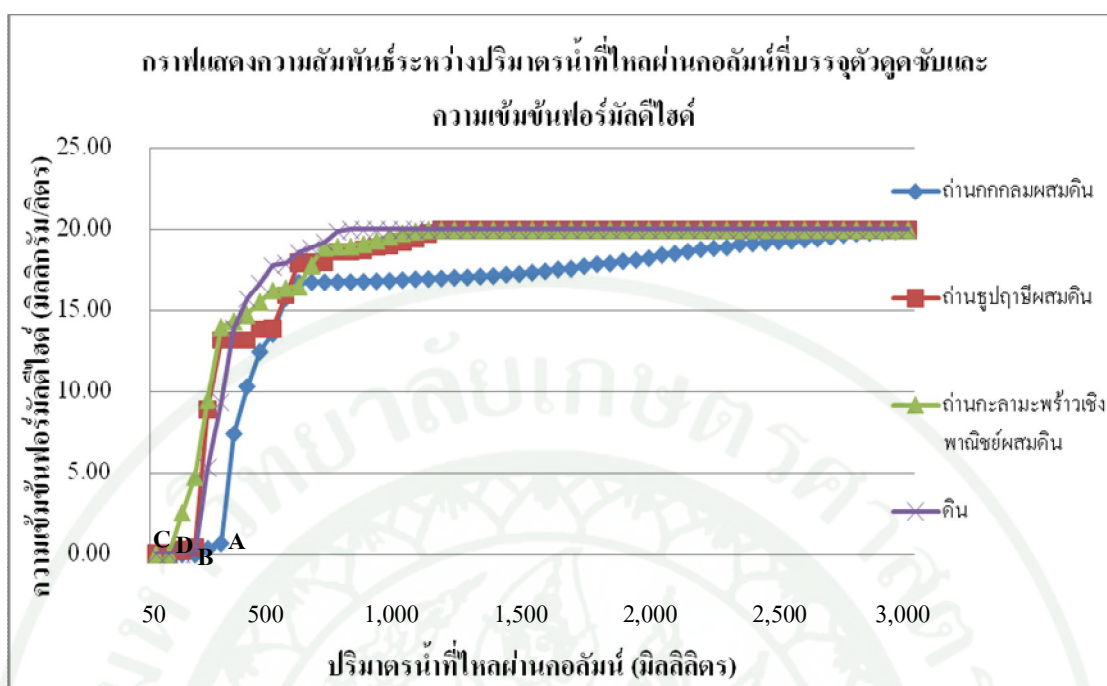
**ตารางที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดินและประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์

| การบำบัดครั้งที่ | ร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์            |       |       |       |       |       |
|------------------|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | อัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์:ดิน |       |       |       |       |       |
|                  | 1:10                                    | 1:20  | 1:30  | 1:40  | 1:50  | 1:60  |
| 1                | 97.11                                   | 97.22 | 96.44 | 96.23 | 94.61 | 93.32 |
| 2                | 96.03                                   | 96.36 | 94.88 | 94.06 | 94.28 | 91.86 |
| 3                | 95.13                                   | 92.84 | 93.67 | 93.31 | 93.63 | 90.95 |
| เฉลี่ย           | 96.09                                   | 95.47 | 94.99 | 94.53 | 94.17 | 92.04 |

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่า ในแต่ละอัตราส่วนของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดินนั้นประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละอัตราส่วนมีค่าใกล้เคียงกัน และจะมีค่าสูงที่สุดในการบำบัดครั้งที่ 1 โดยอัตราส่วน 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50 และ 1:60 มีร้อยละการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 97.11, 97.22, 96.44, 96.23, 94.61 และ 93.32 ตามลำดับ และหากการบำบัดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์จะลดลงเรื่อยๆ ตามจำนวนครั้งการบำบัด เช่นเดียวกับถ่านถักกลมและถ่านรูปทูลาย

ผู้วิจัยเลือกอัตราส่วนถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ต่อดิน เท่ากับ 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ใช้ถ่านน้อยแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์สูงใกล้เคียงกับอัตราส่วน 1:40 และเพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบกับถ่านกกกลมและถ่านรูปถาวยี่

4.2 ผลการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิดต่อดิน โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ทดลองโดยใช้ถ่านแต่ละชนิดผสมกับดิน ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ได้จากการทดลองข้อ 4.1 คือ 1:50 น้ำหนักสุทธิ 400 กรัม บรรจุในคอลัมน์แก้วขนาด 4.5x45 เซนติเมตร แต่ละคอลัมน์และอีกหนึ่งคอลัมน์บรรจุดินอย่างเดียว 400 กรัม เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับอัตราการไหลเท่ากับ 10 มิลลิลิตร/นาที่ เก็บน้ำตัวอย่างที่ไหลผ่านออกมาทุก 50 มิลลิลิตร นำมาวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ โดยจะผ่านน้ำเสียสังเคราะห์จนกระทั่งประสิทธิภาพดูดซับลดลงจนคงที่ หรือความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัม/ลิตร เขียน breakthrough curve ของถ่านกกกลมผสมดิน ถ่านรูปถาวยี่ผสมดิน ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดิน และดินอย่างเดียว ได้ดังภาพที่ 56 พบว่า หากมีการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับต่อไป ตัวดูดซับจะอิ่มตัวและหมดสภาพไปในที่สุด โดยตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด พบว่า ที่จุด A, B, C และ D เป็นจุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับและความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์

ตารางที่ 12 ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่จุดตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพและหมดสภาพของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที

| ชนิดตัวดูดซับ                         | ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (มิลลิลิตร) |                         |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
|                                       | จุดเริ่มหมดสภาพ<br>การดูดซับ         | จุดหมดสภาพ<br>การดูดซับ |
| ถ่านกกกลมผสมดิน 1:50                  | 300                                  | 2,950                   |
| ถ่านรูปภาชีผสมดิน 1:50                | 200                                  | 1,200                   |
| ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดิน 1:50 | 100                                  | 1,100                   |
| ดินอย่างเดียว                         | 200                                  | 800                     |

จากตารางที่ 12 จะเห็นว่าตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิด คือ ถ่านกกกลมผสมดิน ถ่านรูปภาชีผสมดิน ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ผสมดิน และดินอย่างเดียว มีจุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพที่ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านคอลัมน์เท่ากับ 300, 200, 100 และ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยถ่านกกกลม



ผสมดิน เริ่มหมดสภาพช้าที่สุด เนื่องจากมีปริมาณรพูนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชนิดอื่น (ตารางที่ 5) จึงทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี และที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาทีก ทำให้ตัวถักดูดซับมีโอกาสเคลื่อนผ่านตัวดูดซับแบบช้าๆ จึงเกิดการดูดซับได้มากนั่นเอง และนอกจากนี้ ตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้นานที่สุด หรือผ่านน้ำเสียสังเคราะห์ได้ในปริมาณมากที่สุดกว่าจะหมดสภาพ นั่นคือ จุดหมดสภาพเท่ากับ 2,950, 1,200, 1,100 และ 800 มิลลิลิตร ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือก ถ่านกกกลมผสมดิน ในอัตราส่วน 1:50 สำหรับเป็นวัสดุปลูกพืชในระบบหมุนำกรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ในการศึกษาขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้เป็นระยะเวลาเวลานานที่สุด

## 5. ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้เทคนิคการกรองในหน่วยทดลองขนาดเล็ก

### 5.1 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยระบบหมุนำกรองน้ำเสียโดยใช้หน่วยทดลองขนาดเล็ก

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม และต้นรูปฤาษี โดยเปรียบเทียบระหว่างหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินอัตราส่วน 1:50 และหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินอย่างเดียว เป็นวัสดุปลูก ขังน้ำเสียสังเคราะห์ 40.0 ลิตร แซ่ทิ้งไว้ 5 วัน เก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ หลังจากนั้นปล่อยให้หน่วยทดลอง แซ่ทิ้ง 2 วัน พบว่าทุกหน่วยทดลองสามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุดในสัปดาห์ที่ 1 ดังตารางที่ 13 โดยหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินปลูกต้นกกกลม ต้นรูปฤาษี และหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินอย่างเดียวปลูกต้นกกกลม และต้นรูปฤาษี สามารถบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้เท่ากับร้อยละ 99.53, 96.35, 78.00 และ 68.67 ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ร้อยละการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในหน่วยทดลองของการบำบัดแบบหย้ากรองน้ำเสีย

| ลำดับที่ | ร้อยละการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ |                |                           |                |
|----------|-----------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
|          | หน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่าน  |                | หน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดิน |                |
|          | กกกลมผสมดินอัตราส่วน 1:50   |                | อย่างเดียว                |                |
|          | ปลูกต้นกกกลม                | ปลูกต้นรูปถาญี | ปลูกต้นกกกลม              | ปลูกต้นรูปถาญี |
| 1        | 99.53                       | 96.35          | 78.00                     | 68.67          |
| 2        | 98.53                       | 96.17          | 77.40                     | 64.67          |
| 3        | 97.90                       | 95.85          | 76.00                     | 62.67          |
| 4        | 97.66                       | 95.42          | 72.00                     | 56.67          |
| 5        | 97.20                       | 95.35          | 66.00                     | 52.67          |

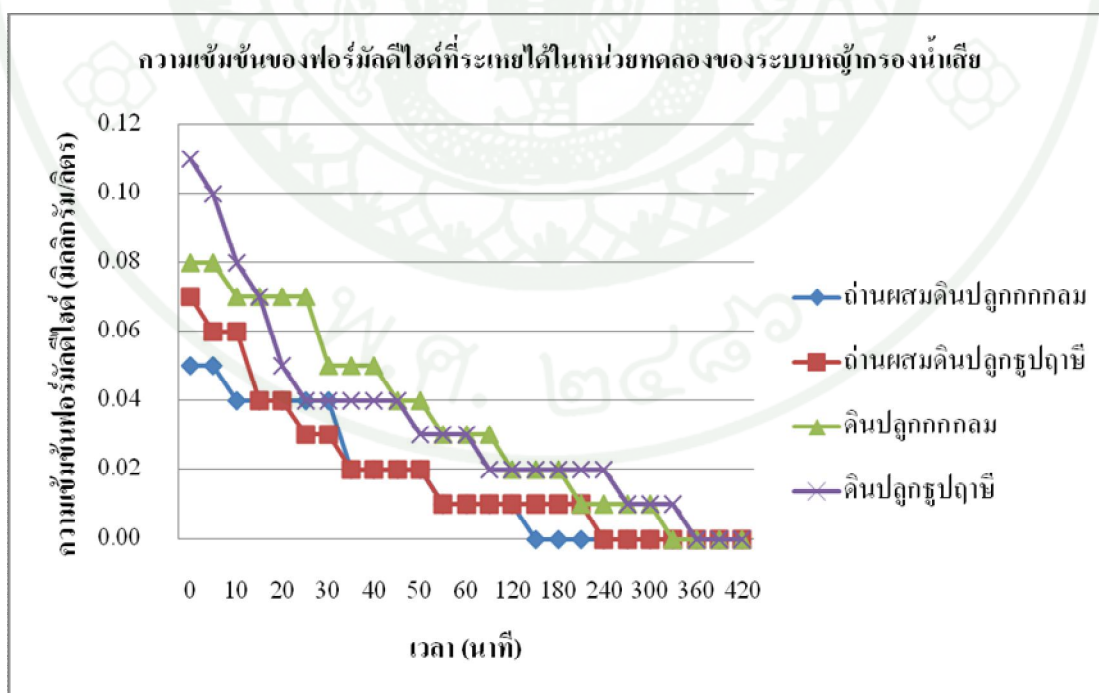
จากตารางที่ 13 พบว่า หน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินและปลูกต้นกกกลมมีประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ได้สูงสุด คือ ร้อยละ 99.53 โดยพบฟอรั่มลดีไฮด์คงเหลือ 0.09 มิลลิกรัม/ลิตร ในลำดับที่ 1 (ตารางที่ 14) และทุกลำดับของหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินปลูกต้นกกกลม และต้นรูปถาญี สามารถบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง คือ ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากเมื่อปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ลงในหน่วยทดลอง น้ำเสียจะไหลผ่านและเคลื่อนที่ไปในแนวดิ่ง เมื่อไหลผ่านชั้นวัสดุปลูกที่มีถ่านผสมอยู่ ถ่านจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้ดียิ่งขึ้น และหากปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่านหน่วยทดลองต่อไปเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์มีแนวโน้มลดลง จนถ่านกกกลมอิ่มตัวด้วยฟอรั่มลดีไฮด์และหมดสภาพการดูดซับในที่สุด

ทั้งนี้หน่วยทดลองที่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูก ดินมีความสามารถในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้เช่นกัน แต่หากมีการนำตัวดูดซับผสมกับดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์หรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้ตัวดูดซับ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้น และสามารถปลูกพืชให้เจริญเติบโตร่วมได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด

ตารางที่ 14 ความเข้มข้นฟอรั่มัลดีไฮด์ที่เหลือ ในหน่วยทดลองของการบำบัดแบบห้ำกรองน้ำเสีย

| สัปดาห์ที่ | ความเข้มข้นฟอรั่มัลดีไฮด์ (มิลลิกรัม/ลิตร) |                |                           |                |
|------------|--------------------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
|            | หน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่าน                 |                | หน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดิน |                |
|            | กกกลมผสมดินอัตราส่วน 1:50                  |                | อย่างเดียว                |                |
|            | ปลูกต้นกกกลม                               | ปลูกต้นรฐปญาธิ | ปลูกต้นกกกลม              | ปลูกต้นรฐปญาธิ |
| 1          | 0.09                                       | 0.73           | 4.40                      | 6.27           |
| 2          | 0.29                                       | 0.77           | 4.52                      | 7.07           |
| 3          | 0.42                                       | 0.83           | 4.80                      | 7.47           |
| 4          | 0.47                                       | 0.92           | 5.60                      | 8.67           |
| 5          | 0.56                                       | 0.93           | 6.80                      | 9.47           |

นอกจากนี้ได้ทำการวัดการระเหยของฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ผิวหน้าของหน่วยทดลองขณะทำการทดลองโดยวัดตั้งแต่เริ่มต้น และทุกๆ 5 นาที เหนือผิวหน้า 5 เซนติเมตร ได้ผลดังภาพที่ 57



ภาพที่ 57 ความเข้มข้นของฟอรั่มัลดีไฮด์ที่ระเหยได้ในหน่วยทดลองของระบบห้ำกรองน้ำเสีย

จากภาพที่ 57 พบว่า แนวโน้มการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผิวน้ำในหน่วยทดลองของระบบหมุนำกรองน้ำเสีย มีแนวโน้มลดลงจนถึง 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อระยะเวลาผ่านไปเรื่อยๆ โดยหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินปลูกต้นกกกลม ต้นรูปถ่ายิ และหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินอย่างเดียวปลูกต้นกกกลม และต้นรูปถ่ายิ ตรวจไม่พบการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อระยะเวลาผ่านไป 150, 240, 330 และ 360 นาที ตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบคือ 0.11 มิลลิกรัม/ลิตร ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินปลูกต้นรูปถ่ายิ ทั้งนี้โดยปกติมนุษย์สามารถได้กลิ่นฟอร์มาลดีไฮด์ที่กระจายอยู่ในอากาศที่ความเข้มข้น 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร และช่วงชีวิตของฟอร์มาลดีไฮด์ในบรรยากาศนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 7.1-71.3 ชั่วโมง และการสลายฟอร์มาลดีไฮด์พบว่า รังสียูวีสามารถสลายโมเลกุลฟอร์มาลดีไฮด์ได้ ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง และอุณหภูมิ และฟอร์มาลดีไฮด์ยังถูกสลายในชั้นโทรโพสเฟียร์ระดับล่างโดยทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (OH) เปลี่ยนไปเป็นน้ำ (H<sub>2</sub>O) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา (Moortgat et al., 1998) ดังนั้นฟอร์มาลดีไฮด์ที่ระเหยในความเข้มข้นที่น้อยนั้นจึงสามารถสลายได้ในบรรยากาศนั่นเอง

## 5.2 ผลการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมโดยใช้หน่วยทดลองขนาดเล็ก

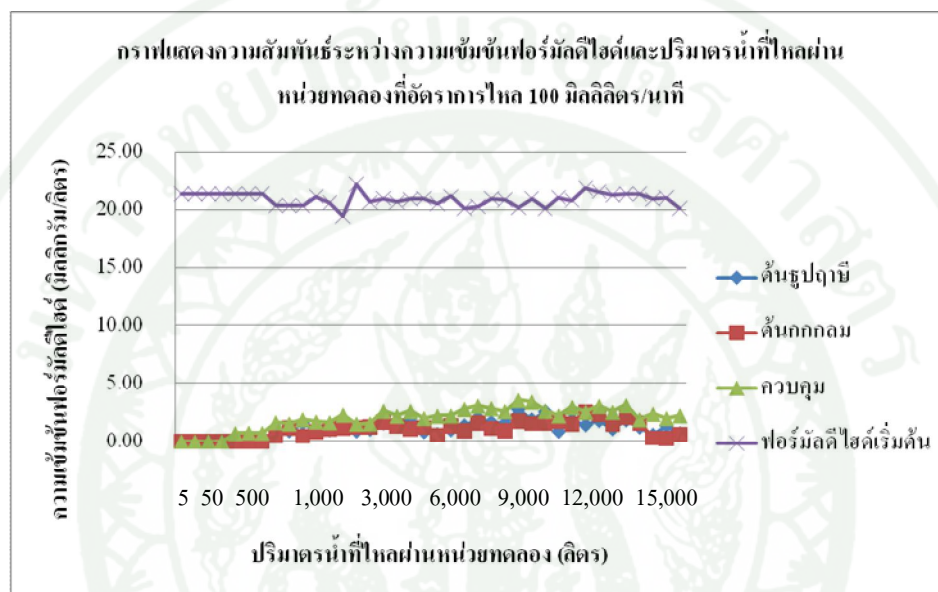
ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในน้ำเสีย โดยใช้วิธีบำบัดเลียนแบบระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม เติมน้ำเสียสังเคราะห์ให้ไหลแบบต่อเนื่องด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกันคือ 100, 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดินและปลูกพืชเปรียบเทียบกับหน่วยทดลองที่ไม่ได้ปลูกพืช เก็บตัวอย่างน้ำทุก 1 ลิตร มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ จนกระทั่งอัตราการเจริญเติบโตของพืชทุกชนิดเท่ากับศูนย์ ทั้งนี้ในขณะที่ทำการทดลองวัดการระเหยฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผิวน้ำของหน่วยทดลอง และเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่นำพืชทุกชนิดมาหามาวิเคราะห์ปริมาณเชื้อกลุ่ม *Pseudomonas* sp. ที่มีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์

สำหรับการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์เมื่อปล่อยน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่หน่วยทดลองที่ปลูกพืชแต่ละชนิด ไม่พบการระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ที่ผิวน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปล่อยให้น้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่หน่วยทดลอง น้ำเสียมีการซึมผ่านชั้นวัสดุปลูกอย่างรวดเร็ว ไม่มีการขังน้ำที่บริเวณผิวดินในช่วงเริ่มต้น โดยเฉพาะที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ไม่มีน้ำขังที่ผิวของหน่วยทดลอง และเมื่อวัสดุปลูกมีการดูดซับน้ำอิ่มตัวแล้ว ที่อัตราการไหล 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาที จะมีระดับน้ำขังที่ผิวของหน่วยทดลองสูง 5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีอัตราการปล่อยน้ำเข้า

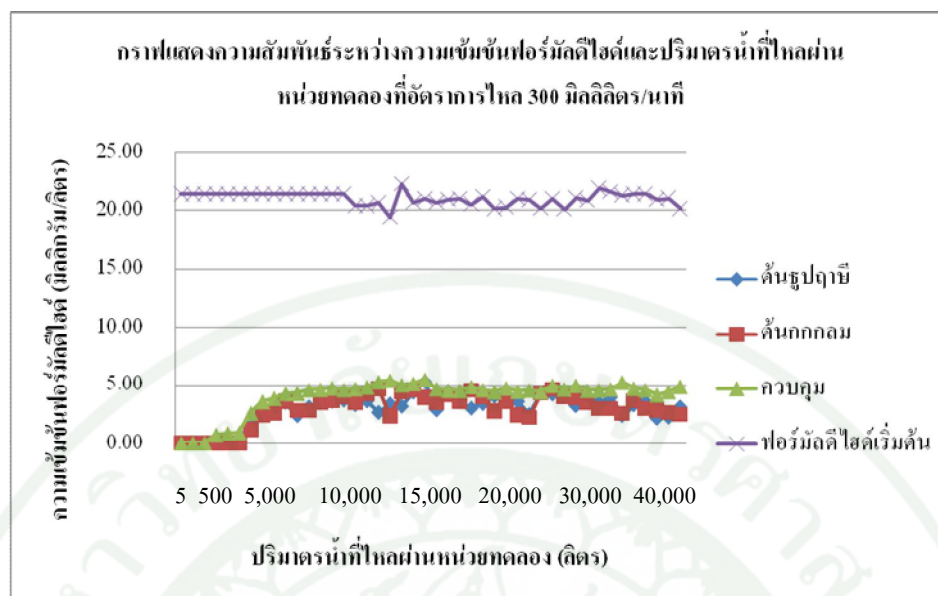


หน่วยทดลองเร็วกว่าที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ แต่ทั้งนี้ไม่พบฟอร์มัลดีไฮด์ที่มีการระเหยเช่นกันตลอดการทดลอง

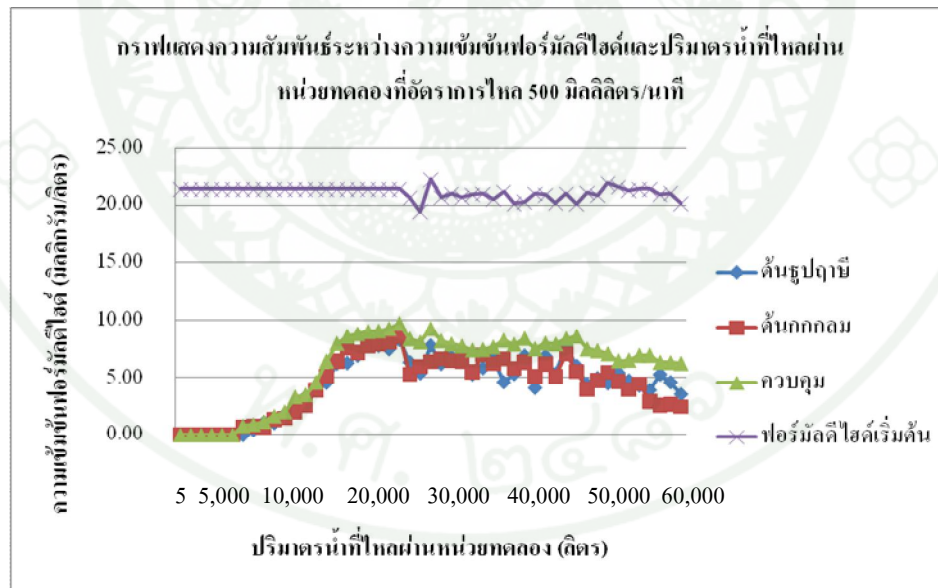
เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์ที่ตรวจพบและปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองแต่ละอัตราการไหล ของพืชแต่ละชนิดได้ดังภาพที่ 58, 59 และ 60



ภาพที่ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มัลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่



ภาพที่ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน  
หน่วยทดลองที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่



ภาพที่ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่าน  
หน่วยทดลองที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่

จากภาพที่ 58, 59 และ 60 จะเห็นว่าแนวโน้มการบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ของหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ต้นรูปถ่ายิ และชุดควบคุม มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือในระยะเริ่มต้นของการบำบัดวัสดุปลูกจะทำหน้าที่หลักในการดูดซับฟอर्मัลดีไฮด์เอาไว้ และเมื่อมีการปล่อยน้ำเสียไหลผ่านหน่วยทดลองต่อไป ตัวดูดซับจะเริ่มอิ่มตัวจึงทำให้พบปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้จุดเริ่มหมดสภาพ (เริ่มตรวจพบปริมาณฟอर्मัลดีไฮด์) ของหน่วยทดลองแต่ละชนิด ดังตารางที่ 15

เมื่อปล่อยน้ำเสียต่อไปแนวโน้มการบำบัดเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากมีกลไกการทำงานร่วมกันภายในหน่วยทดลอง คือวัสดุปลูก (ถ่านกักกลมผสมดินอัตราส่วน 1:50) ทำหน้าที่ในการดูดซับและกักเก็บฟอर्मัลดีไฮด์ไว้และปลดปล่อยออกมาอย่างช้าๆ เพื่อให้จุลินทรีย์ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการย่อยสลายเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์ และพืชที่ปลูกในหน่วยทดลองทำหน้าที่ดึงดูดสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นธาตุอาหารไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่งผลทำให้ฟอर्मัลดีไฮด์ในน้ำเสียลดลง ทั้งนี้ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ พบฟอर्मัลดีไฮด์ที่เหลือหลังผ่านการบำบัดของหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ต้นรูปถ่ายิ และชุดควบคุม โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง เท่ากับ 1.03, 1.13 และ 1.98 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 27) ในขณะที่ความเข้มข้นฟอर्मัลดีไฮด์เริ่มต้นโดยเฉลี่ย เท่ากับ 20.85 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละการบำบัด เท่ากับ 95.06, 94.58 และ 90.50 ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่ พบฟอर्मัลดีไฮด์ที่ผ่านการบำบัดของหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ต้นรูปถ่ายิ และชุดควบคุม โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง เท่ากับ 2.89, 2.91 และ 4.00 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 28) คิดเป็นร้อยละการบำบัด เท่ากับ 86.14, 86.04 และ 80.82 ตามลำดับ และสำหรับอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่ พบฟอर्मัลดีไฮด์ที่ผ่านการบำบัดของหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ต้นรูปถ่ายิ และชุดควบคุม โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง เท่ากับ 4.38, 4.51 และ 5.96 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ (ตารางผนวกที่ 29) คิดเป็นร้อยละการบำบัด เท่ากับ 78.99, 78.37 และ 71.42 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าทุกอัตราการไหลหน่วยทดลองที่ปลูกพืชสามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีกว่าหน่วยทดลองที่ไม่ปลูกพืช และหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมสามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้ดีกว่าหน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปถ่ายิทุกอัตราการไหล และสามารถบำบัดฟอर्मัลดีไฮด์ได้สูงสุดที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่

ตารางที่ 15 ปริมาตรของน้ำเสียสังเคราะห์ที่จุดตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพของหน่วยทดลอง

| หน่วยทดลอง                 | ปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ (ลิตร) |     |     |
|----------------------------|---------------------------------|-----|-----|
|                            | จุดเริ่มหมดสภาพการดูดซับ        |     |     |
|                            | อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาท)     |     |     |
|                            | 100                             | 300 | 500 |
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม  | 20                              | 15  | 7   |
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปไข่ | 20                              | 12  | 8   |
| หน่วยทดลองชุดควบคุม        | 10                              | 8   | 7   |

จากตารางที่ 15 จะเห็นหน่วยทดลองทั้ง 3 ชนิด คือ หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ต้นรูปไข่ และชุดควบคุม มีจุดที่ตัวดูดซับเริ่มหมดสภาพที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาท เมื่อปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ไหลผ่าน เท่ากับ 20, 20 และ 10 ลิตร ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาท เท่ากับ 15, 12 และ 8 ลิตร ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาท เท่ากับ 7, 8 และ 7 ลิตร ตามลำดับ โดยหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมเริ่มหมดสภาพช้าที่สุด ทั้งนี้เมื่ออัตราการเจริญเติบโต เท่ากับศูนย์ พบจำนวนต้นกกกลมมีการแตกต้นใหม่เป็นจำนวนมากว่าต้นรูปไข่ โดยที่อัตราการไหล 100, 300 และ 500 มิลลิลิตร/นาท พบจำนวนต้นกกกลม 140, 132 และ 127 ต้น ตามลำดับ และจำนวนต้นรูปไข่ 17, 19 และ 27 ต้น ตามลำดับ ดังตารางที่ 16 ทำให้หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมมีอัตราการดูดซับสารอินทรีย์ต่างๆ มาใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้การหมดสภาพ หรืออายุการใช้งานจึงยาวนานกว่าหน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปไข่นั้นเอง

และเมื่ออัตราการเจริญเติบโต (growth rate) ของพืชเท่ากับศูนย์ในหน่วยทดลอง คือ พืชเจริญเติบโตสูงสุดแล้ว ทำการนับจำนวนต้นที่แตกขึ้นมาใหม่ แล้วนำไปวิเคราะห์หามวลชีวภาพ (biomass) ได้ผลดังตารางที่ 16



ตารางที่ 16 จำนวนต้นพืชและมวลชีวภาพของพืชในหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมและรูปถ่าย  
ที่อัตราการไหลต่างกัน

| หน่วยทดลอง                  | อัตราการไหล<br>(มิลลิลิตร/นาท) | จำนวนต้นพืชทั้งหมด<br>(ต้น) | มวลชีวภาพ<br>(กรัม) |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม   | 100                            | 140                         | 644.28              |
|                             | 300                            | 132                         | 546.76              |
|                             | 500                            | 127                         | 518.87              |
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปถ่าย | 100                            | 17                          | 386.55              |
|                             | 300                            | 19                          | 523.96              |
|                             | 500                            | 27                          | 664.20              |

จากตารางที่ 16 พบว่ามวลชีวภาพของหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาท มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 644.28 กรัม สำหรับหน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปถ่าย ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาท มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 664.20 กรัม ทั้งนี้พบว่ามวลชีวภาพของพืชที่เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์ ดังตารางที่ 13 จะเห็นได้ว่า หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาท พบจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ในดินรอบรากมากที่สุดคือ  $1.8 \times 10^5$  โคโลนี/ดิน 1 กรัม และหน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปถ่าย ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาท มีปริมาณจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ในดินรอบรากมากที่สุดคือ  $1.3 \times 10^6$  โคโลนี/ดิน 1 กรัม ซึ่งสัมพันธ์กับมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้นของหน่วยทดลองที่ปลูกพืชแต่ละชนิด โดยหน่วยทดลองที่พบปริมาณจุลินทรีย์มากที่สุดจะมีมวลชีวภาพมากที่สุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มีลักษณะน้ำท่วมขัง จะมีความสามารถในการลำเลียงแก๊สออกซิเจนจากใบมาปลดปล่อยบริเวณราก (Rhizosphere) เพื่อใช้ในกระบวนการหายใจของราก และออกซิเจนที่มากเกินไป จะถูกปลดปล่อยออกจากราก ทำให้บริเวณรอบรากมีแก๊สออกซิเจน ส่งผลให้จุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ซึ่งเป็น Facultative anaerobes มีแหล่งออกซิเจนเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการย่อยสลายมากขึ้น (ธนศรี, 2548) และจุลินทรีย์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายพอร์มัลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์ เปลี่ยนไปเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นธาตุอาหารของพืช จากนั้นพืชที่อยู่ในหน่วยทดลองจะใช้สารอนินทรีย์นี้เป็นธาตุอาหารเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้นหากพบปริมาณจุลินทรีย์มาก จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวกับกระบวนการย่อยสลายซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นจำนวน

มากเช่นกัน ทำให้พืชได้รับธาตุอาหารจำนวนมากในการเจริญเติบโต และส่งผลให้ปริมาณฟอรัลดีไฮด์ในหน่วยทดลองลดลงนั่นเอง

สำหรับจุลินทรีย์ที่มีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายฟอรัลดีไฮด์ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* sp. ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ดีภายในสภาวะที่มีออกซิเจน (Glancer et al., 2001) โดยปริมาณจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ที่พบในหน่วยทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ที่พบในดินบริเวณรอบรากพืชของหน่วยทดลอง

| หน่วยทดลอง                                                             | อัตราการไหล<br>(มิลลิลิตร/นาท) | <i>Pseudomonas</i> spp.<br>(โคโลนี/ดิน 1 กรัม) |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลม                                              | 100                            | $1.8 \times 10^5$                              |
|                                                                        | 300                            | $1.7 \times 10^5$                              |
|                                                                        | 500                            | $1.6 \times 10^5$                              |
| หน่วยทดลองที่ปลูกต้นรูปถ่าย                                            | 100                            | $1.2 \times 10^4$                              |
|                                                                        | 300                            | $1.6 \times 10^5$                              |
|                                                                        | 500                            | $1.3 \times 10^6$                              |
| หน่วยทดลองชุดควบคุม<br>(ไม่ปลูกพืช)                                    | 100                            | $1.6 \times 10^3$                              |
|                                                                        | 300                            | $1.2 \times 10^3$                              |
|                                                                        | 500                            | $1.9 \times 10^4$                              |
| หน่วยทดลองชุดควบคุม<br>(ไม่ปลูกพืชและเติมน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์) |                                | $1.2 \times 10^2$                              |

จากตารางที่ 17 พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ในดินรอบรากพืชของหน่วยทดลองที่ปลูกพืชและหน่วยทดลองชุดควบคุม (ไม่ปลูกพืช) ที่เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอรัลดีไฮด์พบปริมาณเชื้อมากกว่าในดินของหน่วยทดลองชุดควบคุม (ไม่ปลูกพืชและเติมน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์) และในหน่วยทดลองที่ปลูกพืช พบปริมาณจุลินทรีย์มากกว่าหน่วยทดลองชุดควบคุม (ไม่ปลูกพืช) โดยหน่วยทดลองที่ปลูกต้นกกกลมที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาท พบจุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* spp. ในดินรอบรากมากที่สุด ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการทำงานร่วมกันของระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่ใช้ถ่านกกกลมผสมดินปลูกร่วมกับพืชที่สามารถเจริญเติบโต

ได้ในดินที่มีน้ำท่วมขังสามารถบำบัดฟอสฟอรัสได้ในน้ำเสียได้โดยอาศัยการทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินนั่นเอง



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การนำตัวดูดซับถ่านชีวภาพ 3 ชนิด คือ ถ่านกกกลม ถ่านรูปถุญี และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ผสมกับดินเป็นวัสดุปลูกในระบบบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติช่วยธรรมชาติ ด้วยระบบหญ้ากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อน โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ 20 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่า ถ่านกกกลม และถ่านรูปถุญี มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ คือ 17 และ 15 ตารางเมตร/กรัม ตามลำดับ แต่มีปริมาตรรูพรุนที่มากกว่า คือ 2.41 และ 2.16 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม ตามลำดับ และขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า คือ 56.34 และ 55.70 อังสตรอม ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 613 ตารางเมตร/กรัม ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และขนาดรูพรุนเท่ากับ 22.19 อังสตรอม ทั้งนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้

ชั้นที่ 1 การทดลองแบบเบตซ์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการกำจัด ฟอร์มาลดีไฮด์ ด้วยถ่านชีวภาพ พบว่า ในสภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอชเท่ากับ 5 ระยะเวลาปั่นกววน ระยะเวลาสัมผัส เท่ากับ 30 นาที ความเร็วรอบในการปั่นกววน เท่ากับ 100 รอบ/นาที ยกเว้นความเร็วรอบในการปั่นกววนของถ่านรูปถุญี เท่ากับ 50 รอบ/นาที ซึ่งถ่านกกกลม ถ่านรูปถุญี และถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ ปริมาณ 5, 5 และ 4 กรัม ตามลำดับ สามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุด เท่ากับ 1.35, 0.73 และ 0.43 มิลลิกรัม ตามลำดับ โดยการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกกกลม และถ่านรูปถุญี สอดคล้องทั้งไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช ในขณะที่การดูดซับของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของฟรุนดลิช เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้พบว่าถ่านกกกลมเป็นถ่านที่สามารถดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุด

ชั้นที่ 2 การทดลองแบบการไหลต่อเนื่อง เพื่อหาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านแต่ละชนิดกับดินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ และเคอร์ฟเบรคทูล์จ พบว่า วิธีบำบัดเลียนแบบหญ้ากรองน้ำเสียที่อัตราส่วน 1:50 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านทั้ง 3 ชนิด ซึ่งสามารถกำจัดฟอร์มาลดีไฮด์ได้สูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 95.04, 93.31 และ 94.17 ตามลำดับ โดยพบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่เหลือ เท่ากับ 0.99, 1.34 และ 1.17 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และวิธีบำบัดเลียนแบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พบว่า ที่อัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที ของถ่านแต่ละชนิด พบจุดเริ่มหมดสภาพ เท่ากับ 300, 200



และ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ และจุดหมดสภาพ เท่ากับ 2,950, 1,200 และ 1,100 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้ถ่านกกกลมเป็นตัวดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ได้ดีกว่าถ่านชนิดอื่นอีกสองชนิด

และขั้นที่ 3 เมื่อทำการจำลองระบบหญากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมในหน่วยทดลองขนาดเล็ก ตามหลักการของโครงการแหลมผักเบี้ยฯ โดยเปรียบเทียบหน่วยทดลองในการบำบัดที่ปลูกพืช คือ ต้นกกกลม และต้นรูปยาณี และวัสดุปลูกโดยใช้ถ่านกกกลมผสมดิน และดินอย่างเดียว สำหรับบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีฟอรั่มลดีไฮด์ พบว่า หน่วยทดลองทั้ง 2 ระบบ ซึ่งใช้ถ่านกกกลมผสมดิน 1:50 และปลูกต้นกกกลม มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอรั่มลดีไฮด์ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99.53 ในสัปดาห์ที่ 1 ของระบบหญากรองน้ำเสีย และระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ สามารถกำจัดฟอรั่มลดีไฮด์ได้โดยเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 95.06 ตลอดอายุของพืช นอกจากนี้ในระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม พบจุดเริ่มหมดสภาพ เท่ากับ 20 ลิตร และพบจุลินทรีย์ *Pseudomonas* spp. จำนวนมากในดินรอบรากพืช และไม่พบการระเหยของฟอรั่มลดีไฮด์ ดังนั้นจากการพัฒนาระบบหญากรองน้ำเสียและระบบพื้นที่ชุ่มน้ำเทียมนี้มีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้บำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียได้

ทั้งนี้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำให้ทราบว่า ระบบหญากรองน้ำเสียโดยใช้อัตราส่วนของถ่านกกกลมผสมดิน 1:50 ปลูกต้นกกกลม สามารถบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีที่สุด และน้ำที่ผ่านการบำบัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

1. หากจะมีการนำระบบบำบัดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนฟอรั่มลดีไฮด์ รวมทั้งอุตสาหกรรมอื่นที่มีรูปแบบคล้ายกันจำเป็นที่จะต้องทราบประเภทของน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน รวมถึงลักษณะภูมิประเทศบริเวณนั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบประยุกต์ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียให้ได้ผลอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด ควรมีการนำระบบบำบัดแบบหญากรองน้ำเสีย และพื้นที่ชุ่มน้ำเทียม ที่ได้จากการพัฒนานี้ไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมที่มีฟอรั่มลดีไฮด์ปนเปื้อน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

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

เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์. 2539. **การบำบัดน้ำเสีย**. มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 9. สำนักพิมพ์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. 2550.  
**รายงานสรุปผลวิจัยโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจาก  
พระราชดำริ. ตำบลแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี.**  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

ฉัตรไชย รัตนไชย. 2539. **การจัดการคุณภาพน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

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

ทัศนีย์ อัดตะนันท์. 2543. **ดินที่ใช้ปลูกข้าว**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ธนิศร์ ปัทมพิฑูร. 2548. **การศึกษาแบบที่เรียรอบรากพุทธรักษา ธรรมรักษา และชิงแดงที่มีผลต่อ  
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนเทศบาลเมืองเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.**

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2550. หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

บรรจง วรรณพงษ์ และอเนก ก้านสังวร. 2553. ระบบบำบัดน้ำเสีย. เอกสารประกอบการบรรยายในการประชุมเชิงปฏิบัติการโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. โรงแรมชะอำ จังหวัดเพชรบุรี 2-4 เมษายน 2553.

ปกรณั ประดิษฐ์ทอง. 2540. การเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารพืชและโลหะหนักในระบบบำบัดน้ำเสียจังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

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

ไพบุณย์ ประพุดิธรรม. 2528. เคมิของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2550. วัชพืชและการจัดการ. แหล่งที่มา: [www.natres.psu.ac.th](http://www.natres.psu.ac.th), 28 มีนาคม 2557.

ลักษณิ คณานิธินันท์. 2539. ประสิทธิภาพของกกกลม *Cyperus corymbosus* รูปถ่าย *Tphy angustifolia* อ้อ *Phragmites australis* และแห้วกระเทียม *Elrocharis dulcis* ในพื้นที่ชุ่มน้ำที่สร้างขึ้นเพื่อการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วัชรพงษ์ วาระรัมย์. 2551. การดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทิลีนออกไซด์และเอทิลีนไกลคอล ด้วยถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิทยา มะเสนา. 2526. จุลชีววิทยาทางดิน. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. 2556. **ดอกลั่นทมรูปถ่ายสีน้ำเงิน**.

**แก้ปัญหาวิกฤตการณ์ท่อส่งน้ำมันรั่วกลางทะเล.** แหล่งที่มา:

<http://teen.mthai.com/education/61556.html>, 5 กรกฎาคม 2557.

ศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. 2529. **จุลชีววิทยาของดินเพื่อผลิตผลทางการเกษตร.** พิมพ์ครั้งที่ 2.

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2537. **พฤกษศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์วิบูลย์.

ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมศักดิ์ วั่งโน. 2548. **จุลินทรีย์และกิจกรรมในดิน.** พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทโรงพิมพ์ไทยวัฒนา

พานิช จำกัด, กรุงเทพฯ.

สโรชา หนูยัง. 2552. **การดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทิลีนออกไซด์**

**และเอทิลีนไกลคอล ด้วยถ่านรูปถ่ายสี.** ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยาลัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุจินต์ พนาปวุฒิกุล. 2539. **การบำบัดน้ำเสียชุมชนและอุตสาหกรรม โดยใช้ดินอัดหรือดินกก**

(Reed-Bed) ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน. **เดอะกรีนเพื่อสิ่งแวดล้อม** 3(26): 76-84.

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

สุชาดา ศรีเพ็ญ, สายันห์ ทัดศรี, จันทนา สุขปรีดิ์, สุรพงษ์ สวัสดิ์พานิช, สุนัน พาสุน และ

สมบัติ ชินะวงศ์. 2537. **การคัดเลือกสายพันธุ์พืชที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย**

**โดยวิธี Grass filtration.** เอกสารประกอบการบรรยายหมายเลข 7, น. 1-7. ในการประชุม

เชิงปฏิบัติการโครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจาก

พระราชดำริ ณ โรงแรมริเจนท์ ซะอ่า อำเภอสระอ่า จังหวัดเพชรบุรี วันที่ 2-3 พฤษภาคม

2537. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุพะไชย จินดาวุฒิกุล. 2555. **การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับ**

**วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ.** 60(189): 22-24.



สุรัชย์ มัจฉาชีพ. 2548. **วัชพืชในประเทศไทย**. สำนักพิมพ์แพรวพิตยา, กรุงเทพฯ.

สิทธิชัย ดันธนะศฤงคาร. 2538. การใช้ดินตะกอนภาคพื้นสมุทรในสภาพน้ำขังสลับแห้งร่วมกับพืชเป็นต้นแบบในการบำบัดน้ำเสียชุมชน วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม. 2535. **พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ 2535 และกฎหมายที่เกี่ยวข้อง**. สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

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

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

Andrew, K.L., C.F. John, J.B. Mark and J.D. Martin 1996. Comparison of aerobic heterotrophic taxa isolated from four root domains of mature sugar beet (*Beta vulgaris*). **FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY**. 21: 231-242.

Attia A.A., B.S.Girgis and N.A.Fathy. 2008. **Removal of methylene blue by carbons derived from peach stones by H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activation: batch and column studies**. *DyesPigments* 76, 282–289.

Attwood, M.M. and J.R.Quayle, 1994. **Formaldehyde as a central intermediary metabolite of methylotrophic metabolism. In: Microbial Growth on C1 Compounds**. American Society for Microbiology, Washington, D.C. (1994) pp. 315–323.

Bansal R.C., J.B. Donnet and F. Stoeckli. 1988. **Active Carbon**. Marcel Dekker, New York, (Chapter 1).

Blaine M. F. 1993. **Soil Microbial Ecology Applications in Agricultural and Environmental Management**. Marcel Dekker. Inc., New York.

Boonamnuyvitayaa V., S.Sae-ungb and W. Tanthapanichakoone. 2005. **Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde.**

Separation and Purification Technology 42 (2005) 159–168.

Boyd, C.E. 2010. **Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Waters.** Econ. Bot. 2444: 94-103.

Brais N. 1998. United States Patent, 5,833,740

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

Calvert, J.G. 1990. **The homogeneous chemistry of formaldehyde: generation and destruction within the atmosphere.** Washington, DC, Federal Aviation Agency, pp. 153-190 (FAA-EE-80-20).

Chee, G.J., Y. Nomura and I. Karube. 1999. **Biosensor for the estimation of low biochemical oxygen demand.** Anal. Chim. Acta 379 (1999): 185-191.

Cowardin, 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.

Dilfuza, E. and H. Gisela. 2003. Influence of growth-promoting bacteria on the growth of wheat in different soils and temperatures. **Soil Biology & Biochemistry.** 35: 973-978.

Fagnani, E., C.B. Melios, L. Pezza and H.R. Pezza. 2002. **Development of spectrophotometric method for the analysis of paraformaldehyde in commercial and industrial disinfectants.** Ecl. Quím. (São Paulo), v.27.

- Graham L. 1997. **Scanning Electron Microanalysis**. John Wiley & Sons Inc., New York., 1-103.
- Garrido J. M. et al. 2000. **Treatment of wastewaters from a formaldehyde-urea adhesives factory**. Department of Chemical Engineering, University of Santiago de Compostela, Spain.
- Gellissen, G. 2005. **New yeast expression platforms based on methylotrophic *Hansenula polymorpha* and *Pichia pastoris* and dimorphic *Arxula adenivorans* and *Yarrowia lipolytica*– a comparison**. FEMS Yeast Res. 5, 1079-1096.
- George R. Zoutberg and Rob Frankin. 1996. **Anaerobic treatment of chemical and brewery wastewater with a new type of anaerobic reactor; the biobed EGSB reactor**. Water Science and Technology Vol 34 No 5- 6 pp 375-381, IWA Publishing, the Netherlands.
- Gerard, J. Tortora, R. Funke Berdell and L. Case Christine. 2004. **Microbiology an Introduction**. 8th ed. Benjamin Cummings Publ. Pearson Education. Inc., San Francisco.
- Glancer, M. 2001. **Aerobic Degradation of Formaldehyde in Wastewater from the Production of Melamine Resins**. Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Pierottijeva 6, P.O.B. 625, HR-10 000 Zagreb, Croatia.
- Guo Y and D. A. Rockstraw. 2006. **Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylem, cellulose, and Kraft lignin by  $H_3PO_4$  activation**. *Carbon*, 44(8): 1464–1475.
- 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*. Liwis 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.
- Henriet J. Matijn A. and Povlsen H. H. 1985. **Analysis of Technical and Formulated Pesticides.** CIPAC HANDBOOK volume 1 c.
- Hidalgo A., A. Lopategi, M. Prieto, J.L. Serra and M.J. Llama. 2002. **Formaldehyde removal in synthetic and industrial wastewater by Rhodococcus erythropolis UPV-1.** Appl Microbiol Biotechnol (2002) 58:260–263.
- Hu C., G. Wang, C. Wu and C. Wei. 2003. **Oxidation treatment of formaldehyde-containing wastewater by electro-Fenton method.** Environmental Science Institute, South China University of Technology, Guangzhou, China.
- Hu Z. H. and H. Q. Yu, 2006. **Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures.** Waste Management, 26(11): 1222–1228.
- Janis, C.K., F.Y. Diane, M.M. John, L.Q. Robert, J.G. Fred, A.C. Cynthia and D. Richard. 2003. Effect of light reduction on growth of the submerged macrophyte *Vallisneria americana* and the community of root-associated heterotrophic bacteria. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology.** 291: 199-218.
- Jing, H. and K. Xue, 2003. **Multimedia fate modeling with spatial resolution for phenanthrene in Tianjin.** Laboratory for Earth Surface Processes, Dept. of Urban and Environ. Sci., Peking University, Beijing 100871, China.
- Kadlac, J.A. 1962. Effect of a drawdown on a waterflow impoundment. **Ecol.** 43: 267-281.
- Kadlec, H.R. and R.L. Knight.. 1996. **Treatment Wetlands.** CRC Press, Inc., Florida.



- Kim C, H. Shin and H. K. Choi. 2003. **A phenetic analysis of Typha in Korea and far east Russia.** Aquatic Botany, 75(1): 33–43.
- Kumagai A., A. Shevchenko, A. Shevchenko and W. Dunphy1. 2008. **Direct regulation of Treslin by cyclin-dependent kinase is essential for the onset of DNA replication.** The journal of general physiology. ISSN: 0021-9525.
- Lotfy H.R., and I.G. Rashed. 2002. **method for treating wastewater containing formaldehyde.** El-Khiaria, El-Mansoura, Egypt, Water Research 36 (2002) 633–637.
- Lowe, D.C., U. Schmidt, and D.H. Ehhalt, 1991. **The tropospheric distribution of formaldehyde.** Jülich, Kernforschungsanlage GmbH, 100 pp (Chemie Institut 3: No. 1756).
- Lynch J.M. 1990. **The Rhizosphere.** A Wiley Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., Chichester.
- Maier, R.M., L.P. Lan and P.G. Charles. 2000. **Environmental Microbiology.** Academic Press Publ, San Diego.
- Mirdamadi1,S., A. Rajabi, P.Khalilzadeh, D.Noroziian, A.Akbarzadeh and F.Aziz Mohseni, 2005. **Isolation of bacteria able to metabolize high concentrations of formaldehyde.** Iranian Research Organization for Science & Technology (IROST), Iran
- Moortgat, G.K., F.Slemr, W.Seiler and P.Warneck, 1998. **Photolysis of formaldehyde: relative quantum yields of H<sub>2</sub>O and CO in the wavelength range 270-360 nm.** Chem. phys. Lett., 54: 444-447.
- NIOSH Manual of Analytical Methods, second ed., vol. 1, US Department Health, Education, and Welfare, Publ.(NIOSH) 77-157-A, 1977.

NIOSH Manual of Analytical Methods, fourth ed., USDepartment Health, Education, and Welfare, method3500(2), 1994.

Reddy, K.R. and W.M. Patrick, Jr. 1993. Wetland soil opportunities and Challenges. **Soil SciSoc.Am.J.** 57: 1145-1147.

Rong H., Z. Ryu,, J. Zheng and Y. Zhang. 2002. **Carbon** 40 (2291).

Shi Q., J.Zhang, C.Zhang, C.Li and B. Zhang. 2010. **Preparation of activated carbon from cattail and its application for dyes removal.** Journal of Environmental Sciences 2010, 22(1) 91–97.

Singer, M.J. and D.N. Munns. 1999. **Soil an Tntroduction.** 4th ed. Prentice Hall Publ. Upper Saddle River. Inc., New Jersey.

Stern, A.C. 1996. **Air pollution.** 3rd ed., New York, San Francisco, London, Academic Press, Vol III, 799 pp.

Srisuda Sae-ung and Virote Boonamnuayvitaya. 2003. **Adsorption of formaldehyde vapor by using activated carbon prepared from coffee residue.** King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand.

Sylvia D.M., J.F. Jeffry and A.Z. David. 1998. **Principles and Applications of Soil Microbiology.** 8th ed. Prentice Hall Publ. Upper Saddle River. Inc., New Jersey.

Tsutomu, H. 1993. **Microbial Life in The Soil : an Introduction.** M. Dekker Publ, New York.

Uddin, M.T., M.S. Islam and M.Z. Abedin. 2007. **Adsorption of phenol from aqueous solution by water hyacinth ash.** Department of Chemical Engineering and Polymer Science, Bangladesh.

- Ugurlu M, A. Guurses, M. Acıkyıldız, 2008. **Comparison of textile dyeing effluent adsorption on commercial activated carbon and activated carbon prepared from olive stone by  $ZnCl_2$  activation.** Microporous and Mesoporous Materials, 111(1-3): 228–235.
- Walker, T.S., B.H. Pal, E. Grotewold, and J.M. Vivanco. 2003. Root Exudation and Rhizosphere Biology. **Plant Physiology.** 132: 44 - 51.
- William, M. and W.M. Patrick. Jr. 1994. Form waste land to wetland. **J. Environment. Qual.** 23: 292-296.
- Wilcox, D.A. 1996. The effect of deicing salts on vegetation in Pinhook Bog, Indiana. **Canadian Journal of Botany** 64 (1): 865-874.
- Wofsy, S.C., J.C. McConnell and M.B. McElroy, 1992. **Atmospheric  $CH_4$ , CO and  $CO_2$ .** J. geophys. Res., 77: 4477-4493.
- WHO. 2002. **Occupational Safety and Health Administration [OSHA].** American Journal of Public Health 1421-1429. American Public Health Association.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณถ่านกกกลมต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์<br>ที่ถูกดูดซับ<br>(มิลลิกรัม) |
|-----------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------------|
|                       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                                    |
| 1                     | 13.47                                | 12.98      | 12.46      | 12.97     | 0.51 | 0.70                                               |
| 2                     | 10.67                                | 10.15      | 10.36      | 10.39     | 0.26 | 0.96                                               |
| 3                     | 9.11                                 | 8.68       | 8.62       | 8.80      | 0.27 | 1.12                                               |
| 4                     | 7.61                                 | 7.53       | 7.07       | 7.40      | 0.29 | 1.26                                               |
| 5                     | 6.66                                 | 6.43       | 6.32       | 6.47      | 0.17 | 1.35                                               |
| 6                     | 6.32                                 | 6.32       | 6.26       | 6.30      | 0.03 | 1.37                                               |

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาณถ่านรูปยาสูบต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์<br>ที่ถูกดูดซับ<br>(มิลลิกรัม) |
|-----------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------------|
|                       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                                    |
| 1                     | 15.50                                | 15.46      | 15.80      | 15.58     | 0.18 | 0.44                                               |
| 2                     | 15.01                                | 14.83      | 15.17      | 15.00     | 0.17 | 0.50                                               |
| 3                     | 14.05                                | 13.93      | 14.27      | 14.08     | 0.17 | 0.59                                               |
| 4                     | 13.25                                | 13.12      | 13.46      | 13.27     | 0.17 | 0.67                                               |
| 5                     | 12.70                                | 12.58      | 12.92      | 12.73     | 0.17 | 0.73                                               |
| 6                     | 12.59                                | 12.49      | 12.83      | 12.63     | 0.17 | 0.74                                               |

ตารางผนวกที่ 3 ปริมาณถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์ต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ปริมาณฟอรั่มัลดีไฮด์<br>ที่ถูกดูดซับ<br>(มิลลิกรัม) |
|-----------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|-----------------------------------------------------|
|                       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                                     |
| 1                     | 14.66                                | 13.88      | 15.67      | 14.74     | 0.90 | 0.26                                                |
| 2                     | 12.75                                | 12.17      | 13.59      | 12.84     | 0.71 | 0.36                                                |
| 3                     | 11.94                                | 11.31      | 12.52      | 11.92     | 0.61 | 0.40                                                |
| 4                     | 11.51                                | 10.56      | 11.97      | 11.35     | 0.72 | 0.43                                                |
| 5                     | 11.31                                | 10.41      | 11.77      | 11.16     | 0.69 | 0.44                                                |
| 6                     | 11.28                                | 10.36      | 11.71      | 11.12     | 0.69 | 0.44                                                |

ตารางผนวกที่ 4 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม

| พีเอช | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|-------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 3     | 7.42                                 | 7.25       | 7.49       | 7.39      | 0.12 | 0.25                                         |
| 5     | 6.63                                 | 6.43       | 6.73       | 6.60      | 0.14 | 0.27                                         |
| 7     | 7.30                                 | 7.72       | 8.09       | 7.70      | 0.30 | 0.25                                         |
| 9     | 8.50                                 | 8.92       | 9.17       | 8.86      | 0.30 | 0.22                                         |

ตารางผนวกที่ 5 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านรูปถ่าน

| พีเอช | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) |
|-------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------------------------|
|       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                       |
| 3     | 13.11                                | 13.33      | 13.42      | 13.29     | 0.16 | 0.13                                  |
| 5     | 12.78                                | 12.98      | 12.84      | 12.87     | 0.10 | 0.14                                  |
| 7     | 13.29                                | 13.62      | 13.45      | 13.45     | 0.17 | 0.13                                  |
| 9     | 13.86                                | 14.21      | 14.15      | 14.07     | 0.19 | 0.12                                  |

ตารางผนวกที่ 6 พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

| พีเอช | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) |
|-------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------------------------|
|       | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                       |
| 3     | 13.72                                | 13.49      | 13.79      | 13.67     | 0.16 | 0.08                                  |
| 5     | 11.63                                | 11.46      | 11.53      | 11.54     | 0.09 | 0.11                                  |
| 7     | 13.52                                | 13.28      | 13.10      | 13.30     | 0.21 | 0.08                                  |
| 9     | 13.43                                | 13.09      | 12.88      | 13.13     | 0.28 | 0.09                                  |

ตารางผนวกที่ 7 ความเร็วรอบในการปั่นกวต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม

| ความเร็วรอบในการปั่นกว (รอบ/นาที) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------------------------|
|                                   | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                       |
| 50                                | 9.32                                 | 9.16       | 9.36       | 9.28      | 0.11 | 0.21                                  |
| 100                               | 7.01                                 | 6.43       | 7.18       | 6.87      | 0.41 | 0.26                                  |
| 150                               | 8.11                                 | 7.96       | 8.20       | 8.09      | 0.11 | 0.24                                  |
| 200                               | 11.21                                | 11.06      | 11.19      | 11.15     | 0.11 | 0.18                                  |

**ตารางผนวกที่ 8** ความเร็วรอบในการปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านรูปถั่ว

| ความเร็วรอบ<br>ในการปั่นกว่น<br>(รอบ/นาที) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 50                                         | 12.91                                | 12.69      | 12.56      | 12.72     | 0.18 | 0.15                                         |
| 100                                        | 13.58                                | 13.34      | 13.31      | 13.41     | 0.15 | 0.13                                         |
| 150                                        | 13.56                                | 13.37      | 13.50      | 13.48     | 0.10 | 0.13                                         |
| 200                                        | 13.67                                | 13.35      | 13.60      | 13.54     | 0.17 | 0.13                                         |

**ตารางผนวกที่ 9** ความเร็วรอบในการปั่นกว่นต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าว  
เชิงพาณิชย์

| ความเร็วรอบ<br>ในการปั่นกว่น<br>(รอบ/นาที) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 50                                         | 14.75                                | 14.56      | 14.42      | 14.58     | 0.16 | 0.07                                         |
| 100                                        | 11.76                                | 11.42      | 11.78      | 11.65     | 0.20 | 0.10                                         |
| 150                                        | 11.98                                | 11.76      | 11.68      | 11.81     | 0.16 | 0.10                                         |
| 200                                        | 11.93                                | 11.81      | 11.91      | 11.88     | 0.06 | 0.10                                         |



ตารางผนวกที่ 10 ระยะเวลาปั่นกวนต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของถ่านกกกลม

| ระยะเวลาปั่น<br>กวน (นาที) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                         | 10.72                                | 10.55      | 10.55      | 10.61     | 0.12 | 0.19                                         |
| 30                         | 6.57                                 | 6.34       | 6.37       | 6.43      | 0.16 | 0.27                                         |
| 60                         | 6.86                                 | 6.69       | 6.57       | 6.71      | 0.12 | 0.27                                         |
| 90                         | 8.73                                 | 8.59       | 8.69       | 8.67      | 0.10 | 0.23                                         |
| 120                        | 9.63                                 | 9.48       | 9.46       | 9.52      | 0.11 | 0.21                                         |

ตารางผนวกที่ 11 ระยะเวลาปั่นกวนต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของถ่านรูปถั่ว

| ระยะเวลาปั่น<br>กวน (นาที) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                         | 14.33                                | 14.18      | 14.08      | 14.20     | 0.13 | 0.12                                         |
| 30                         | 13.32                                | 13.14      | 13.21      | 13.22     | 0.09 | 0.14                                         |
| 60                         | 13.51                                | 13.29      | 13.32      | 13.37     | 0.12 | 0.13                                         |
| 90                         | 14.98                                | 14.87      | 14.84      | 14.90     | 0.07 | 0.10                                         |
| 120                        | 15.17                                | 14.92      | 15.03      | 15.04     | 0.13 | 0.10                                         |

ตารางผนวกที่ 12 ระยะเวลาปั่นกวนต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

| ระยะเวลาปั่น<br>กวน (นาทีก) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                             | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                          | 15.13                                | 14.98      | 15.10      | 15.07     | 0.08 | 0.06                                         |
| 30                          | 11.76                                | 11.42      | 11.47      | 11.55     | 0.18 | 0.11                                         |
| 60                          | 11.98                                | 11.76      | 12.04      | 11.93     | 0.15 | 0.10                                         |
| 90                          | 11.93                                | 11.81      | 12.67      | 12.14     | 0.46 | 0.10                                         |
| 120                         | 12.12                                | 12.12      | 12.89      | 12.38     | 0.44 | 0.10                                         |

ตารางผนวกที่ 13 ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม

| ระยะเวลา<br>สัมผัส (นาทีก) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                         | 11.78                                | 11.56      | 11.60      | 11.65     | 0.16 | 0.17                                         |
| 30                         | 6.97                                 | 6.75       | 6.80       | 6.84      | 0.16 | 0.26                                         |
| 60                         | 7.44                                 | 7.19       | 7.42       | 7.35      | 0.18 | 0.25                                         |
| 90                         | 9.13                                 | 8.96       | 9.08       | 9.06      | 0.12 | 0.22                                         |

ตารางผนวกที่ 14 ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านรูปถั่ว

| ระยะเวลา<br>สัมผัส (นาทีก) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                         | 14.14                                | 14.18      | 14.28      | 14.20     | 0.07 | 0.12                                         |
| 30                         | 13.36                                | 13.14      | 12.91      | 13.14     | 0.23 | 0.14                                         |
| 60                         | 13.27                                | 13.29      | 12.91      | 13.16     | 0.22 | 0.14                                         |
| 90                         | 13.27                                | 13.27      | 12.95      | 13.16     | 0.18 | 0.14                                         |

**ตารางผนวกที่ 15** ระยะเวลาสัมผัสต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

| ระยะเวลา<br>สัมผัส (นาทีก) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|----------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                         | 15.03                                | 14.98      | 14.39      | 14.80     | 0.36 | 0.07                                         |
| 30                         | 11.81                                | 11.42      | 11.35      | 11.53     | 0.25 | 0.11                                         |
| 60                         | 11.99                                | 11.76      | 11.97      | 11.91     | 0.13 | 0.10                                         |
| 90                         | 12.11                                | 11.81      | 12.16      | 12.03     | 0.19 | 0.10                                         |

**ตารางผนวกที่ 16** ความเข้มข้นฟอรั่มัลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอรั่มัลดีไฮด์ของถ่านกกกลม

| ความเข้มข้น<br>ฟอรั่มัลดีไฮด์<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                                                   | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                                                | 3.00                                 | 3.05       | 2.85       | 2.97      | 0.08 | 0.14                                         |
| 20                                                | 6.65                                 | 6.81       | 6.42       | 6.63      | 0.16 | 0.27                                         |
| 30                                                | 16.15                                | 16.30      | 15.86      | 16.10     | 0.18 | 0.28                                         |
| 40                                                | 27.26                                | 27.44      | 27.01      | 27.24     | 0.18 | 0.26                                         |
| 50                                                | 36.18                                | 36.27      | 36.00      | 36.15     | 0.11 | 0.28                                         |

**ตารางผนวกที่ 17** ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านรูปถั่ว

| ความเข้มข้น<br>ฟอร์มาลดีไฮด์<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                                                  | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                                               | 6.42                                 | 6.53       | 6.22       | 6.39      | 0.13 | 0.07                                         |
| 20                                               | 12.97                                | 13.08      | 12.81      | 12.95     | 0.11 | 0.14                                         |
| 30                                               | 20.52                                | 20.80      | 20.44      | 20.59     | 0.15 | 0.19                                         |
| 40                                               | 28.43                                | 28.62      | 28.16      | 28.40     | 0.19 | 0.23                                         |
| 50                                               | 37.88                                | 37.92      | 37.75      | 37.85     | 0.07 | 0.24                                         |

**ตารางผนวกที่ 18** ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้นในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อการดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

| ความเข้มข้น<br>ฟอร์มาลดีไฮด์<br>(มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ประสิทธิภาพ<br>การดูดซับ<br>(มิลลิกรัม/กรัม) |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|----------------------------------------------|
|                                                  | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                                              |
| 10                                               | 5.40                                 | 5.57       | 5.31       | 5.43      | 0.11 | 0.06                                         |
| 20                                               | 11.80                                | 12.01      | 11.76      | 11.86     | 0.11 | 0.10                                         |
| 30                                               | 20.32                                | 20.02      | 20.01      | 20.12     | 0.14 | 0.12                                         |
| 40                                               | 28.63                                | 29.29      | 29.02      | 28.98     | 0.27 | 0.14                                         |
| 50                                               | 38.42                                | 38.43      | 38.65      | 38.50     | 0.11 | 0.14                                         |



ตารางผนวกที่ 19 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของถ่านกกกลม

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | $C_0$ | C     | V<br>(ลิตร) | q     | 1/q  | 1/C   | log q | log C |
|-----------------------|-------|-------|-------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1                     | 20    | 12.97 | 0.10        | 0.703 | 1.42 | 0.077 | -0.15 | 1.11  |
| 2                     | 20    | 10.39 | 0.10        | 0.480 | 2.08 | 0.096 | -0.32 | 1.02  |
| 3                     | 20    | 8.80  | 0.10        | 0.373 | 2.68 | 0.114 | -0.43 | 0.94  |
| 4                     | 20    | 7.40  | 0.10        | 0.315 | 3.18 | 0.135 | -0.50 | 0.87  |
| 5                     | 20    | 6.47  | 0.10        | 0.271 | 3.70 | 0.155 | -0.57 | 0.81  |
| 6                     | 20    | 6.30  | 0.10        | 0.228 | 4.38 | 0.159 | -0.64 | 0.80  |

ตารางผนวกที่ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มัลดีไซด์ของถ่านรูปถั่ว

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | $C_0$ | C     | V<br>(ลิตร) | q     | 1/q  | 1/C   | log q | log C |
|-----------------------|-------|-------|-------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1                     | 20    | 15.58 | 0.10        | 0.442 | 2.26 | 0.064 | -0.35 | 1.19  |
| 2                     | 20    | 15.00 | 0.10        | 0.250 | 4.00 | 0.067 | -0.60 | 1.18  |
| 3                     | 20    | 14.08 | 0.10        | 0.197 | 5.07 | 0.071 | -0.71 | 1.15  |
| 4                     | 20    | 13.27 | 0.10        | 0.168 | 5.95 | 0.075 | -0.77 | 1.12  |
| 5                     | 20    | 12.73 | 0.10        | 0.145 | 6.88 | 0.079 | -0.84 | 1.10  |
| 6                     | 20    | 12.63 | 0.10        | 0.123 | 8.15 | 0.079 | -0.91 | 1.10  |

ตารางผนวกที่ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอรั่มลดีไฮด์ของถ่านกะลามะพร้าวเชิงพาณิชย์

| ปริมาณ<br>ถ่าน (กรัม) | $C_0$ | C     | V<br>(ลิตร) | q     | 1/q   | 1/C   | log q | log C |
|-----------------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1                     | 20    | 14.74 | 0.05        | 0.263 | 3.80  | 0.068 | -0.58 | 1.17  |
| 2                     | 20    | 12.84 | 0.05        | 0.179 | 5.58  | 0.078 | -0.75 | 1.11  |
| 3                     | 20    | 11.92 | 0.05        | 0.135 | 7.43  | 0.084 | -0.87 | 1.08  |
| 4                     | 20    | 11.35 | 0.05        | 0.108 | 9.24  | 0.088 | -0.97 | 1.05  |
| 5                     | 20    | 11.16 | 0.05        | 0.088 | 11.32 | 0.090 | -1.05 | 1.05  |
| 6                     | 20    | 11.12 | 0.05        | 0.074 | 13.51 | 0.090 | -1.13 | 1.05  |

ตารางผนวกที่ 22 ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุถ่านแต่ละชนิดผสมดิน (1:50) และดิน  
ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตร/นาที่ กับความเข้มข้นฟอรั่มลดีไฮด์

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอรั่มลดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |                   |                      |       |
|---------------------|---------------------------------------------------|-------------------|----------------------|-------|
|                     | ถ่านกกกลมผสม                                      | ถ่านรูปถั่วฝักผสม | ถ่านกะลามะพร้าวเชิง  | ดิน   |
|                     | ดิน (1:50)                                        | ดิน (1:50)        | พาณิชย์ผสมดิน (1:50) |       |
| 50                  | 0.00                                              | 0.00              | 0.00                 | 0.00  |
| 100                 | 0.00                                              | 0.00              | 0.00                 | 0.00  |
| 150                 | 0.00                                              | 0.25              | 2.55                 | 0.00  |
| 200                 | 0.00                                              | 0.41              | 4.75                 | 0.00  |
| 250                 | 0.32                                              | 8.90              | 9.50                 | 5.32  |
| 300                 | 0.65                                              | 13.20             | 14.00                | 9.36  |
| 350                 | 7.40                                              | 13.20             | 14.36                | 13.89 |
| 400                 | 10.32                                             | 13.21             | 14.75                | 15.74 |
| 450                 | 12.46                                             | 13.86             | 15.54                | 16.64 |
| 500                 | 13.55                                             | 13.88             | 16.25                | 17.73 |
| 550                 | 15.78                                             | 15.94             | 16.40                | 17.87 |
| 600                 | 16.75                                             | 17.96             | 16.50                | 18.56 |
| 650                 | 16.77                                             | 17.96             | 17.80                | 18.87 |

ตารางผนวกที่ 22 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |                                    |                                             | ดิน   |
|---------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|-------|
|                     | ถ่านกกกลมผสม<br>ดิน (1:50)                       | ถ่านรูปถั่วฝักยาวผสม<br>ดิน (1:50) | ถ่านกะลามะพร้าวแข็ง<br>พาคิซซ์ผสมดิน (1:50) |       |
| 700                 | 16.77                                            | 17.98                              | 18.90                                       | 19.23 |
| 750                 | 16.78                                            | 18.64                              | 18.96                                       | 19.87 |
| 800                 | 16.78                                            | 18.65                              | 18.97                                       | 20.00 |
| 850                 | 16.80                                            | 18.76                              | 19.13                                       | 20.00 |
| 900                 | 16.83                                            | 18.94                              | 19.34                                       | 20.00 |
| 950                 | 16.85                                            | 19.02                              | 19.58                                       | 20.00 |
| 1,000               | 16.90                                            | 19.25                              | 19.79                                       | 20.00 |
| 1,050               | 16.95                                            | 19.46                              | 19.91                                       | 20.00 |
| 1,100               | 16.97                                            | 19.78                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,150               | 17.00                                            | 19.97                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,200               | 17.05                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,250               | 17.07                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,300               | 17.12                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,350               | 17.15                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,400               | 17.24                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,450               | 17.28                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,500               | 17.36                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,550               | 17.44                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,600               | 17.56                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,650               | 17.60                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,700               | 17.75                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,750               | 17.88                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,800               | 17.92                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,850               | 18.06                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |
| 1,900               | 18.13                                            | 20.00                              | 20.00                                       | 20.00 |

ตารางผนวกที่ 22 (ต่อ)

| ปริมาตรน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาดีไฮด์ที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |                      |                     |       |
|----------------------|--------------------------------------------------|----------------------|---------------------|-------|
|                      | ถ่านกกกลมผสม                                     | ถ่านรูปถั่วฝักยาวผสม | ถ่านกะลามะพร้าวแข็ง | ดิน   |
|                      | ดิน (1:50)                                       | ดิน (1:50)           | พาณิชยผสมดิน (1:50) |       |
| 1,950                | 18.24                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,000                | 18.44                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,050                | 18.52                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,100                | 18.65                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,150                | 18.79                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,200                | 18.86                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,250                | 18.90                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,300                | 19.11                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,350                | 19.14                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,400                | 19.20                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,450                | 19.26                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,500                | 19.31                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,550                | 19.38                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,600                | 19.44                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,650                | 19.56                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,700                | 19.68                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,750                | 19.77                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,800                | 19.83                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,850                | 19.88                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,900                | 19.91                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |
| 2,950                | 20.00                                            | 20.00                | 20.00               | 20.00 |



**ตารางผนวกที่ 23** ร้อยละการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดิน และปลูกต้นกกกลม ของการบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

| สัปดาห์ที่ | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ร้อยละการ<br>ดูดซับ |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                     |
| 1          | 0.08                                 | 0.10       | 0.10       | 0.09      | 0.01 | 99.53               |
| 2          | 0.27                                 | 0.30       | 0.31       | 0.29      | 0.02 | 98.53               |
| 3          | 0.40                                 | 0.43       | 0.43       | 0.42      | 0.02 | 97.90               |
| 4          | 0.44                                 | 0.48       | 0.48       | 0.47      | 0.02 | 97.66               |
| 5          | 0.55                                 | 0.57       | 0.56       | 0.56      | 0.01 | 97.20               |

**ตารางผนวกที่ 24** ร้อยละการบำบัดฟอรั่มลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นถ่านกกกลมผสมดิน และปลูกต้นหญ้า 5 ชนิด ของการบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

| สัปดาห์ที่ | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ร้อยละการ<br>ดูดซับ |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                     |
| 1          | 0.72                                 | 0.76       | 0.71       | 0.73      | 0.03 | 96.35               |
| 2          | 0.75                                 | 0.78       | 0.77       | 0.77      | 0.02 | 96.17               |
| 3          | 0.80                                 | 0.86       | 0.83       | 0.83      | 0.03 | 95.85               |
| 4          | 0.89                                 | 0.95       | 0.91       | 0.92      | 0.03 | 95.42               |
| 5          | 0.90                                 | 0.95       | 0.94       | 0.93      | 0.03 | 95.35               |

**ตารางผนวกที่ 25** ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินและปลูกต้นกกกสม  
ของการบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

| สัปดาห์ที่ | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ร้อยละการ<br>ดูดซับ |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                     |
| 1          | 4.38                                 | 4.41       | 4.41       | 4.40      | 0.02 | 78.00               |
| 2          | 4.50                                 | 4.54       | 4.52       | 4.52      | 0.02 | 77.40               |
| 3          | 4.76                                 | 4.82       | 4.82       | 4.80      | 0.03 | 76.00               |
| 4          | 5.57                                 | 5.61       | 5.62       | 5.60      | 0.03 | 72.00               |
| 5          | 6.78                                 | 6.82       | 6.80       | 6.80      | 0.02 | 66.00               |

**ตารางผนวกที่ 26** ร้อยละการบำบัดฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลองที่บรรจุชั้นดินและปลูกต้นรูปถ่าย  
ของการบำบัดแบบหญ้ากรองน้ำเสีย

| สัปดาห์ที่ | ความเข้มข้นที่เหลือ (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |            | ค่าเฉลี่ย | S.D. | ร้อยละการ<br>ดูดซับ |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------|------|---------------------|
|            | ครั้งที่ 1                           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 |           |      |                     |
| 1          | 6.25                                 | 6.30       | 6.25       | 6.27      | 0.03 | 68.67               |
| 2          | 7.04                                 | 7.09       | 7.07       | 7.07      | 0.03 | 64.67               |
| 3          | 7.45                                 | 7.49       | 7.46       | 7.47      | 0.02 | 62.67               |
| 4          | 8.64                                 | 8.69       | 8.67       | 8.67      | 0.03 | 56.67               |
| 5          | 9.44                                 | 9.50       | 9.46       | 9.47      | 0.03 | 52.67               |

ตารางผนวกที่ 27 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลูกพืช  
ด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |        |                           |
|---------------------|-------------------------------------------------------|------------|--------|---------------------------|
|                     | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปถ่าย | ควบคุม | ฟอร์มาลดีไฮด์<br>เริ่มต้น |
| 2                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 4                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 6                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 8                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 10                  | 0.00                                                  | 0.00       | 0.71   | 21.35                     |
| 15                  | 0.00                                                  | 0.00       | 0.75   | 21.35                     |
| 20                  | 0.01                                                  | 0.03       | 0.72   | 21.35                     |
| 126                 | 0.46                                                  | 0.68       | 1.64   | 20.36                     |
| 162                 | 1.20                                                  | 0.93       | 1.53   | 20.36                     |
| 306                 | 0.46                                                  | 1.59       | 1.89   | 20.35                     |
| 738                 | 0.84                                                  | 0.96       | 1.70   | 21.12                     |
| 882                 | 1.12                                                  | 1.01       | 1.63   | 20.60                     |
| 1,134               | 1.16                                                  | 1.70       | 2.29   | 19.40                     |
| 1,314               | 1.23                                                  | 0.91       | 1.52   | 22.20                     |
| 1,458               | 1.28                                                  | 1.06       | 1.54   | 20.65                     |
| 1,602               | 1.71                                                  | 1.59       | 2.61   | 20.95                     |
| 1,746               | 1.34                                                  | 1.61       | 2.19   | 20.65                     |
| 1,890               | 1.12                                                  | 1.76       | 2.60   | 20.90                     |
| 2,034               | 1.24                                                  | 0.84       | 2.00   | 20.95                     |
| 2,178               | 0.57                                                  | 0.63       | 2.20   | 20.50                     |
| 3,762               | 1.34                                                  | 1.02       | 2.22   | 21.15                     |
| 3,906               | 0.95                                                  | 1.37       | 2.77   | 20.10                     |
| 4,050               | 1.59                                                  | 2.04       | 3.06   | 20.25                     |
| 4,338               | 1.13                                                  | 1.66       | 2.83   | 20.95                     |

ตารางผนวกที่ 27 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |        |                           |
|---------------------|-------------------------------------------------------|------------|--------|---------------------------|
|                     | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปถ่าย | ควบคุม | ฟอร์มาลดีไฮด์<br>เริ่มต้น |
| 4,770               | 0.93                                                  | 1.59       | 2.59   | 20.85                     |
| 4,914               | 1.75                                                  | 2.76       | 3.54   | 20.15                     |
| 5,058               | 1.57                                                  | 1.87       | 3.39   | 20.95                     |
| 5,346               | 1.60                                                  | 2.57       | 2.62   | 20.05                     |
| 8,082               | 1.79                                                  | 0.89       | 2.22   | 21.05                     |
| 8,226               | 1.52                                                  | 1.87       | 2.93   | 20.80                     |
| 8,370               | 2.54                                                  | 1.44       | 2.54   | 21.85                     |
| 9,090               | 2.35                                                  | 1.81       | 3.03   | 21.55                     |
| 9,378               | 1.52                                                  | 1.11       | 2.53   | 21.25                     |
| 9,810               | 2.12                                                  | 1.86       | 3.09   | 21.35                     |
| 9,954               | 1.60                                                  | 1.25       | 1.89   | 21.35                     |
| 11,826              | 0.33                                                  | 0.57       | 2.36   | 20.90                     |
| 12,978              | 0.29                                                  | 1.38       | 1.99   | 21.00                     |
| 13,842              | 0.62                                                  | 0.70       | 2.23   | 20.10                     |
| เฉลี่ย              | 1.03                                                  | 1.13       | 1.98   | 20.85                     |
| ร้อยละการดูดซับ     | 95.06                                                 | 94.58      | 90.50  |                           |



**ตารางผนวกที่ 28** ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลูกพืช  
ด้วยอัตราการไหล 300 มิลลิลิตร/นาที่

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |        |                           |
|---------------------|-------------------------------------------------------|------------|--------|---------------------------|
|                     | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปถ่าย | ควบคุม | ฟอร์มาลดีไฮด์<br>เริ่มต้น |
| 2                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 4                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 6                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 8                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.71   | 21.35                     |
| 10                  | 0.00                                                  | 0.00       | 0.85   | 21.35                     |
| 12                  | 0.00                                                  | 0.13       | 0.89   | 21.35                     |
| 15                  | 1.16                                                  | 1.79       | 2.57   | 21.35                     |
| 22                  | 2.39                                                  | 2.66       | 3.55   | 21.35                     |
| 27                  | 2.60                                                  | 2.99       | 3.83   | 21.35                     |
| 32                  | 3.57                                                  | 3.49       | 4.22   | 21.35                     |
| 37                  | 2.79                                                  | 2.36       | 4.25   | 21.35                     |
| 42                  | 2.79                                                  | 3.10       | 4.55   | 21.35                     |
| 47                  | 3.43                                                  | 3.50       | 4.58   | 21.35                     |
| 52                  | 3.60                                                  | 3.57       | 4.70   | 21.35                     |
| 57                  | 3.94                                                  | 3.68       | 4.55   | 21.35                     |
| 378                 | 3.48                                                  | 3.29       | 4.64   | 20.36                     |
| 486                 | 4.18                                                  | 3.61       | 4.79   | 20.36                     |
| 918                 | 4.66                                                  | 2.64       | 5.24   | 20.60                     |
| 1,350               | 2.33                                                  | 3.36       | 5.36   | 19.40                     |
| 1,782               | 4.35                                                  | 3.16       | 4.98   | 22.20                     |
| 2,214               | 4.54                                                  | 4.35       | 5.09   | 20.65                     |
| 2,646               | 3.91                                                  | 5.25       | 5.44   | 20.95                     |
| 3,078               | 3.44                                                  | 2.85       | 4.64   | 20.65                     |
| 3,510               | 4.11                                                  | 4.43       | 4.52   | 20.90                     |

ตารางผนวกที่ 28 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร)    | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |              |              |                           |
|------------------------|-------------------------------------------------------|--------------|--------------|---------------------------|
|                        | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปถ่าย   | ควบคุม       | ฟอร์มาลดีไฮด์<br>เริ่มต้น |
| 3,942                  | 3.54                                                  | 3.54         | 4.50         | 20.95                     |
| 4,374                  | 4.53                                                  | 3.00         | 4.82         | 20.50                     |
| 9,126                  | 3.95                                                  | 3.39         | 4.55         | 21.15                     |
| 9,558                  | 2.75                                                  | 4.02         | 4.38         | 20.10                     |
| 9,990                  | 3.53                                                  | 4.21         | 4.71         | 20.25                     |
| 10,854                 | 2.40                                                  | 3.56         | 4.43         | 20.95                     |
| 12,150                 | 2.19                                                  | 2.46         | 4.53         | 20.85                     |
| 12,582                 | 4.27                                                  | 4.27         | 4.38         | 20.15                     |
| 13,014                 | 4.60                                                  | 4.19         | 4.93         | 20.95                     |
| 13,878                 | 3.96                                                  | 4.21         | 4.62         | 20.05                     |
| 22,086                 | 3.91                                                  | 3.21         | 4.94         | 21.05                     |
| 22,518                 | 3.51                                                  | 3.68         | 4.51         | 20.80                     |
| 22,950                 | 2.95                                                  | 3.50         | 4.53         | 21.85                     |
| 25,110                 | 2.94                                                  | 3.91         | 4.62         | 21.55                     |
| 25,974                 | 2.54                                                  | 2.37         | 5.21         | 21.25                     |
| 27,270                 | 3.62                                                  | 3.28         | 4.69         | 21.35                     |
| 27,702                 | 2.94                                                  | 3.54         | 4.55         | 21.35                     |
| 33,318                 | 2.84                                                  | 2.14         | 4.12         | 20.90                     |
| 36,774                 | 2.61                                                  | 2.24         | 4.40         | 21.00                     |
| 39,366                 | 2.45                                                  | 3.10         | 4.85         | 20.10                     |
| <b>เฉลี่ย</b>          | <b>2.89</b>                                           | <b>2.91</b>  | <b>4.00</b>  | <b>20.85</b>              |
| <b>ร้อยละการดูดซับ</b> | <b>86.14</b>                                          | <b>86.04</b> | <b>80.82</b> |                           |

ตารางผนวกที่ 29 ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหน่วยทดลองที่ปลูกพืช  
ด้วยอัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที่

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |            |        |                           |
|---------------------|-------------------------------------------------------|------------|--------|---------------------------|
|                     | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปถ่าย | ควบคุม | ฟอร์มาลดีไฮด์<br>เริ่มต้น |
| 1                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 2                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 3                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 4                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 5                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 6                   | 0.00                                                  | 0.00       | 0.00   | 21.35                     |
| 7                   | 0.73                                                  | 0.00       | 0.80   | 21.35                     |
| 8                   | 0.76                                                  | 0.43       | 0.92   | 21.35                     |
| 9                   | 0.71                                                  | 1.13       | 1.17   | 21.35                     |
| 10                  | 1.36                                                  | 1.05       | 1.66   | 21.35                     |
| 12                  | 1.49                                                  | 1.84       | 2.04   | 21.35                     |
| 14                  | 2.02                                                  | 2.50       | 3.34   | 21.35                     |
| 16                  | 2.61                                                  | 3.36       | 3.54   | 21.35                     |
| 18                  | 3.93                                                  | 4.03       | 4.63   | 21.35                     |
| 20                  | 5.18                                                  | 4.59       | 6.46   | 21.35                     |
| 25                  | 6.46                                                  | 6.26       | 7.97   | 21.35                     |
| 30                  | 7.65                                                  | 6.30       | 8.60   | 21.35                     |
| 35                  | 7.20                                                  | 6.95       | 8.80   | 21.35                     |
| 40                  | 7.75                                                  | 7.80       | 9.00   | 21.35                     |
| 45                  | 7.95                                                  | 7.78       | 9.05   | 21.35                     |
| 50                  | 8.10                                                  | 7.50       | 9.25   | 21.35                     |
| 570                 | 8.65                                                  | 8.30       | 9.70   | 21.35                     |
| 1,290               | 5.34                                                  | 6.36       | 8.37   | 20.60                     |
| 2,010               | 6.00                                                  | 5.43       | 8.09   | 19.40                     |

ตารางผนวกที่ 29 (ต่อ)

| ปริมาณน้ำ<br>(ลิตร) | ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยทดลอง (มิลลิกรัม/ลิตร) |           |        |                       |
|---------------------|-------------------------------------------------------|-----------|--------|-----------------------|
|                     | ต้นกกกลม                                              | ต้นรูปไข่ | ควบคุม | ฟอร์มาลดีไฮด์เริ่มต้น |
| 2,730               | 6.41                                                  | 7.80      | 9.25   | 22.20                 |
| 3,450               | 6.67                                                  | 6.23      | 8.20   | 20.65                 |
| 4,170               | 6.50                                                  | 6.81      | 7.93   | 20.95                 |
| 4,890               | 6.44                                                  | 7.25      | 7.75   | 20.65                 |
| 5,610               | 5.53                                                  | 5.33      | 7.40   | 20.90                 |
| 6,330               | 7.01                                                  | 5.87      | 7.46   | 20.95                 |
| 7,050               | 6.24                                                  | 6.66      | 7.67   | 20.50                 |
| 14,970              | 6.65                                                  | 4.64      | 8.25   | 21.15                 |
| 15,690              | 5.84                                                  | 5.36      | 7.90   | 20.10                 |
| 16,410              | 6.35                                                  | 6.92      | 8.40   | 20.25                 |
| 17,850              | 5.12                                                  | 4.14      | 7.52   | 20.95                 |
| 20,010              | 6.19                                                  | 6.91      | 8.00   | 20.85                 |
| 20,730              | 5.10                                                  | 5.38      | 7.92   | 20.15                 |
| 21,450              | 7.10                                                  | 7.80      | 8.39   | 20.95                 |
| 22,890              | 5.57                                                  | 6.03      | 8.60   | 20.05                 |
| 36,570              | 4.03                                                  | 4.47      | 7.50   | 21.05                 |
| 37,290              | 4.77                                                  | 5.00      | 7.35   | 20.80                 |
| 38,010              | 5.51                                                  | 4.54      | 7.08   | 21.85                 |
| 41,610              | 4.68                                                  | 5.45      | 6.48   | 21.55                 |
| 43,050              | 3.98                                                  | 4.78      | 6.54   | 21.25                 |
| 45,210              | 4.50                                                  | 4.34      | 6.95   | 21.35                 |
| 45,930              | 2.95                                                  | 3.94      | 6.96   | 21.35                 |
| 55,290              | 2.59                                                  | 5.32      | 6.35   | 20.90                 |
| 61,050              | 2.67                                                  | 4.64      | 6.32   | 21.00                 |
| 65,370              | 2.48                                                  | 3.58      | 6.25   | 20.10                 |
| เฉลี่ย              | 4.38                                                  | 4.51      | 5.96   | 20.85                 |
| ร้อยละการดูดซับ     | 78.99                                                 | 78.37     | 71.42  |                       |



## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

|                                     |                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                                | นายวัชรพงษ์ วาระรัมย์                                                                                                                                                                                               |
| เกิดวันที่                          | 10 ธันวาคม พ.ศ.2526                                                                                                                                                                                                 |
| สถานที่เกิด                         | โรงพยาบาลบุรีรัมย์                                                                                                                                                                                                  |
| ประวัติการศึกษา                     | วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)<br>มหาวิทยาลัยขอนแก่น<br>วท.ม. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน                                                                                     |
| ตำแหน่งงานปัจจุบัน                  | นักวิชาการสิ่งแวดล้อม                                                                                                                                                                                               |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน                | โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย<br>อันเนื่องมาจากพระราชดำริ<br>เลขที่ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว<br>เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900<br>โทรศัพท์: 0-2579-2116 ต่อ 115<br>โทรสาร: 0-2579-2116 ต่อ 103,115 |
| ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ | -                                                                                                                                                                                                                   |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ                | โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย<br>อันเนื่องมาจากพระราชดำริ                                                                                                                                        |