

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวกลางที่มีส่วนประกอบของเหล็ก

นางสาวอมราวดี มานะจิตต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# HYDROGEN SULFIDE REMOVAL BY IRON CONTAINING MEDIA

Miss Amarawadee Manajit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวกลางที่มีส่วนประกอบ<br>ของเหล็ก |
| โดย                             | นางสาวอมราวดี มานะจิตต์   |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์                              |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนัทธวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุภา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

อมราวดี มานะจิตต์: การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวกลางที่มีส่วนประกอบของเหล็ก.  
(HYDROGEN SULFIDE REMOVAL BY IRON CONTAINING MEDIA) อ. ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 188 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวกลางที่ใช้คือ ดินลูกรัง โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 หาปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน และปริมาณเหล็กออกไซด์ของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี – สกลนครและถนน สายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร ทำการเลือกขนาดจากแหล่งที่มีปริมาณ เหล็กออกไซด์มากที่สุด ช่วงที่ 2 เป็นการศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึก 0.2 เมตร โดยคอลัมน์ทำจากวัสดุพีวีซี มีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 0.06 เมตร สูง 0.7 เมตร นำดินลูกรังจากช่วงที่ 1 มาแบ่งเป็น 4 แบบคือแบบที่ 1 ดินลูกรังไม่ ซ้ำเชื้อ แบบที่ 2 ดินลูกรังซ้ำเชื้อ แบบที่ 3 ดินลูกรังซ้ำเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และแบบที่ 4 ดินลูกรังซ้ำเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และช่วงที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร โดยใช้ตัวกลางจากช่วงที่ 2 ซึ่งในการ ทดลองช่วงที่ 2 และ 3 กำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วนที่ อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง

ผลการทดลองช่วงที่ 1 ดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตรมี ปริมาณเหล็กออกไซด์มากที่สุดคือร้อยละ 32.54 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองช่วงที่ 2 ตัวกลางที่ เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ ดินลูกรังซ้ำเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ซึ่งมี ช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 13 วัน มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ ต่อปริมาณตัวกลางมากที่สุดคือ 7.34 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีปริมาณซัลเฟอร์ที่ถูกจับสะสมร้อยละ 7.95 โดยน้ำหนัก และผลการทดลองช่วงที่ 3 ที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตรจะมีช่วงเวลาที่มี ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 18, 25 และ 34 วัน ตามลำดับ มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางคือ 9.07, 7.57 และ 7.57 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณ ซัลเฟอร์ที่ถูกจับสะสมคือร้อยละ 8.55, 10.20 และ 10.71 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา ...2551.....

# # 4870635921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORDS: HYDROGEN SULFIDE/ IRON CONTAINING MEDIA/TREATMENT

AMARAWADEE MANAJIT: HYDROGEN SULFIDE REMOVAL BY IRON CONTAINING MEDIA. ADVISOR : ASST. PROF.PICHAYA RACHADAWONG, Ph.D., 188 pp.

This study was aimed at efficiencies of hydrogen sulfide removal by lateritic soils. The research was divided into 3 experimental periods. The first period was to study quantity of total iron, ferrous ion ( $\text{Fe}^{2+}$ ) and iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in lateritic soils from Udonthani – Sakonnakhon road and Thare – Si songkhram road at diameters of 2.36 and 1.18 millimeter, and was to select the size which had the highest quantity of iron oxide. The second period was to study different media for the removal of hydrogen sulfide at the depth of 0.2 meter. The columns were built using 0.06 meter-diameter PVC cylinders and with 0.7 meter height. The media used were 1) lateritic soils with no disinfection, 2) lateritic soils with disinfection, 3) lateritic soils disinfected and blended with 10 percent by mass of iron filing and 4) lateritic soils disinfected and blended 20 percent by mass of iron filling. The third period was to study the removal efficiency for hydrogen sulfide at different depth (0.3, 0.4 and 0.5 meters). In this case, media used in the column was chosen from the second period. In second and third period hydrogen sulfide concentration of 50 ppmv at the air flow rate of 8 liters per minute were used for all experimental.

From the first experiment, quantity of iron oxide, lateritic soils from Udonthani – Sakonnakhon road at 2.36 millimeter diameter had the most quantity of iron oxide (32.54 percent by mass). From the second experiment, the best media was the disinfected lateritic soils blended with iron filing of 20 percent by mass. Hydrogen sulfide removal capacity at 100 percent was 13 days. Maximum hydrogen sulfide removal rate per mass was 7.34 milligram per gram and total sulphur accumulation was 7.59 percent by weight. The finding of the third experiment was the removal efficiency at different depths. As the depth increased the hydrogen sulfide removal capacity at 100 percent increased too. At the media depth of 0.3, 0.4 and 0.5 meters; the times for 100 percent removal were 18, 25 and 34 days; hydrogen sulfide removal rate per mass was 9.07, 7.57 and 7.57 milligram per gram and the sulphur accumulative were 8.55, 10.20 and 10.71 percent by weight, respectively.

Department: .....Environment Engineering... Student's Signature.....

Field of Study: .....Environment Engineering.... Advisor's Signature.....

Academic Year: ...2008.....

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนทุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล และรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบำบัดน้ำเสีย ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคุณยุทธกาล ที่ได้อนุเคราะห์ตะแกรงร่อนที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณคุณครูห้องปฏิบัติการทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุกท่านที่ไม่อาจกล่าวนามได้ทั้งหมดที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือกันเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้องทุกคน และคุณชาตรี ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบผลสำเร็จ

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญตาราง.....  | ฎ    |
| สารบัญภาพ.....  | ฏ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....  | 2    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 2    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                     | 4    |
| 2.1 สมบัติทั่วไปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....                                     | 4    |
| 2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไป.....  | 4    |
| 2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....  | 4    |
| 2.1.3 ความเป็นพิษ.....  | 5    |
| 2.2 ก๊าซชีวภาพ.....   | 6    |
| 2.2.1 ผลกระทบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีต่อระบบก๊าซชีวภาพ<br>และเครื่องมือ..... | 7    |
| 2.3 ซัลเฟอร์.....   | 8    |
| 2.4 ดินลูกรัง.....  | 8    |
| 2.4.1 กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อน และกระบวนการก่อ<br>กำเนิดลูกรัง..... | 9    |
| 2.4.2 สภาพแวดล้อมของการเกิดดินลูกรัง.....                                       | 10   |
| 2.4.3 สีของดินลูกรัง.....   | 11   |
| 2.4.4 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง.....                               | 11   |
| 2.4.5 การสำรวจแหล่งดินลูกรังในประเทศไทย.....                                    | 12   |
| 2.5 เหล็ก.....  | 12   |

|  |    |
|--|----|
| 2.6 วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....             | 13 |
| 2.6.1 สารละลายเหล็กคลอไรด์.....                      | 13 |
| 2.6.2 เหล็กออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์.....                | 14 |
| 2.6.3 เศษไม้ที่เคลือบเหล็กออกไซด์.....               | 15 |
| 2.6.4 เม็ดเหล็กออกไซด์.....                          | 15 |
| 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....              | 16 |
| บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....            | 20 |
| 3.1 แผนการทดลอง.....                                 | 20 |
| 3.2 ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัย.....                   | 21 |
| 3.3 การวิเคราะห์สมบัติและการเตรียมตัวกลาง.....       | 23 |
| 3.3.1 ความเป็นกรด - ต่าง.....                        | 23 |
| 3.3.2 ความชื้น.....                                  | 24 |
| 3.3.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ.....                       | 24 |
| 3.3.4 ความหนาแน่น.....                               | 24 |
| 3.3.5 ความพรุน.....                                  | 24 |
| 3.3.6 ปริมาณเหล็กทั้งหมด.....                        | 24 |
| 3.3.7 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน.....                       | 25 |
| 3.3.8 ปริมาณเหล็กออกไซด์.....                        | 25 |
| 3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....        | 25 |
| 3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....                | 25 |
| 3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....                   | 26 |
| 3.5 ระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....                 | 26 |
| 3.6 ชุดการทดลอง.....                                 | 28 |
| 3.6.1 คอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ.....                | 28 |
| 3.6.2 หลักการทำงานของชุดการทดลอง.....                | 29 |
| 3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....                       | 31 |
| 3.7.1 การทดลองที่ 1 คัดแยกหาขนาดและปริมาณเหล็ก.....  | 31 |
| 3.7.2 การทดลองที่ 2 เลือกวัสดุตัวกลางที่เหมาะสม..... | 32 |



|   |    |
|---|----|
| 3.7.3 การทดลองที่ 3 ประเมินประสิทธิภาพการกำจัดที่ทางออก ณ ความลึก<br>ของวัสดุตัวกลางหนึ่งๆ กับเวลา..... | 35 |
| 3.8 การวิเคราะห์พารามิเตอร์.....  | 37 |
| 3.9 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ.....  | 38 |
| 3.9.1 ภาวะบรรทุก.....   | 38 |
| 3.9.2 ประสิทธิภาพการกำจัด.....  | 38 |
| 3.9.3 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง.....  | 39 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง.....   | 40 |
| 4.1 สมบัติของตัวกลาง.....   | 40 |
| 4.1.1 ความเป็นกรด - ต่าง.....   | 43 |
| 4.1.2 ความชื้น.....   | 45 |
| 4.1.3 อินทรีย์วัตถุ.....  | 45 |
| 4.1.4 ความหนาแน่น.....  | 45 |
| 4.1.5 ความพรุน.....   | 46 |
| 4.2 ผลการศึกษาการหาปริมาณเหล็กในแต่ละขนาด.....  | 46 |
| 4.3 ผลการศึกษาตัวกลางที่เหมาะสม.....  | 47 |
| 4.3.1 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลา.....   | 48 |
| 4.3.2 อิทธิพลของภาวะบรรทุกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....  | 51 |
| 4.3.3 ความเป็นกรด - ต่าง.....   | 55 |
| 4.3.4 อินทรีย์วัตถุ.....  | 56 |
| 4.3.5 ความดันลดและการทрудตัว.....   | 57 |
| 4.3.6 ความชื้น.....   | 62 |
| 4.3.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ.....                                      | 65 |
| 4.4 ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน.....   | 69 |
| 4.4.1 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลา.....   | 70 |
| 4.4.2 อิทธิพลของภาวะบรรทุกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด.....  | 72 |
| 4.4.3 ความเป็นกรด - ต่าง.....   | 76 |
| 4.4.4 ความดันลดและการทрудตัว.....   | 79 |
| 4.4.5 ความชื้น.....   | 83 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน.....                | 88  |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....   | 91  |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 91  |
| 5.1.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาหาปริมาณและชนิดของเหล็กในดินลูกรัง.....                   | 91  |
| 5.1.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัด<br>ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์..... | 91  |
| 5.1.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึก<br>ต่างๆ กัน.....     | 93  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 94  |
| รายการอ้างอิง.....   | 95  |
| ภาคผนวก.....   | 98  |
| ภาคผนวก ก. ขั้นตอนและผลการทดสอบสมบัติดินลูกรัง.....                                | 99  |
| ภาคผนวก ข. ผลการศึกษาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....           | 109 |
| ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน.....             | 138 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 188 |

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....  | 4    |
| ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตามความเข้มข้น.....   | 5    |
| ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพจากแต่ละแหล่งกำเนิด.....  | 7    |
| ตารางที่ 2.4 เลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์.....  | 8    |
| ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินลูกรังในประเทศไทย แยกตามขนาดเม็ด.....   | 21   |
| ตารางที่ 3.2 วิธีทดสอบ/เครื่องมือที่ใช้ทดสอบสมบัติของตัวกลาง.....   | 23   |
| ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 25   |
| ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองที่ 2.....   | 34   |
| ตารางที่ 3.5 จุดเก็บตัวอย่าง ความถี่และพารามิเตอร์ที่ทำการวัดในการทดลองที่ 2.....   | 35   |
| ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองที่ 3.....   | 36   |
| ตารางที่ 3.7 จุดเก็บตัวอย่าง ความถี่และพารามิเตอร์ที่ทำการวัดในการทดลองที่ 3.....   | 37   |
| ตารางที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง.....  | 38   |
| ตารางที่ 4.1 สมบัติตัวกลางของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 1.18 มิลลิเมตร.....  | 41   |
| ตารางที่ 4.2 สมบัติตัวกลางของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตร.....  | 42   |
| ตารางที่ 4.3 สมบัติตัวกลางของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงครามที่ขนาดดิน 1.18 มิลลิเมตร.....   | 42   |
| ตารางที่ 4.4 สมบัติตัวกลางของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงครามที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตร.....   | 43   |
| ตารางที่ 4.5 ความเป็นกรด – ด่างของดิน.....  | 44   |
| ตารางที่ 4.6 ปริมาณเหล็กของถนนสายอุดรธานี – สกลนครและถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม... 47   | 47   |
| ตารางที่ 4.7 ค่าความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ.....   | 61   |
| ตารางที่ 4.8 ค่าความชื้นของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ.....   | 65   |
| ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ.....  | 66   |
| ตารางที่ 4.10 ความสามารถของเหล็กออกไซด์ต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....  | 69   |
| ตารางที่ 4.11 ค่าความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20<br>โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร.....      | 82   |
| ตารางที่ 4.12 ค่าความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก<br>0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร.....                    | 87   |
| ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ<br>20 โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร..... | 88   |

## สารบัญภาพ

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.1 ลักษณะดินลูกรังแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร.....  | 22   |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะดินลูกรังแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม.....   | 22   |
| รูปที่ 3.3 ระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....  | 27   |
| รูปที่ 3.4 ชุดสร้างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์.....  | 27   |
| รูปที่ 3.5 ขนาดคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง.....  | 28   |
| รูปที่ 3.6 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง.....  | 29   |
| รูปที่ 3.7 แผนผังชุดการทดลอง.....  | 30   |
| รูปที่ 3.8 ชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ.....   | 30   |
| รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองที่ 1.....  | 32   |
| รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองที่ 2.....   | 34   |
| รูปที่ 3.11 แผนผังการทดลองที่ 3.....   | 36   |
| รูปที่ 4.1 ดินลูกรังแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร (ก) และ (ข).....  | 40   |
| รูปที่ 4.2 ดินลูกรังแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม (ค) และ (ง).....   | 41   |
| รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ.....                            | 49   |
| รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ.....                               | 49   |
| รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ<br>ผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล..... | 50   |
| รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ<br>ผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล..... | 51   |
| รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการะบรทุกของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ.....                                     | 52   |
| รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการะบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ.....  | 53   |
| รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการะบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 10 โดยมวล.....          | 53   |
| รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการะบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 20 โดยมวล.....         | 54   |
| รูปที่ 4.11 ค่าความเป็นกรด – ด่างของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ.....   | 56   |
| รูปที่ 4.12 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ.....                            | 57   |
| รูปที่ 4.13 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ.....  | 59   |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.14 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ.....  | 59 |
| รูปที่ 4.15 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10<br>โดยมวล.....   | 60 |
| รูปที่ 4.16 ความดันลดการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20<br>โดยมวล.....  | 60 |
| รูปที่ 4.17 สมการเส้นตรงสำหรับค่าการหลุดตัวของการทดลองที่ 2.....  | 62 |
| รูปที่ 4.18 ความชื้นของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ.....   | 63 |
| รูปที่ 4.19 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ.....  | 63 |
| รูปที่ 4.20 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล.....  | 64 |
| รูปที่ 4.21 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล.....  | 64 |
| รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม<br>ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร.....  | 70 |
| รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม<br>ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ..... | 71 |
| รูปที่ 4.24 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม<br>ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ..... | 72 |
| รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร .....         | 73 |
| รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร .....         | 73 |
| รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร .....         | 74 |
| รูปที่ 4.28 สมการเส้นตรงระหว่างช่วงที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 กับความลึกของ<br>การทดลองที่ 3.....                             | 75 |
| รูปที่ 4.29 สมการเส้นตรงระหว่างเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 ถึงร้อยละ 0 กับ<br>ความลึกของการทดลองที่ 3.....                 | 76 |
| รูปที่ 4.30 ความเป็นกรด – ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่<br>ความลึก 0.3 เมตร.....                           | 77 |

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.31 ความเป็นกรด – ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่<br>ความลึก 0.4 เมตร.....     | 78 |
| รูปที่ 4.32 ความเป็นกรด – ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่<br>ความลึก 0.5 เมตร.....     | 78 |
| รูปที่ 4.33 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล<br>ที่ความลึก 0.3 เมตร..... | 79 |
| รูปที่ 4.34 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล<br>ที่ความลึก 0.4 เมตร..... | 80 |
| รูปที่ 4.35 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล<br>ที่ความลึก 0.5 เมตร..... | 81 |
| รูปที่ 4.36 สมการเส้นตรงของค่าการหลุดตัวของการทดลองที่ 3.....   | 83 |
| รูปที่ 4.37 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก<br>0.3 เมตร.....                | 84 |
| รูปที่ 4.38 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก<br>0.4 เมตร.....                | 85 |
| รูปที่ 4.39 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก<br>0.5 เมตร.....                | 86 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษสูงและเป็นก๊าซที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซมลพิษอย่างหนึ่งที่เป็นปัญหาต่อชั้นบรรยากาศ โดยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจากการเน่าเปื่อยและย่อยสลายของอินทรีย์สาร ที่ความเข้มข้นต่ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีกลิ่นแรงเหมือนกับกลิ่นไข่เน่า ที่ความเข้มข้นสูงก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำให้จมูกสูญเสียการรับกลิ่น และที่ความเข้มข้นระดับสูงนี้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถจะทำให้ล้มป่วยและทำให้ถึงตายได้ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่มีกลิ่นเหม็นและมีความเป็นพิษสูงแม้จะมีอยู่เพียงเล็กน้อยในอากาศก็จะมีกลิ่นได้ทันที ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ติดไฟได้ง่าย ภายใต้สภาวะปกติ ทางหลักในการรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือการหายใจเข้าไปและสามารถรับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยผ่านทางผิวหนังและดวงตาได้

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น ซึ่งก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานที่นำมาทดแทนพลังงานจากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติเนื่องจากก๊าซชีวภาพสามารถนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า และก๊าซหุงต้ม เป็นต้น ในระบบก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพจะถูกผลิตด้วยการย่อยแบบไร้อากาศของของเสียทางชีวภาพซึ่งก๊าซชีวภาพจะมีส่วนประกอบของก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนั้นจะก่อให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่น ความเป็นพิษต่อคนและสัตว์ เกิดการกัดกร่อนต่ออาคาร ท่อ และเครื่องยนต์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนเครื่องมือมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เสียก่อนเพื่อให้ก๊าซชีวภาพมีความสะอาดมากขึ้นเหมาะที่จะนำไปทำเชื้อเพลิงและผลิตกระแสไฟฟ้าได้

ในประเทศไทยได้กำหนดความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลา 10 นาที มีค่าเท่ากับของสหรัฐอเมริกา กล่าวคือ สหรัฐอเมริกาได้กำหนดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อาจยอมให้มีได้อยู่ที่ 20 ส่วนในล้านส่วนและความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลา 10 นาทีอยู่ที่ 50 ส่วนในล้านส่วน (Occupational Safety and Health Administration, 1995) โดยออกในบัญชีท้ายประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่องความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี) ตารางหมายเลข 3

การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายวิธี เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption) การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ รวมทั้งการใช้เหล็ก ซึ่ง

ปริมาณของเหล็กที่มีอยู่มากในดินลูกรัง โดยดินลูกรังเป็นดินที่สามารถพบได้ทุกที่ของประเทศไทย ดังนั้นจึงเป็นแนวคิดให้เกิดงานวิจัยในครั้งนี้เพื่อนำทรัพยากรธรรมชาติที่พบได้ตามท้องถิ่นมาใช้ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบก๊าซชีวภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาปริมาณและชนิดของเหล็กในตัวกลางที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.2.2 ศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยกำหนดระยะความลึกของชั้นตัวกลางคงที่

1.2.3 ศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดของตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึกต่างๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัสดุตัวกลางที่ใช้ในการวิจัยคือ ดินลูกรัง เป็นดินที่ได้มาจากประเทศไทยในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยเก็บจาก 2 แหล่งแหล่งละ 1 ตัวอย่างคือแถบถนนสายอุบลราชธานี – สกลนคร และแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม

1.3.2 เลือกขนาดดินลูกรังที่ใช้คือ 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร

1.3.3 การทดลองเป็นแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ (Bench Scale) จำนวน 2 ดังปฏิกิริยา

1.3.4 ทำการทดลองโดยให้ก๊าซไหลเข้าจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของทุกดังปฏิกิริยา

1.3.5 กำหนดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาที

1.3.6 ดินลูกรังที่ใช้มี 4 แบบคือ ดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ, ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ, ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

1.3.7 ระยะความลึกของชั้นตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยคือ 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายตามธรรมชาติ

1.4.2 ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



1.4.3 เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบและการนำไปใช้ในการออกแบบใช้งาน  
ได้จริง

1.4.4 ทำให้ทราบว่าเหล็กในรูปแบบใดที่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

##### 2.1.1 ลักษณะโดยทั่วไป

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารประกอบทางเคมี โดยเป็นก๊าซที่ไม่มีสี มีความเป็นพิษสูง ลักษณะของกลิ่นจะคล้ายกลิ่นของไข่เน่าซึ่งจะพบได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่ติดไฟได้ เมื่ออากาศมากเกินไปจะถูกเผาไหม้แล้วเปลี่ยนรูปเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์และน้ำ แต่ถ้าออกซิเจนไม่เพียงพอแล้วก็จะเปลี่ยนรูปเป็นธาตุซัลเฟอร์และน้ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่มากับไอออนของโลหะให้ออกจากสารละลายเพื่อเปลี่ยนรูปเช่นซัลไฟด์ของโลหะบางประเภทที่ไม่ละลายน้ำ การปรากฏก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำสามารถใช้เป็นตัวบอกร่างอย่างคร่าวๆ ได้ว่าน้ำในแหล่งน้ำนั้นอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่น้อยมากและมีสภาพเป็นกรด

##### 2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถจะสรุปได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ATSDR, 2006; MSDS, 2005 และ USEPA, 2005)

| พารามิเตอร์                      | ค่า   |
|----------------------------------|---|
| สูตรโมเลกุล                      | H <sub>2</sub> S                              |
| น้ำหนักโมเลกุล                   | 34.1  |
| จุดเดือด                         | - 60.3 °C                                     |
| จุดหลอมเหลว                      | - 85 °C                                       |
| จุดวาบไฟ                         | - 82 °C                                       |
| ความถ่วงจำเพาะ                   | 1.539 กรัมต่อลิตร ที่ 0 °C                    |
| ความสามารถในการละลายน้ำที่ 20 °C | 4.1 กรัมต่อลิตร                               |
| ค่าคงที่ของเฮนรี่ ที่ 20 °C      | 1150 x 10 <sup>-4</sup> โมลต่อลิตรต่อบรรยากาศ |

ตารางที่ 2.1 สมบัติของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ATSDR, 2006; MSDS, 2005 และ USEPA, 2005)  
(ต่อ)

| Characteristic                   | Information        |
|----------------------------------|--------------------|
| กลิ่นที่เริ่มสัมผัสได้ในอากาศ    | 0.2 ส่วนในล้านส่วน |
| จุดต่ำสุดและจุดสูงสุดในการระเบิด | 4.3% - 46%         |
| จุดลุกติดไฟได้เอง                | 260 °C             |

### 2.1.3 ความเป็นพิษ

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถจะมีผลกระทบต่อหลายระบบในร่างกาย ถ้ารับในปริมาณที่ต่ำ สามารถเป็นเหตุให้เกิดการระคายเคืองของตา เจ็บคอและไอ หายใจถี่ และมีน้ำอยู่ในปอด ถ้าได้รับระดับต่ำในระยะยาวจะเป็นผลให้เกิดความเหนื่อยล้า สูญเสียความรู้สึกหิว อ่อนเฉื่อย ง่ายต่อความจำสั้น และ วิงเวียนศีรษะหน้ามืดตาลาย ถ้าหายใจเอาก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าไปในระดับที่สูงมากจะเป็นเหตุให้ตายได้แม้จะสูดเข้าไปเพียงเล็กน้อย ดังตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเป็นพิษของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ตามความเข้มข้น (OSHA, 1995 อ้างถึงใน อนุรักษ์ รัตนมูขัย, 2549)

| ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | อาการที่ปรากฏ   |
|--------------------------------|---|
| 10 ส่วนในล้านส่วน              | เริ่มมีอาการระคายเคืองที่ตา   |
| 50 – 100 ส่วนในล้านส่วน        | ระบบทางเดินหายใจเกิดอาการระคายเคืองเล็กน้อย หลังสัมผัส 1 ชั่วโมง  |
| 100 ส่วนในล้านส่วน             | เกิดการระคายเคืองที่ตา สูญเสียการรับกลิ่นหลังสัมผัสเป็นเวลา 2 – 15 นาที สัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะรู้สึกเจ็บปวดบริเวณตา ล้าคอ และอาจเสียชีวิตได้ใน 48 ชั่วโมง |
| 200 – 300 ส่วนในล้านส่วน       | เกิดอาการระคายเคืองที่ระบบทางเดินหายใจมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณลำคอ เมื่อสัมผัสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง  |
| 500 - 700 ส่วนในล้านส่วน       | หมดสติ และอาจเสียชีวิตได้ หลังสัมผัสก๊าซเป็นเวลา 1 ชั่วโมง  |
| 700 – 1,000 ส่วนในล้านส่วน     | ระบบทางเดินหายใจหยุดทำงาน หมดสติ และเสียชีวิตโดยเฉียบพลัน หลังสัมผัสก๊าซ  |

## 2.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยเป็นก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแบคทีเรียหรือในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) แหล่งที่เกิดก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ของเสียและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น โรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานน้ำตาล โรงฆ่าสัตว์ ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และขยะชุมชน เป็นต้น ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 50 – 70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 30 – 50 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไอน้ำ เป็นต้น รูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งานมีอยู่ 3 รูปแบบคือ (สิ่งแวดล้อมประเทศไทย, 2549: 88 – 92)

1. ใช้ในการผลิตพลังงานความร้อน ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับทดแทนน้ำมันเตาในหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เครื่องอบแห้งพืชผลทางการเกษตร หัวกกกลูกสุกรในฟาร์มเลี้ยงสุกร และเตาแก๊สเพื่อทดแทนก๊าซหุงต้มในครัวเรือน เป็นต้น

2. ใช้ในการผลิตพลังงานกล การนำก๊าซชีวภาพใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อการผลิตพลังงานกลเช่น ให้กับเครื่องยนต์ปั้มน้ำ เครื่องจักรกลทางการเกษตรต่างๆ เป็นต้น

3. การผลิตพลังงานไฟฟ้า ในปัจจุบันมี 3 วิธีคือ

ก. ใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งสามารถนำเครื่องยนต์ทั้งดีเซลและเบนซินมาดัดแปลง หรือจะซื้อเครื่องยนต์ที่ใช้สำหรับก๊าซชีวภาพโดยตรงก็ได้เช่นกัน

ข. ใช้กับหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำ วิธีนี้สามารถนำความร้อนจากไอน้ำมาใช้งานได้เรียกว่า ระบบผลิตพลังงานความร้อนร่วม

ค. ใช้กับไมโครเทอร์ไบน์ (Micro Turbine)

อนึ่งก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติคล้ายกับก๊าซธรรมชาติ สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลหรือเบนซินในรถยนต์ได้

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพจากแต่ละแหล่งกำเนิด (Rasi, Veijanen และ Rintala, 2006)

| แหล่งกำเนิด | องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ |                        |                       |                       |                           |
|-------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
|             | CH <sub>4</sub><br>(%)  | CO <sub>2</sub><br>(%) | O <sub>2</sub><br>(%) | N <sub>2</sub><br>(%) | H <sub>2</sub> S<br>(ppm) |
| หลุมฝังกลบ  | 47 - 57                 | 37 - 41                | <1                    | <1 - 17               | 36 - 115                  |
| กากตะกอน    | 57.8                    | 38.6                   | 0                     | 3.7                   | 62.9                      |
| ฟาร์ม       | 55 - 58                 | 37 - 38                | <1                    | <1 - 2                | 32 - 169                  |

จากตารางที่ 2.3 จะพบว่าทุกแหล่งกำเนิดของก๊าซชีวภาพจะสามารถให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่อันตรายเมื่อก๊าซชีวภาพถูกนำไปใช้ในการสันดาปเครื่องยนต์ภายในจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดการกัดกร่อนและการสึกหรอภายในเครื่องยนต์ทำให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นพิษและกัดกร่อนมีผลทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการเผาไหม้เปลี่ยนไปเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Kapdi และคณะ, 2005) ดังนั้นการลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพก่อนการนำไปใช้ประโยชน์นั้นจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปและจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ใช้ก๊าซด้วย

### 2.2.1 ผลกระทบของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีต่อระบบก๊าซชีวภาพและเครื่องมือ

1. เมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายเข้าไปในถังหมักและละลายในความเข้มข้นที่สูงทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในถังหมัก ซึ่งสามารถไปยับยั้งการเกิดของก๊าซชีวภาพและเป็นสาเหตุให้ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพเปลี่ยนไป
2. ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบก๊าซชีวภาพจะไปกัดกร่อนอุปกรณ์โลหะอย่างเช่นเหล็ก และเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์อย่างเช่น เครื่องวัดก๊าซ เครื่องควบคุมความดัน และวาล์วซึ่งเป็นปัญหาอย่างยิ่ง
3. เมื่อเผาไหม้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไอน้ำเมื่อก๊าซทั้งสองรวมตัวกันจะได้ก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและไปทำลายเตาเผาและเครื่องยนต์
4. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้เมื่อละลายในน้ำมันเครื่องจะทำให้น้ำมันเครื่องมีฤทธิ์เป็นกรดและทำให้คุณสมบัติของน้ำมันเครื่องเปลี่ยนไป

## 2.3 ซัลเฟอร์

ธาตุซัลเฟอร์เป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ 6 ของระบบตารางธาตุ เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบจะมีเลขออกซิเดชันได้อยู่ระหว่าง -2 ถึง +6 และค่าที่สำคัญคือ -2, 0, +2, +4 และ +6 ในทางเคมีซัลเฟตและซัลไฟด์จัดว่าเป็นสารประกอบซัลเฟอร์ที่มีความคงตัวที่สุด เนื่องจากมีเลขออกซิเดชันสูงสุดและต่ำที่สุดซึ่งเท่ากับ +6 และ -2 ตามลำดับ ตารางที่ 2.4 แสดงเลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์ที่พบในธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 เลขออกซิเดชันของซัลเฟอร์และสารประกอบซัลเฟอร์ (มันสิน ตันฑุลเวศม์ และมันรักษ์ ตันฑุลเวศม์, 2547)

| รูปของธาตุหรือสารประกอบซัลเฟอร์ | เลขออกซิเดชัน      |
|---------------------------------|--------------------|
| สารอินทรีย์ซัลเฟอร์ (R – SH)    | -2                 |
| ซัลไฟด์ ( $H_2S$ )              | -2                 |
| ธาตุซัลเฟอร์ ( $S^0$ )          | 0                  |
| ไฮโอซัลเฟต ( $S_2O_3^{2-}$ )    | +2 (เฉลี่ยต่อ S)   |
| เทตระไฮโอเนต ( $S_4O_6^{2-}$ )  | +2.5 (เฉลี่ยต่อ S) |
| ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ )    | +4                 |
| ซัลไฟต์ ( $SO_3^{2-}$ )         | +4                 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ )   | +6                 |
| ซัลเฟต ( $SO_4^{2-}$ )          | +6                 |

โดยซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปซัลเฟตภายใต้สภาวะแอโรบิก ส่วนภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซัลไฟด์ไอออนเป็นไอออนที่สามารถเกิดเป็นสารประกอบกับโลหะได้โดยตรงในน้ำได้ง่าย ตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเหล็กและซัลไฟด์ได้เป็นเฟอร์ริกซัลไฟด์ในน้ำเสีย ซึ่งสามารถพบได้บ่อยทั้งนี้เนื่องจากในน้ำจะมีปริมาณเหล็กอยู่ค่อนข้างสูง จึงเกิดเป็นเฟอร์ริกซัลไฟด์ในปริมาณสูงด้วยและเนื่องจากเฟอร์ริกซัลไฟด์เป็นตะกอนสีดำ ดังนั้นเมื่อมีเฟอร์ริกซัลไฟด์ในน้ำจำนวนมากพอจึงเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้น้ำเสียมีสีดำ

## 2.4 ดินลูกรัง (Lateritic soil)

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พุทธศักราช 2544 ได้ให้ความหมายของคำศัพท์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับดินลูกรังไว้ดังนี้ (อัจริยะ กาญจนพิบูลวงศ์, 2544)

ดินลูกรัง (Lateritic soil) คือ ดินที่มีการสลายตัวและพัฒนามาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นเป็นส่วนใหญ่มีเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์ในปริมาณสูงเป็นผลมาจากกระบวนการการเกิดศิลาแลง (Laterization) ส่วนใหญ่เป็นดินสีแดง น้ำตาล หรือเหลืองมักพบเม็ดลูกรังและเม็ดกรวดผสมปนกันอยู่

ศิลาแลงหรือแม่รัง (Laterite) คือ วัสดุที่ผ่านกระบวนการผุพังมาเป็นระยะเวลาอันมีลักษณะเป็นรูพรุนทั่วไป มีสีสนิมเหล็กหรือสีอิฐ ส่วนประกอบสำคัญทางเคมีของศิลาแลงคือ ออกไซด์ของเหล็กและ/หรืออะลูมิเนียม โดยอาจมีแร่ควอตซ์และเคโอลิไนต์ปนอยู่ด้วย ส่วนธาตุที่เป็นต่างและซิลิเกตมีอยู่น้อยมากหากมีสารประกอบเหล็กอยู่มากพอก็อาจนำไปใช้เป็นวัตถุบดลูงเอาเหล็ก หรือหากมีสารประกอบอะลูมิเนียมมากพอก็อาจนำไปถลุงเอาโลหะอะลูมิเนียมได้ ศิลาแลงนั้นมีลักษณะเด่นคือเป็นรูพรุนทั่วไป และมีเนื้อเป็นสารประกอบเหล็กออกไซด์มากกว่าอะลูมิเนียมออกไซด์

ลูกรังและดินลูกรัง เป็นผลผลิตของกระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในพื้นที่แถบร้อน (Tropical Weathering) นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยหลายท่านได้ให้คำจำกัดความของเทอมต่างๆ เกี่ยวกับลูกรัง และดินลูกรัง ดังต่อไปนี้ (วรศักดิ์ ต้นตวนิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ, 2538)

Buchanan (1807) เป็นคนแรกๆ ที่ให้ความหมายของลูกรังที่พบในมาลาบาร์ ประเทศอินเดีย ว่า คือดินที่มีสีเหลืองเนื่องจากมีแร่เหล็กเป็นส่วนประกอบผสมอยู่ในปริมาณสูง มีลักษณะเป็นรูพรุนต่อเนื่องถึงกันทั่วทั้งก้อนและไม่แบ่งเป็นชั้นดิน ดินลูกรังในสภาพธรรมชาติที่ขุดขึ้นมาใหม่ๆ จะมีความอ่อนตัวพอที่จะตัดให้เป็นแผ่นหรือเป็นแท่งได้ แต่จะแข็งตัวอย่างรวดเร็วเมื่อกระทบกับอากาศ จึงมีการนำเอาดินลูกรังนี้มาตัดแต่งให้เป็นก้อน และใช้แทนอิฐในการก่อสร้างอาคาร

Mallet (1883) เป็นคนแรกๆ ที่ให้ความหมายของลูกรังโดยพิจารณาถึงส่วนประกอบทางเคมีเป็นหลัก และได้นิยามลูกรังว่าเป็นดินที่เกิดตามธรรมชาติมีสีแดงเนื่องจากมีออกไซด์ของเหล็กและอลูมินัมเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ

#### 2.4.1 กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อน (Tropical Weathering) และกระบวนการก่อกำเนิดลูกรัง (Laterization)

กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขตร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและเคมีฟิสิกส์ อันมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปของแร่ในหินต้นกำเนิด เกิดเป็นแร่ดินเหนียวประเภทสองชั้น (Two Layer Clay Minerals) และออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของลูกรัง ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$ ) สะสมอยู่ในปริมาณที่สูง กระบวนการสลายตัวตามธรรมชาติในเขต

ร้อนอันเป็นกระบวนการเริ่มต้นของกระบวนการก่อกำเนิดลูกรัง สามารถแบ่งขั้นตอนการเกิดออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

#### 2.4.1.1 กระบวนการสลายตัวทางเคมี

เป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่ทำให้แร่หินเดิมในหินถูกทำลาย และทำให้เกิดสารใหม่ประเภทออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ , และ  $K_2O$  ซึ่งปรากฏในรูปของอนินทรีย์สาร

#### 2.4.1.2 กระบวนการก่อกำเนิดลูกรัง

เป็นกระบวนการที่  $SiO_2$  ถูกชะล้างพัดพาออกไปภายใต้สภาวะการระบายน้ำที่เหมาะสม เหลือ  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , และ  $MnO_2$  ไว้เป็นส่วนใหญ่

#### 2.4.1.3 กระบวนการสูญเสียความชื้นตามธรรมชาติ

เป็นกระบวนการที่เกิดการสูญเสียความชื้นในเซสควิออกไซด์ (มีสูตรเป็น  $R_2O_3 \cdot H_2O$  โดย R หมายถึงเหล็กและ/หรืออลูมิเนียม) บางส่วนหรือทั้งหมดทำให้เกิดการแข็งตัว นอกจากนี้การสูญเสียความชื้นในสารละลายที่มีเหล็กออกไซด์ปนอยู่ในสภาพของคอลลอยด์จะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น และเกิดการตกผลึกของเหล็กออกไซด์ อันเป็นผลให้เกิดออกไซด์ของเหล็กในรูปของไลมอไนต์ ( $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ), เกอไทต์ ( $FeOOH$ ) และฮีมาไทต์ ( $Fe_2O_3$ )

ความแข็งตัวที่เกิดขึ้นในลูกรังเนื่องมาจากการที่ออกไซด์ของเหล็กทั้งสามชนิดดังกล่าวเคลือบอยู่บนอนุภาคดิน กระบวนการก่อกำเนิดลูกรังอันยาวนานจะทำให้ปริมาณของเหล็กออกไซด์รอบๆ อนุภาคดินเพิ่มหนามากขึ้นจนกลายเป็นเม็ดลูกรังที่เรียกว่า Laterite gravel

### 2.4.2 สภาพแวดล้อมของการเกิดดินลูกรัง

สภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ทำให้เกิดดินลูกรังมีดังต่อไปนี้

1. หินต้นกำเนิด จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลูกรังกับหินต้นกำเนิดพบว่า ดินลูกรังเกิดจากหินต้นกำเนิดหลายชนิด เช่น แกรนิต ไนส์ บะซอลท์ และฟิลไลต์ นอกจากนี้ยังพบว่าดินลูกรังเกิดจากหินดินดาน หินทราย และหินปูน หินที่เป็นหินต้นกำเนิดที่ดีของศิลาแลงและดินลูกรัง ได้แก่หินแกรนิต หินบะซอลท์ หินไนส์ หินอัคนีชนิดต่างๆ ที่มีสภาพเป็นกรด หินทราย และหินปูนที่ไม่บริสุทธิ์

2. สภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิอากาศมีส่วนสำคัญในกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการกำเนิดของดินลูกรัง ดินลูกรังก่อตัวขึ้นได้จะต้องเป็นภูมิอากาศแบบร้อน หรือกึ่ง



ร้อน มีอุณหภูมิและความชื้นสูง อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการก่อกำเนิดดินลูกรังประมาณ 16 – 27 °C ส่วนปริมาณฝนที่พอเหมาะประมาณ 500 – 2,000 มิลลิเมตรต่อปี

3. สภาพของพืชพันธุ์ แร่เหล็กจะสะสมกันในปริมาณสูงภายใต้ทุ่งหญ้าเขตร้อนมากกว่าบริเวณป่าดิบ ดังนั้นดินลูกรังที่ยังอ่อนตัวจะเกิดในบริเวณป่าขึ้น ส่วนดินลูกรังที่แข็งตัวแล้วจะพบในเขตทุ่งหญ้าที่แห้งแล้ง

4. สภาพภูมิประเทศและการระบายน้ำ ดินลูกรังมักจะเกิดที่บริเวณเชิงลาดสูงสุดของเนินเขา และบริเวณรอบๆ เชิงลาดสูงสุดของที่ราบสูง ทั้งนี้เพราะบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีการระบายน้ำได้ดี หินที่มีการระบายน้ำได้ดี เช่น หินทราย และหินไนส์ จะสลายตัวกลายเป็นดินลูกรังได้ง่าย ส่วนหินที่มีการระบายน้ำไม่ดี เช่น หินชะนวน หินควอทไซต์ และหินฟิลไลต์ จะไม่เกิดการสลายตัวกลายเป็นดินลูกรัง

### 2.4.3 สีของดินลูกรัง

ดินลูกรังส่วนใหญ่มักจะมีสีแดง และจะมีสีแดงเข้มหรือสีแดงอ่อนขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เป็นส่วนประกอบของออกไซด์ของเหล็ก อลูมิเนียม และแมงกานีส โดยทั่วไปสีของดินเกิดจาก

1. สารอินทรีย์ ดินจะมีสีดำ สีน้ำตาล และสีเทา
2. แร่ธาตุต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของดินลูกรัง
  - แร่เหล็ก ดินจะมีสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีเขียว
  - แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม ดินจะมีสีขาว
  - อลูมิเนียม ดินจะมีสีขาว
  - แมงกานีส ดินจะมีสีดำ และสีน้ำตาล

2.4.4 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินลูกรัง (วรศักดิ์ ตันตวินิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ, 2538)

1. พีเอชของดินลูกรังจะเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกแต่จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4 – 8 แสดงว่าดินลูกรังจะเกิดในบริเวณที่มีสภาพเป็นกรด

2. ดินลูกรังที่มีเม็ดละเอียดจะมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าดินลูกรังที่มีเม็ดหยาบ ดินลูกรังจะมีปริมาณสารอินทรีย์น้อยกว่าร้อยละ 2 ที่ชั้นผิวดิน โดยทั่วไปแล้วดินลูกรังจะมีสารอินทรีย์ต่ำ

3. ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตในดินลูกรังจะมีมากหรือน้อยแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและพืชพรรณ เมื่อเกิดการชะล้างและกระบวนการก่อกำเนิดดินลูกรังมากขึ้นปริมาณคาร์บอเนตในดินจะน้อยลง

4. ดินลูกรังส่วนใหญ่จะมีการกระจายขนาดเม็ดดี

5. ดินลูกรังจะมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.67 – 3.46 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กออกไซด์ในดินลูกรัง ถ้าในดินลูกรังมีปริมาณของเหล็กออกไซด์มากก็จะมีค่าความถ่วงจำเพาะมากด้วย

**2.4.5 การสำรวจแหล่งดินลูกรังในประเทศไทย** (วรศักดิ์ ต้นติวณิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ, 2538)

1. ในประเทศไทยจะพบดินลูกรังมากกว่าลูกรัง ดินลูกรังที่พบมักจะมีพบในลักษณะของกรวด ทราย ดินตะกอน และดินเหนียวที่มีเหล็กออกไซด์ของเหล็กปนอยู่ในปริมาณสูง ลูกรังที่จับเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ไม่ค่อยพบบ่อยนัก

2. ดินลูกรังที่ใช้ในการก่อสร้างทางหลวงมักจะได้จากการขุดและการดินผสมเป็นกอง ประกอบด้วยดินตะกอน และดินเหนียวที่มีเหล็กออกไซด์ปริมาณสูงผสมรวมกันกับเม็ดลูกรังซึ่งมีความแข็งต่างกัน ลูกรังที่เกิดเป็นก้อนใหญ่ หรือเป็นพีตแข็งติดต่อกันจะไม่นำมาใช้ในการก่อสร้างทางหลวง

3. สภาพที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดดินลูกรังในประเทศไทยได้แก่ สภาพที่มีแร่เหล็กหรือออกซิเจนในปริมาณสูงอย่างน้อยร้อยละ 1 – 2 สภาพที่ดินมีการระบายน้ำดี สภาพที่มีออกซิเจนในน้ำใต้ดินสูง และสภาพที่สิ่งแวดล้อมมีภาวะเป็นกรด รวมทั้งสภาพที่ภูมิประเทศมีความเหมาะสมที่จะก่อให้เกิดการชะล้างในชั้นดินได้ดี

4. ความแข็งแรงของเม็ดดินลูกรังอาจจะเพิ่มขึ้นได้ภายหลังจากการขุดและการแผ่ดินลูกรังแล้วปล่อยให้ไวกลางแจ้งเพื่อให้ดินลูกรังเกิดปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนในอากาศ วงจรการเปียกสลับกับแห้งจะช่วยให้ออกซิเจนแทรกซึมเข้าไปในเม็ดลูกรังและเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องอันทำให้เม็ดลูกรังแข็งมากขึ้น

## 2.5 เหล็ก (Iron)

เหล็กโดยทั่วไปมีสถานะออกซิเดชัน 0, +2 และ +3 มีเพียงเหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ (0) เท่านั้นที่ปรากฏในรูปธาตุเหล็กหรือเหล็กบริสุทธิ์ เหล็กที่ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ไม่มีเหล็กบริสุทธิ์แต่จะผสมธาตุอื่นลงไป เพื่อทำให้มีคุณสมบัติขึ้นหรือที่เรียกว่าเหล็กกล้า (steel)

เหล็กสถานะออกซิเดชันศูนย์ ( $Fe^0$ ) เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดเจือจางเมื่อไม่มีอากาศ ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยา คือเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นจะได้เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) พร้อมกับสารที่เกิดการรีดิวซ์กรดคือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $SO_2$ ) (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542 อ้างถึงใน วุฒิชัย ทิวพงษ์, 2545)

เหล็กมักพบในดินอยู่ในรูปของเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) และเหล็กซัลไฟด์ (ไพไรต์,  $FeS_2$ ) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำมากกว่าสารประกอบอื่นๆ ในบางพื้นที่อาจพบเหล็กเฟอร์รัสคาร์บอเนต (Siderite) ที่ละลายน้ำเล็กน้อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาลปริมาณสูง ทำให้มีการละลายของเฟอร์รัสคาร์บอเนตกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัส

แร่เหล็กที่พบในธรรมชาติมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยภายใต้สภาวะแอโรบิก ถ้าเหล็กอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์ริก การละลายน้ำของเหล็กเฟอร์ริกก็จะไม่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจนละลายน้ำอยู่ด้วย แต่ถ้าอยู่ภายใต้สภาวะไร้อากาศแล้วแบคทีเรียหลายชนิดสามารถใช้เหล็กเฟอร์ริกในการหายใจแทนออกซิเจน ยกตัวอย่างเช่น ในดินที่ปราศจากออกซิเจนแบคทีเรียสามารถใช้เหล็กเฟอร์ริกเป็นสารรับอิเล็กตรอนและกลายเป็นเหล็กเฟอร์รัส นั่นคือเหล็กเฟอร์ริกจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสซึ่งสามารถละลายน้ำได้

## 2.6 วิธีการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Arthur และ Anna, 1999)

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในก๊าซชีวภาพ จะขึ้นกับปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามสารอินทรีย์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะต้องนำไปกำจัดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการกัดกร่อนในเครื่องอัดอากาศ ถังเก็บก๊าซ และเครื่องยนต์ โดยมีวิธีที่ใช้สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในกระบวนการก๊าซชีวภาพดังนี้

### 2.6.1 สารละลายเหล็กคลอไรด์

สารละลายเหล็กคลอไรด์สามารถใส่ลงในถังปฏิกิริยาไร้อากาศได้โดยตรงหรือนำไปเป็นสารตั้งต้นในถังน้ำเข้า เมื่อสารละลายเหล็กคลอไรด์ ( $FeCl_2$ ) ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) จะทำปฏิกิริยากับไอออนซัลไฟด์ ( $S^{2-}$ ) จะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของผลึกเหล็กซัลไฟด์ ( $FeS$ ) โดยวิธีนี้ให้ผลดีในการลดไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความเข้มข้นสูง แต่ผลที่ได้คือกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้น้อยกว่าในระดับที่จะนำไปใช้ในเครื่องยนต์ได้ การใส่สารละลายเหล็กคลอไรด์โดยตรงในถังหมัก เป็นกระบวนการกำจัดสารนี้ได้เพียงบางส่วนเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาการกัดกร่อนในส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ในด้านการลงทุนอาจจะไม่สูงมาก

เนื่องจากมีเพียงถ้ำสำหรับเก็บสารละลายเหล็กคลอไรด์ และบ่อบำบัดน้ำสำหรับบ่อบำบัดสารละลายเข้าสู่ถ้ำ  
อย่างไรก็ดีสารละลายเหล็กคลอไรด์มีราคาสูง

## 2.6.2 เหล็กออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับเหล็กออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์จะเกิดเป็นรูปเหล็กซัลไฟด์ (FeS) ขึ้น ขณะที่เมื่อวัสดุอิ่มตัวก็สามารถนำไปฟื้นฟูสภาพหรือเปลี่ยนได้ ในการนำเหล็กซัลไฟด์มาฟื้นฟูสภาพนั้นจะนำเหล็กซัลไฟด์ไปออกซิไดส์กับอากาศจะได้เหล็กออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์กลับมารวมทั้งธาตุซัลเฟอร์ด้วย

ปฏิกิริยาควรเกิดที่อุณหภูมิไม่เกินประมาณ 12 °C และเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์จำเป็นที่จะต้องใช้น้ำ ดังนั้นก๊าซชีวภาพจึงต้องมีความชื้น อย่างไรก็ตามหากเกิดการกลั่นตัวจะเกิดปัญหาได้จากการที่เหล็กออกไซด์จะติดกันเองทำให้พื้นผิวในการทำปฏิกิริยาลดลง

ในการฟื้นฟูสภาพนั้นจะเกิดเป็นกระบวนการแบบคายความร้อน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการลุกไหม้ได้โดยง่าย ส่วนธาตุซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นยังคงอยู่บนผิวและยังปกคลุมผิวของเหล็กออกไซด์

ในสภาวะไร้อากาศซัลไฟด์ได้ถูกทนายว่าจะถูกจับตกตะกอนกับเฟอร์รัสไอออน (Fe<sup>2+</sup>) เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำเช่น ไพไรไรต์, ไพไรต์ และมาร์คาไซต์ ส่วนการทำปฏิกิริยาระหว่างเหล็กออกไซด์ไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีรูปผลึก (amorphous) และซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าการทำปฏิกิริยากันระหว่างฮีมาไทต์และซัลไฟด์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสใหญ่กว่าสำหรับการทำปฏิกิริยา (Canfield และคณะ, 1992 อ้างถึงใน Ritvo, Shitumbanuma และ Dixon, 2004) ซึ่งโดยสรุปแล้วพบว่า สารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมีผลน้อยในการลดความเข้มข้นของซัลไฟด์ แต่ยังมีความสามารถที่จะป้องกันการสะสมของซัลไฟด์ในระยะเวลาที่ยาวนานได้ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (Ritvo, Shitumbanuma และ Dixon , 2004)

| ปฏิกิริยา   | พลังงานอิสระของปฏิกิริยา<br>(กิโลแคลอรี) |
|---|--|
| การตกตะกอนเหล็กซัลไฟด์  |  |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{HS}^- \rightarrow \text{FeS}_{(\text{amorphous})} + \text{H}^+$   | -5.01                                    |
| $\text{Fe}^{2+} + \text{HS}^- + \text{S}^0 \rightarrow \text{FeS}_{2(\text{pyrite})} + \text{H}^+$  | -18.71                                   |
| การเปลี่ยนรูปเหล็กซัลไฟด์ด้วยเหล็กออกไซด์จับกับซัลไฟด์  |  |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3_{(\text{hematite})} + 3\text{H}_2\text{S}_{(\text{l})} \rightarrow 2\text{FeS}_{(\text{tetragonal})} + \text{S}_{(\text{rhombic})}^0 + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$ | -17.95                                   |
| $\text{Fe}(\text{OH})_3_{(\text{soil})} + 3\text{H}_2\text{S}_{(\text{l})} \rightarrow 2\text{FeS}_{(\text{tetragonal})} + \text{S}_{(\text{rhombic})}^0 + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})}$    | -33.12                                   |

เหล็ก เป็นสิ่งที่มีประสิทธิภาพในการทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอนเนื่องจากผลิตเฟอร์รัสซัลไฟด์ (เหล็กซัลไฟด์, FeS) ที่สามารถละลายน้ำได้  $3.7 \times 10^{-19}$  ที่อุณหภูมิ  $18^\circ\text{C}$  ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีดั้งเดิมกลายเป็นสีดำ

### 2.6.3 เศษไม้ที่เคลือบเหล็กออกไซด์ (Iron oxide wood chips)

เศษไม้ที่ถูกเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์นั้นจะมีอัตราส่วนของผิวสัมผัสต่อปริมาตรใหญ่กว่าของเหล็กฝอย (plain steel) รวมทั้งมีประสิทธิภาพดีกว่าในด้านอัตราส่วนของผิวหน้าต่อน้ำหนักเนื่องจากไม้มีความหนาแน่นต่ำ โดยในเหล็กออกไซด์ 100 กรัมสามารถดูดติดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ประมาณ 20 กรัม

ในประเทศสหรัฐอเมริกาเศษไม้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากมีราคาต่ำ แต่ต้องระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงขึ้นมากเกินไปในขณะที่ทำการฟื้นฟูสภาพตัวกลางเหล็ก

### 2.6.4 เม็ดเหล็กออกไซด์ (Iron oxide pellets)

เป็นตัวดูดซับที่มีอัตราส่วนของผิวสัมผัสต่อปริมาตรสูงที่สุดทำมาจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียจากการผลิตอะลูมิเนียม อย่างไรก็ตามเหล็กออกไซด์แบบเม็ดมีความหนาแน่นสูงกว่าแบบ เศษไม้ การใช้เม็ดเหล็กออกไซด์ที่จำนวน 100 กรัมสามารถรับความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่าง 1 – 4 ส่วนในล้านส่วนได้ถึง 50 กรัม มีการใช้เม็ดเหล็กออกไซด์นี้ในการบำบัดของเสียไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยปราศจากการเติมสารละลายเหล็กคลอไรด์ในประเทศเยอรมนีและประเทศสวิสเซอร์แลนด์

## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**อัจฉรีย์ กาญจนพิบูลวงศ์ (2544)** ศึกษาการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง พบว่าความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสามชนิด ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้ดินลูกรังที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ชนิดของโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเป็นกรด – ด่างของน้ำเสีย ปริมาณของดินลูกรังที่ใช้ และระยะเวลาที่ดินลูกรังสัมผัสกับน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก จากผลการศึกษาพบว่าการใช้ดินลูกรังปริมาณ 1 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงกว่าร้อยละ 99 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของตะกั่ว 25 ส่วนในล้านส่วน สามารถกำจัดทองแดงได้สูงกว่าร้อยละ 99 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน และสามารถกำจัดสังกะสีได้สูงถึงร้อยละ 98 เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของสังกะสี 5 ส่วนในล้านส่วน พบว่าตะกั่วเป็นโลหะหนักที่ถูกกำจัดไปได้เร็วที่สุด รองลงมาคือทองแดง และสังกะสี ตามลำดับ

**วุฒิชัย ทิวลิปพงษ์ (2545)** ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบเหล็ก โดยทำการแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองแบบแบตช์ ใช้ในการศึกษาผลของความเป็นกรด – ด่างที่ 4, 5, 6 และ 7 ผลของปริมาณผงตะไบเหล็กที่ 1, 1.5 และ 2 กรัมเหล็กต่อลิตรน้ำเสีย และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการดูดติดผิวของนิกเกิลบนเหล็กออกไซด์ที่เกิดจากการกัดกร่อนของผงตะไบเหล็กเกิดขึ้นได้ดีที่ความเป็นกรด – ด่างสูง และถ้าเพิ่มปริมาณผงตะไบเหล็กจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลสูงขึ้น ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลจะทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการกำจัดต่ำลง ส่วนการทดลองแบบคอลัมน์ ใช้ในการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทรายที่ 8ต่อ8, 10ต่อ8 และ 12ต่อ8 (กรัมเหล็กต่อกรัมทราย) และผลของความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลที่ 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยระหว่างผงตะไบเหล็กกับทรายที่ความเข้มข้นเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิล 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดได้ลดลง และที่อัตราส่วนโดยมวลระหว่างผงตะไบเหล็กกับทราย 8ต่อ8 (กรัมต่อกรัม) ผงตะไบเหล็กสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลได้เพิ่มขึ้น

**ณัฐพล รัตนมุขย์ (2549)** ศึกษาการบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเครื่องกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางผสม ซึ่งทำการทดลอง 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาตัวกลางที่เหมาะสม

ในกำบับัดก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเปรียบเทียบตัวกลางหลัก 4 ประเภท คือ ปุ๋ยหมัก ดินขุยมะพร้าว หินภูเขาไฟ และถ่านกัมมันต์ โดยใช้ตะกอนจากโรงกำบับัดน้ำเสียชุมชนเป็นแหล่งจุลินทรีย์ ปุ๋ยคอกเป็นแหล่งธาตุอาหารของจุลินทรีย์ และกำบับัดปุ๋ยหมักเพื่อช่วยป้องกันการอัดตัวของตัวกลาง การทดลองนี้ทำการแปรผันเวลากักพักที่ 45, 60 และ 75 วินาที และความเข้มข้นก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วง 50 – 300 ส่วนในล้านส่วน จากผลการศึกษพบว่าปุ๋ยหมักมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวกลางของเครื่องกรองชีวภาพในการกำบับัดก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากมีค่าความสามารถในการกำจัดสูง ส่วนขั้นตอนที่ 2 จะใช้ตัวกลางหลักที่มีประสิทธิภาพการกำบับัดสูงสุดจากการทดลองแรกในการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการไหลของก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำบับัด โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำบับัดระหว่างเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลขึ้นและเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลลง ซึ่งในการทดลองที่สองจะแปรผันเวลากักพักที่ 25, 50 และ 75 วินาที และใช้ความเข้มข้นก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ 300 ส่วนในล้านส่วน จากผลการศึกษพบว่าเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลลง จะมีประสิทธิภาพการกำบับัดใกล้เคียงกับเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลขึ้นที่เวลากักพัก 50 วินาทีขึ้นไป ในขณะที่เวลากักพักมีค่าน้อยกว่า 25 วินาที พบว่าประสิทธิภาพการกำบับัดของเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลลงจะมีค่าน้อยกว่าเครื่องกรองชีวภาพที่มีทิศทางการไหลขึ้น

**Elias และคณะ (2002)** ศึกษาการทำงานของเครื่องกรองชีวภาพในการกำจัดก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยวัสดุตัวกลางเป็นปุ๋ยหมักอัดแท่ง มูลจากหมู และขี้เลื่อย เวลาในการเดินระบบ 2,500 ชั่วโมง อัตราการรองรับมวลก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มจาก 10 เป็น 45 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการกักพักตั้งแต่ 13 – 27 วินาที ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 90 ผลผลิตหลักที่ได้มีปริมาณธาตุซัลเฟอร์ของซัลเฟอร์ทั้งหมดที่สะสมในตัวกลาง (ประมาณร้อยละ 87.5 ของซัลเฟอร์) โดยระหว่างการทดลองไม่มีการเติมสารเคมีสำหรับปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง และไม่มีการเติมสารอาหาร

**Zicari (2003)** ศึกษาเทคโนโลยีการกำจัดก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้กับฟาร์มในระบบก้ำชชีวภาพ และทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้ประโยชน์ปุ๋ยหมักจากมูลหมูในฟาร์มเป็นตัวกลางในการดูดซับก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ กระบวนการทางเคมีใช้ฟองน้ำที่มีรูพรุน, media-G2 และถ่านกัมมันต์ที่ทำให้มีประจุด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กระบวนการทางเคมีเป็นระบบที่น่าสนใจในการกำจัดก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ กระบวนการอื่นๆ เช่นเมมเบรน ต้องการการลงทุนที่สูง ราคาตัวกลางที่แพง ส่วนกระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการกำจัดการก้ำชไฮโดรเจนซัลไฟด์จะลดช่วงการดำเนินการและสารเคมีลง แต่

ต้องการราคาการลงทุนที่สูงกว่ากระบวนการแบบแห้ง (เคมี) ส่วนในการทดสอบปุ๋ยหมักจากมูลหมูใช้เวลาในการเดินระบบ 1,057 ชั่วโมง เวลาพัก 100 วินาที ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าอยู่ที่ประมาณ 1,500 ส่วนในล้านส่วน ประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 80 ความสามารถในการกำจัดอยู่ระหว่าง 16 – 118 กรัมก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง อุณหภูมิในตัวกลางอยู่ในช่วง 19 – 43 °C และค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 41 – 70 ค่าความเป็นกรด – ด่าง 4.6 – 6.9 ถึงแม้ว่ากลไกหลักสำหรับการกำจัดซัลเฟอร์จากก๊าซจะไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นทางชีววิทยา, ทางเคมี หรือทางกายภาพ แต่ซัลเฟอร์ที่มีในตัวกลางจะเพิ่มมากกว่าร้อยละ 1,400

**Barona และคณะ (2004)** ได้ทำการศึกษาวัดสฤตัวกลางอินทรีย์ 4 ชนิด โดยตัวกลางที่มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุดที่ความเข้มข้นเข้าในช่วง 0.03 – 0.32 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร คือการผสมของมูลหมูกับขี้เลื่อยซึ่งมีส่วนประกอบของเหล็กอยู่มาก โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 83 – 97 หลังจากเลือกวัสดุตัวกลางได้แล้วจะมาดูผลของเครื่องกรองชีวภาพเมื่อค่อยๆทำการเปลี่ยนและเปลี่ยนทันทีในอัตราการระบรทุกก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และอัตราการไหลก๊าซที่จะทำการศึกษา โดยเริ่มที่ความเข้มข้น 0.28 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรและอัตราการไหลก๊าซ 1.3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระยะเวลาพักต่ำกว่า 22 วินาที อัตราการระบรทุกสารปนเปื้อนขาออกต่ำกว่า 15 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง วัสดุตัวกลางสามารถมีอัตราการย่อยสลายได้สูงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลก๊าซจาก 0.81 – 1.85 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำให้ความสามารถในการกำจัดลดลง เมื่ออัตราก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าค่อยๆ ลดลงจาก 0.55 เป็น 0.26 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น เครื่องกรองชีวภาพที่มีวัสดุตัวกลางที่เลือกไว้จะมีความสามารถในการลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีของปัจจัยที่ใช้ดำเนินการอย่างอัตราการระบรทุกสารปนเปื้อนและอัตราการไหลก๊าซ แต่ประสิทธิภาพนี้เป็นที่แน่ชัดว่าขึ้นกับอัตราการไหลก๊าซและเวลาพัก

**Horikawa และคณะ (2004)** การทดลองนี้ศึกษาการทำให้ก๊าซชีวภาพสะอาดขึ้นโดยการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกกำจัดด้วยวิธีการดูดซับทางเคมีในสารละลาย iron – chelated ซึ่งถูกกระตุ้นด้วย Fe/EDTA ซึ่งจะเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กลายเป็นธาตุซัลเฟอร์ การเตรียมสารละลายที่ใช้กระตุ้นและผลของการดูดซับฟิสิกส์ภายในน้ำบริสุทธิ์ภายใต้สภาวะเดียวกัน ผลการทดลองที่แสดงให้เห็นคือที่ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน เปอร์เซ็นต์ของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่สูงสามารถกำจัดได้ในสารละลายกระตุ้นมากกว่าในน้ำ



**Kapdi และคณะ (2005)** ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะพบได้ในก๊าซชีวภาพซึ่งจะต้องถูกกำจัดเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนของเครื่องอัดอากาศ, ถังเก็บก๊าซ และเครื่องยนต์ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความเป็นพิษและเป็นตัวกัดกร่อนซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยการเผาไหม้ โดยปกติการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะใช้กระบวนการอยู่ 2 กระบวนการคือ (1)กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง และ(2)กระบวนการออกซิเดชันแบบเปียก ในกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้งสามารถใช้สำหรับการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซเพื่อเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์หรือออกไซด์ของซัลเฟอร์ ในวิธีการแบบแห้งนี้มีการกำจัดด้วยออกซิเจนเพื่อเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์และน้ำ และใช้เหล็กออกไซด์โดยก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับเหล็กไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์เพื่อเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กซัลไฟด์ โดยก๊าซชีวภาพจะถูกนำไปผ่านแท่งเหล็กออกไซด์ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย

**Moosavi และคณะ (2005)** ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นตัวออกซิเดนต์ที่อัตราการระบรทุกและอัตราการไหลของของเหลวไหลกลับที่แตกต่างกัน โดย ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลองผลิตจากสารละลายโซเดียมซัลไฟด์และกรดไฮโดรคลอริก ผลที่ได้คือการใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิเดนต์ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ มีประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99.5

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ มุ่งเน้นทำการศึกษาค้นคว้าหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยมีตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยคือ ดินลูกรัง ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดินลูกรังในประเทศไทยโดยนำมาจาก 2 แหล่งแหล่งละ 1 ตัวอย่างคือแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และแถบถนนสายท่าแร่ - ศรีสงคราม เพื่อศึกษาหาปริมาณและชนิดของเหล็กในแต่ละแหล่ง โดยขั้นแรกจะทำการคัดแยกขนาดแล้วเลือกดินลูกรังที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) มากเพื่อใช้ในการวิจัย โดยจะนำดินที่ได้แบ่งออกเป็น 4 แบบ แบบที่ 1 ดินลูกรังแบบไม่ถูกนำไปฆ่าเชื้อ แบบที่ 2 ดินลูกรังที่นำไปฆ่าเชื้อ แบบที่ 3 และแบบที่ 4 เป็นดินลูกรังที่ทำการฆ่าเชื้อแล้วผสมผงเหล็กในปริมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยมวล ตามลำดับ แล้วทำการเลือกดินในแบบที่มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุดมาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบและอัตราการไหลของก๊าซคงที่ทุกการทดลอง ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

**การทดลองที่ 1** เป็นการศึกษาปริมาณและชนิดของเหล็กของดินลูกรังทั้ง 2 แหล่งคือ แถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร โดยนำไปหาปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) แล้วเลือกจากขนาดของแหล่งดินที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์มากที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่ 2

**การทดลองที่ 2** เป็นการศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมระหว่างดินลูกรังที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อ ดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อ และดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก ในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึกเท่ากันทุกคอลัมน์คือ 0.2 เมตร โดยตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยคือ ดินลูกรัง ที่ได้จากการทดลองที่ 1 เมื่อได้ตัวกลางที่เหมาะสมแล้วนำตัวกลางนั้นไปใช้ในการทดลองที่ 3

**การทดลองที่ 3** เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดของตัวกลางที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 2 ที่แต่ละระยะความลึกที่มากขึ้นกว่า 0.2 เมตรคือที่ 0.3, 0.4, และ 0.5 เมตร

### 3.2 ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัย

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วุฒิชัย วัชรวิเศษเกียรติ, 2528 ได้ศึกษาสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทย พบว่าประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบมรสุมซึ่งมีอากาศแบบร้อนและมีฝนตกชุก ตามสภาพภูมิอากาศดังกล่าวทำให้ประเทศไทยเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของลูกรัง (Laterites) และดินลูกรัง (Lateritic soils) แหล่งหนึ่งของโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีแหล่งลูกรัง และดินลูกรังเกิดแผ่กระจายเป็นบริเวณกว้างตลอดทั้งภาค

ในดินลูกรังจะมีเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) อยู่ในปริมาณสูงซึ่งเหล็กออกไซด์มีความสามารถจับกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

ผลการศึกษาด้านขนาดของดินลูกรังพบว่า ปริมาณเหล็กออกไซด์ในเม็ดหยาบจะสูงกว่าในเม็ดละเอียดมาก สามารถแสดงได้ดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของดินลูกรังในประเทศไทย แยกตามขนาดเม็ด (Vallerga et al., 1969 อ้างถึงใน ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วุฒิชัย วัชรวิเศษเกียรติ, 2528)

| ออกไซด์                        | ตัวอย่างขนาดเม็ด (มิลลิเมตร) ร้อยละ |          |             |             |            |           |             |              |               |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------|-------------|-------------|------------|-----------|-------------|--------------|---------------|
|                                | 18 - 9                              | 9 - 4.75 | 4.75 - 2.36 | 2.36 - 1.18 | 1.18 - 0.6 | 0.6 - 0.3 | 0.30 - 0.15 | 0.15 - 0.075 | ต่ำกว่า 0.075 |
| SiO <sub>2</sub>               | 19.9                                | 21.2     | 23.5        | 29.3        | 60         | 75.7      | 86.2        | 83.9         | 69            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.9                                 | 10.9     | 7           | 4.9         | 8          | 2         | 12          | 9.2          | 10            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 62.3                                | 55.2     | 59.1        | 53.3        | 23.2       | 16        | 4           | 3.7          | 7.9           |
| CaO                            | 0.01                                | 0.01     | 0.02        | 0.01        | 0.005      | 0.003     | 0.003       | 0.002        | 0.003         |
| MgO                            | 1.5                                 | 0.71     | 1.2         | 0.79        | 1.2        | 1.7       | 1.3         | 0.76         | 1.5           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.06                                | 0.04     | 0.04        | 0.04        | 0.04       | 0.06      | 0.04        | 0.04         | 0.05          |
| K <sub>2</sub> O               | 0.39                                | 0.4      | 0.48        | 0.48        | 0.48       | 0.48      | 0.48        | 0.43         | 0.84          |

จากตารางที่ 3.1 พบว่าดินลูกรังส่วนที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์น้อยที่สุดได้แก่ ดินลูกรังส่วนที่ผ่านตะแกรงตั้งแต่เบอร์ 50 (0.3 มิลลิเมตร) ลงไปถึงเบอร์ 200 (0.075 มิลลิเมตร) ผลการศึกษาด้านปริมาณเหล็กออกไซด์ที่อยู่ในดินลูกรังพบว่า พื้นที่แถบถนนสายอุดรธานี - สกลนคร มีปริมาณเหล็กออกไซด์มากที่สุดคือร้อยละ 18.45 รองลงมาคือ แถบถนนสายท่าแร่ - ศรีสงคราม ร้อยละ 12.92 พื้นที่ที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์น้อยที่สุดคือ แถบถนนสายคำแก่นคูณ - เชื้อนอุบลรัตน์ ร้อยละ 1.59 รองลงมาคือ แถบถนนสายห้วยเม็ก - ท่าคันโท ร้อยละ 2.43 (ทุกตัวอย่างผ่านตะแกรงเบอร์ 200 คือ 0.075 มิลลิเมตร)

ด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นจึงจะนำดินลูกรังที่อยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือมาใช้ โดยจะนำดินลูกรังแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และ แถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม มาแหล่งละ 1 ตัวอย่างเนื่องจากมีปริมาณเหล็กออกไซด์สูง ด้านขนาดของดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้ดินลูกรังที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 แต่ค้ำที่ขนาด 1.18 มิลลิเมตร ดังนั้นจะได้เม็ดดินขนาด 2.36 มิลลิเมตรและขนาด 1.18 มิลลิเมตร มาทำงานวิจัยเนื่องจากตามมาตรฐานการกระจายขนาดอนุภาคของดิน (ASTM D 422) นั้นขนาดดินจะเริ่มที่ 4.75, 2.36, 1.18, 0.6, 0.425, 0.3, 0.15 และ 0.075 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากตั้งแต่ขนาด 0.6 มิลลิเมตรเป็นต้นไปขนาดดินมีลักษณะเหมือนฝุ่นผงและมีปริมาณเหล็กออกไซด์น้อย ดังนั้นขนาดดินตั้งแต่ 0.6 มิลลิเมตรเป็นต้นไปจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย ส่วนที่ขนาดดิน 4.75 มิลลิเมตรนั้นขนาดดินส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดไม่เท่ากันเนื่องจากเป็นขนาดดินแรกก้อนของดินจึงมีขนาดเล็กบ้างใหญ่บ้าง ดังนั้นขนาดดินที่เหมาะสมในงานวิจัยคือขนาดดินที่ 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ลักษณะดินลูกรังแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร



รูปที่ 3.2 ลักษณะดินลูกรังแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม

### 3.3 การวิเคราะห์สมบัติและการเตรียมตัวกลาง

ตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยคือ ดินลูกรัง มาจาก 2 แหล่งคือแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และ แถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม แหล่งละ 1 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติดังตารางที่ 3.2 เริ่มแรกดินลูกรังที่ได้จะนำไปตากแดดและนำไปบดแล้วร่อนผ่านตะแกรง ดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเม็ดดินลูกรังขนาด 2.76 มิลลิเมตรและขนาด 1.18 มิลลิเมตร แล้วนำแต่ละขนาดไปหาปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ดินลูกรังที่ถูกเลือกจะถูกแบ่งออกเป็น 4 แบบคือแบบที่ 1 เป็นดินลูกรังไม่ฆ่าเชื้อ แบบที่ 2 เป็นดินลูกรังฆ่าเชื้อ ส่วนแบบที่ 3 เป็นดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และแบบที่ 4 คือดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ซึ่งตัวกลางที่ทำการฆ่าเชื้อมีวิธีการทำดังนี้คือนำดินลูกรังไปอบฆ่าเชื้อในตู้อบที่อุณหภูมิ  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเก็บใส่ถังพลาสติก

ตารางที่ 3.2 วิธีทดสอบ/เครื่องมือที่ใช้ทดสอบสมบัติของตัวกลาง

| พารามิเตอร์           | วิธีทดสอบ/เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ           |
|-----------------------|---|
| ความเป็นกรด – ด่าง    | ASTM D 4972 – 01                          |
| ความชื้น              | JIS M 8812 – 1984                         |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ   | ICARDA                                    |
| ความหนาแน่น           | JIS 1474 - 1976                           |
| ความพรุน              | Phase relationship                        |
| ปริมาณเหล็กทั้งหมด    | Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) |
| ปริมาณเฟอร์รัสไอออน   | Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) |
| ปริมาณของเหล็กออกไซด์ | X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)     |

รายละเอียดการทดสอบสมบัติของดินลูกรังมีดังนี้

#### 3.3.1 ความเป็นกรด – ด่าง

นำดินลูกรัง ผสมกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ ปริมาณ 10 มิลลิลิตร แล้วทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ใช้เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง วัดค่าของสารละลาย

### 3.3.2 ความชื้น

นำดินลูกรังที่แห้งไว้ผสมผัสดับอากาศ 10 ชั่วโมง แล้วนำดินลูกรังไปอบที่อุณหภูมิ 110 ° C เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

### 3.3.3 ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

นำดินลูกรังมาเติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์มัล ปริมาณ 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดซัลฟิวริก 20 มิลลิลิตร ที่แห้งเป็นเวลา 30 นาที เจือจางด้วยน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดออกโซฟอสฟอริก 10 มิลลิลิตร ทำการหยดไดฟีนิลลามีน อินดิเคเตอร์แล้วไตเตรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตให้เปลี่ยนสีจากสีม่วงน้ำเงินเป็นสีเขียว

### 3.3.4 ความหนาแน่น

อบดินลูกรังให้แห้งที่ 110 ° C ที่แห้งให้เย็น ซึ่งกระบอกตวง (10 มิลลิลิตร) ใส่ดินลูกรังในกระบอกจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจน กระทั่งระดับดินลูกรังในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักดินลูกรังเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่จนกว่าจะได้ระดับคงที่เป็น 10 มิลลิลิตร

### 3.3.5 ความพรุน

ใส่ดินลูกรังลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่ต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับที่คงที่ตรงกับปริมาตรที่ต้องการ เติมน้ำลงในกระบอกตวงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในตัวกลาง โดยการกระแทกกันกระบอกตวงเมื่อน้ำลงไปแทนที่ช่องว่างจนถึงปริมาตรที่ต้องการแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

### 3.3.6 ปริมาณเหล็กทั้งหมด

นำดินลูกรังมาเติมกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องย่อยสลายไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส ใช้เวลาดำกว่า 5.5 นาที และช่วงอุณหภูมิ 175 – 180 ° C ใช้เวลา 4 - 5 นาที ที่ความดัน 6 บรรยากาศ ที่แห้งให้เย็น นำไปกรองแล้วปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กทั้งหมดด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (USEPA 3051)

### 3.3.7 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )

นำ 1 - 10 พีแวนโทลีน 15 กรัมเติมในน้ำปราศจากไอออน (deionized water) และเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัลจนกว่าความเป็นกรด - ด่างอยู่ที่ประมาณ 3 นำสารละลายที่ได้ 20 มิลลิลิตรไปใส่ในดินลูกรังปริมาณ 2 กรัม ปิดด้วยแผ่นพาราฟิล์มทิ้งไว้ 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำสารละลายที่ได้เข้าเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) (ICARDA, 2007)

### 3.3.8 ปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ )

ใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือที่เรียกว่า XRF ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ (X) ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อย photon ออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอน ที่ถูกปล่อยออกมากจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงาน จะมีพลังงานและความยาวคลื่นต่างกัน และเนื่องจากพลังงานของโฟตอน ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ และธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้

## 3.4 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.4.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

| พารามิเตอร์        | เครื่องมือและอุปกรณ์                    | รุ่นและขนาด                                 |
|--------------------|---|---|
| ความเป็นกรด - ด่าง | เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter) | Metrohm/ pH 0 - 14                          |
| ความชื้น           | ตุ้บและเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง     | Sartorius ba 210 s<br>Max. 200 g            |
| ความดันลด          | มาโนมิเตอร์ (Manometer)                 | Dwyer/ Series 477-3<br>Max. pressure 29 psi |
| อัตราการไหลของก๊าซ | เครื่องวัดการไหล (Flowmeter)            | Dwyer/ 0 - 10 ลิตรต่อนาที                   |

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

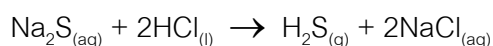
| พารามิเตอร์                           | เครื่องมือและอุปกรณ์                         | รุ่นและขนาด  |
|---------------------------------------|--|--|
| การป้อนก๊าซ                           | เครื่องบีบอากาศ<br>(Air compressor)          | Aqua/ 60 ลิตรต่อนาที                                   |
| ความเข้มข้นของ<br>ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | เครื่องวัดความเข้มข้น<br>ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | M 40 Multi – Gas<br>Monitor/ 0 – 500<br>ส่วนในล้านส่วน |

### 3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.4.2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.5 และ 1 นอร์มัล
- 3.4.2.2 โซเดียมซัลไฟด์
- 3.4.2.3 สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์มัล
- 3.4.2.4 สารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 โมลาร์
- 3.4.2.5 1 -10 พีแวนโทโรลีน
- 3.4.2.6 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- 3.4.2.7 กรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO<sub>3</sub>)
- 3.4.2.8 กรดออร์โทฟอสฟอริก (conc. H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)
- 3.4.2.9 ไดฟีนิลลามีน อินดิเคเตอร์
- 3.4.2.10 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์

### 3.5 ระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ณัฐพล รัตนมุขย์, 2549)

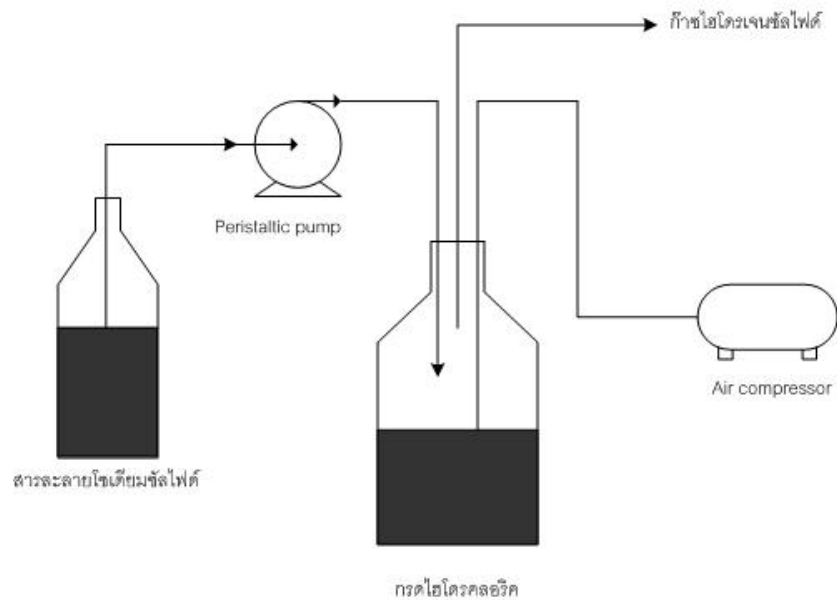
สารมลพิษที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเตรียมจากการสูบลำละลายโซเดียมซัลไฟด์โดยเครื่อง peristaltic pump ด้วยปริมาตร 1.4 มิลลิลิตรต่อนาทีไปสู่ขวดแก้วขนาด 20 ลิตรที่บรรจุกรดไฮโดรคลอริก โดยจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



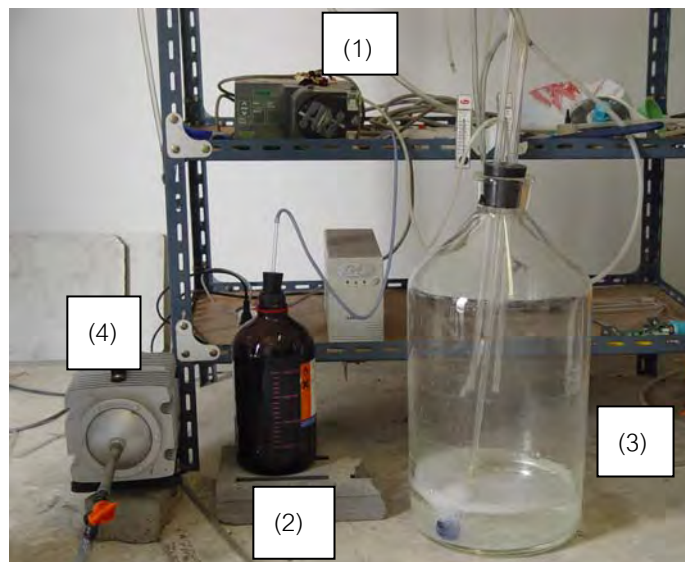
จะมีการใช้กรดไฮโดรคลอริกมากเกินไปทำให้พีเอชมีค่าต่ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปก๊าซที่ละลายในสารละลายได้ทั้งหมด การแปรรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในของเหลวเป็นก๊าซจะขึ้นกับค่าคงที่ของเฮนรี (Henry's law constant) การเป่าอากาศเป็นการพาไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อยู่ในรูปของก๊าซออกจากระบบ



ส่วนการปรับความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มหรือลดความเข้มข้นของโซเดียมซัลไฟด์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้โซเดียมซัลไฟด์ 6.27 กรัมต่อลิตร และใช้กรดไฮโดรคลอริก 0.5 นอร์มัลตลอดงานวิจัย ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์



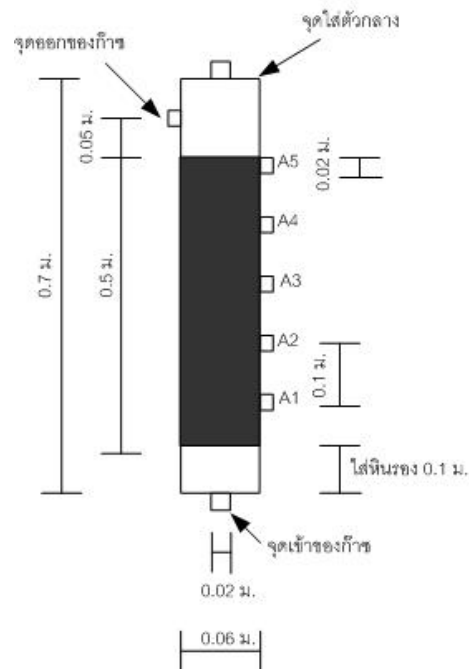
(1) เครื่อง peristaltic pump (2) สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ (3) ขวดแก้วขนาด 20 ลิตร และ (4) เครื่อง air compressor

รูปที่ 3.4 ชุดสร้างก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

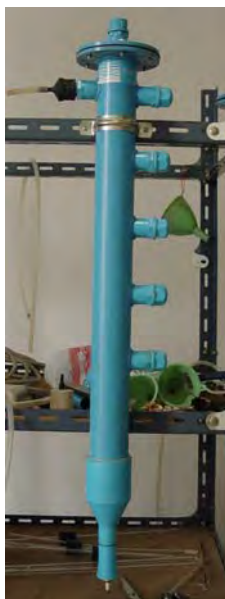
### 3.6 ชุดการทดลอง

#### 3.6.1 คอลัมน์ระดับห้องปฏิบัติการ

คอลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากวัสดุพีวีซี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.06 เมตร สูง 0.7 เมตร มีจุดเก็บตัวอย่างอากาศที่ระดับ 0.65 เมตร มีจุดเก็บตัวอย่างและจุดวัดพารามิเตอร์ทั่วไปคือความเป็นกรด – ด่าง, ความชื้น, อินทรีย์วัตถุ และความดันลดที่ระดับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร ที่ด้านล่างของคอลัมน์จะใส่หินรองสำหรับรองรับตัวกลางสูง 0.1 เมตร ซึ่งหินรองจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร โดยให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลจากด้านล่างไปสู่ด้านบนบนทุกคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขนาดคอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

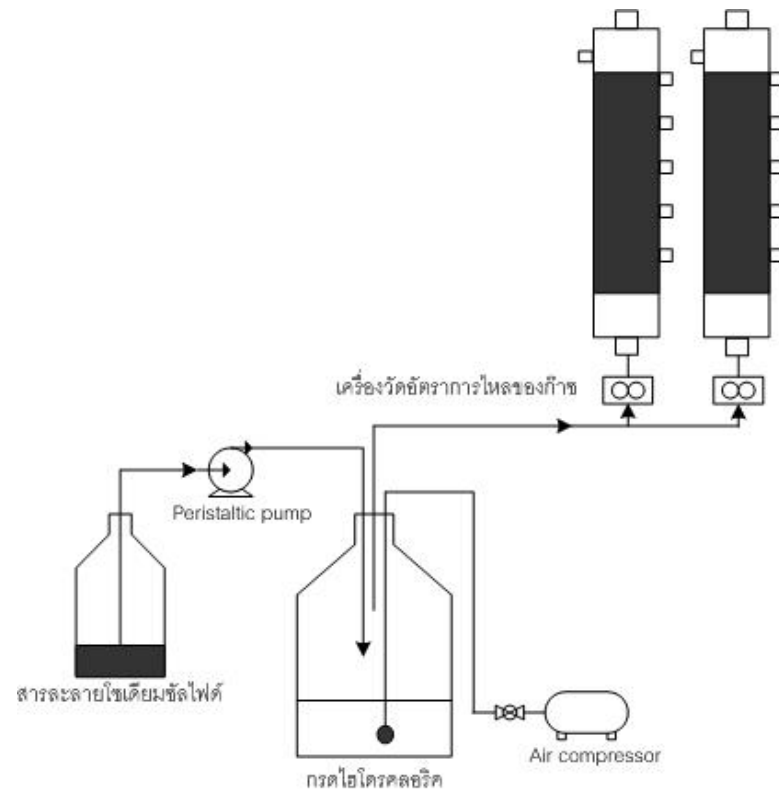


รูปที่ 3.6 คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลอง

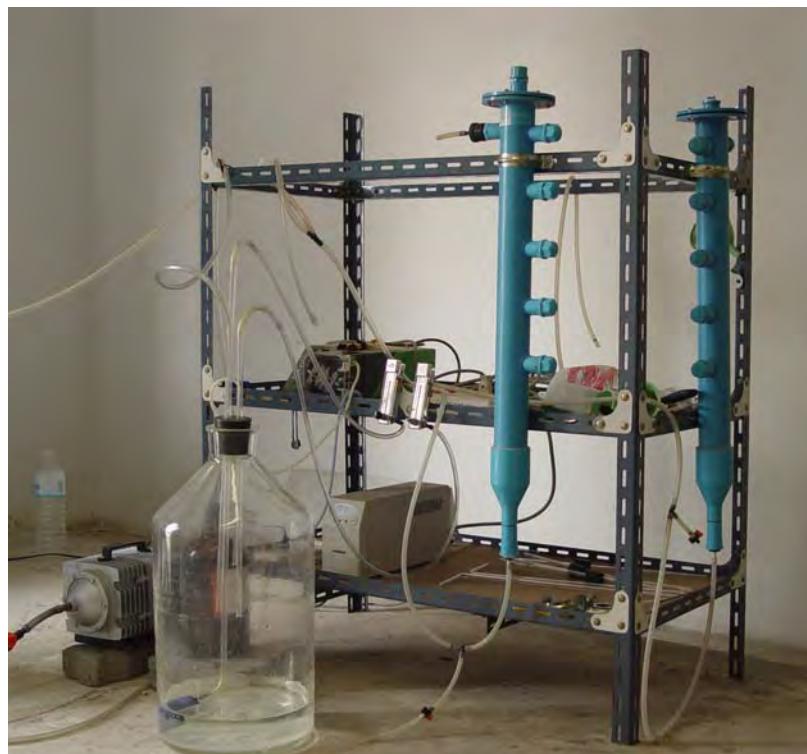
### 3.6.2 หลักการทำงานของชุดการทดลอง

หลักการการทำงานของชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เครื่อง peristaltic pump จะทำการสูบสารละลายไซโตเจนเซลล์ไฟต์ที่เตรียมไว้ (6.27 กรัมต่อลิตร) ด้วยปริมาตร 1.4 มิลลิลิตรต่อนาทีไปยังขวดที่มีกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 นอร์มัลบรรจุอยู่
2. เมื่อสารละลายไซโตเจนเซลล์ไฟต์หยดลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแล้วให้ทำการเป่าอากาศด้วยเครื่อง air compressor พองก๊าซที่เกิดขึ้นมานั้นคือก๊าซไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์
3. นำก๊าซไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์ที่ได้ไปผ่านยังเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซเพื่อให้ก๊าซที่เข้าไปยังคอลัมน์มีอัตราการไหลที่ 8 ลิตรต่อนาที รวมทั้งมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์ 50 ส่วนในล้านส่วน (0.070 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เมื่อได้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนเซลล์ไฟต์และอัตราการไหลของก๊าซที่ต้องการแล้วจึงนำเข้าสู่คอลัมน์ได้



รูปที่ 3.7 แผนผังชุดการทดลอง



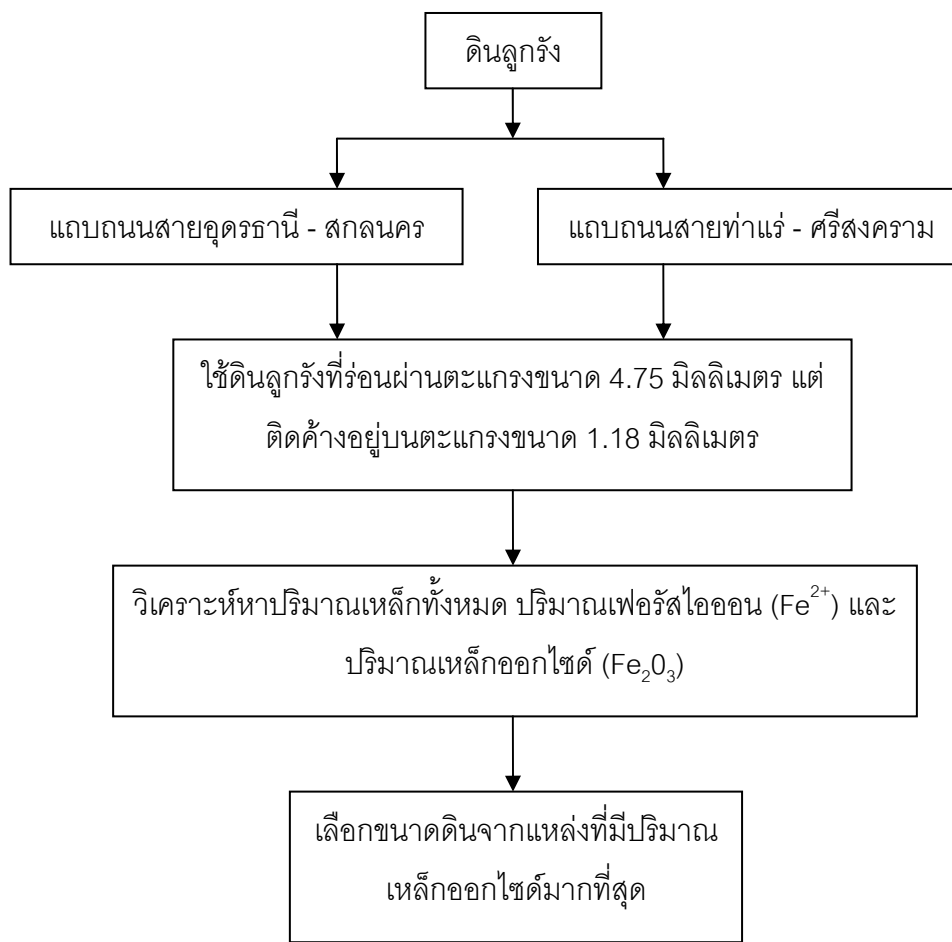
รูปที่ 3.8 ชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

### 3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

#### 3.7.1 การทดลองที่ 1 คัดแยกหาขนาดและปริมาณเหล็ก

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ในการหาปริมาณเหล็กรูปแบบต่างๆ ที่มีอยู่ในดินลูกรัง โดยดินลูกรังที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจาก 2 แหล่งคือถนนสายอุดรธานี – สกลนครและถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม มีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำดินลูกรังจากทั้ง 2 แหล่งไปตากแดดให้แห้งเพื่อง่ายต่อการร่อน
2. นำดินที่ตากแดดของทั้ง 2 แหล่งมาบดให้มีขนาดเล็กกลงแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตรแต่ติดค้างที่ขนาด 1.18 มิลลิเมตร ดังนั้นจะได้ดินที่ใช้ในงานวิจัยคือดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนครขนาด 2.36 มิลลิเมตรและขนาด 1.18 มิลลิเมตร และดินลูกรังของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงครามขนาด 2.36 มิลลิเมตรและขนาด 1.18 มิลลิเมตร
3. นำดินลูกรังขนาด 2.36 มิลลิเมตรของทั้งถนนสายอุดรธานี – สกลนครและของถนนสายท่าแร่ - ศรีสงครามไปหาปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) โดยวิธีการหาปริมาณเหล็กแบบต่างๆ สามารถดูได้ในหัวข้อที่ 3.3.6, 3.3.7 และ 3.3.8 ตามลำดับ
4. นำดินลูกรังขนาด 1.18 มิลลิเมตรของถนนสายสายอุดรธานี – สกลนครและของถนนสายท่าแร่ - ศรีสงครามไปหาปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ )
5. นำผลที่ได้ของดินลูกรังขนาด 2.36และขนาด 1.18 มิลลิเมตรของทั้งถนนสายอุดรธานี – สกลนครและถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม มาเปรียบเทียบกันแล้วทำการเลือกว่าขนาดใดและของถนนสายใดให้ปริมาณเหล็กออกไซด์มากที่สุด โดยเลือกเพียงหนึ่งขนาดจากหนึ่งแหล่งเท่านั้น



รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองที่ 1

### 3.7.2 การทดลองที่ 2 เลือกวัสดุตัวกลางที่เหมาะสม

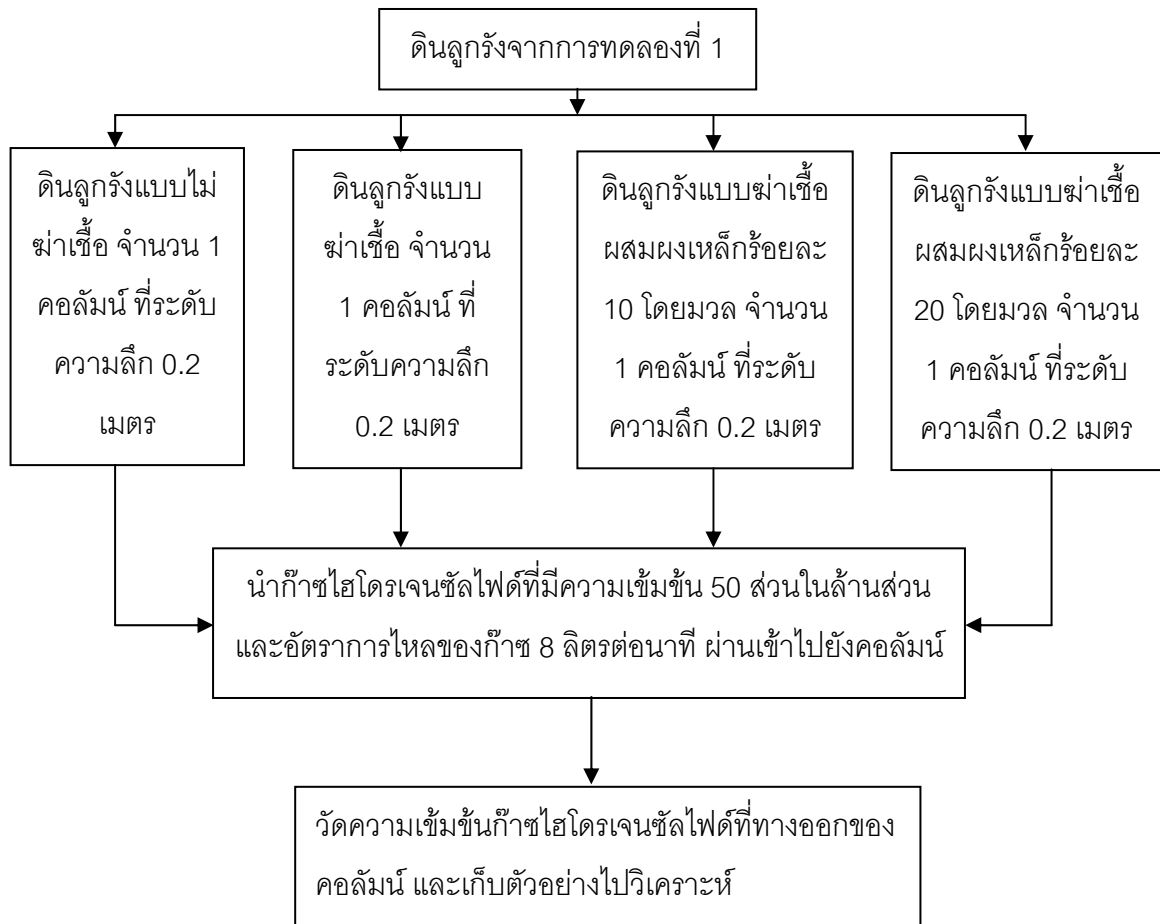
ระบบการทดลองเป็นแบบระดับห้องปฏิบัติการสำหรับการเลือกตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถแสดงแผนผังได้ในรูปที่ 3.10 ตัวกลางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ดินลูกรัง โดยการทดลองจะใช้คอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.06 เมตร สูง 0.7 เมตร ทำจากวัสดุพีวีซี ดังรูป 3.6 นำดินลูกรังที่ได้จากการทดลองที่ 1 แบ่งเป็น ดินลูกรังที่ไม่ได้ฆ่าเชื้อจำนวน 1 คอลัมน์ ดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อจำนวน 1 คอลัมน์ ดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล จำนวน 1 คอลัมน์ และดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล จำนวน 1 คอลัมน์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าทั้ง 4 คอลัมน์เท่ากันคือ 50 ส่วนในล้านส่วน (0.070 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ให้อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาที กำหนดให้ความลึกของตัวกลางเท่ากันทั้ง 4 คอลัมน์คือ 0.2 เมตร โดยระบบจะทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน วิธีการทดลองมีดังนี้

1. นำดินลูกรังจากการทดลองที่ 1 มาแบ่งเป็นดินลูกรังทั้งหมด 4 แบบคือแบบที่ 1 ดินลูกรังไม่ฆ่าเชื้อจำนวน 1 คอลัมน์ แบบที่ 2 เป็นดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อจำนวน 1 คอลัมน์ โดยวิธีการฆ่าเชื้อคือนำดินลูกรังไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 – 2 ชั่วโมง แบบที่ 3 คือดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลจำนวน 1 คอลัมน์ และแบบที่ 4 คือดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลจำนวน 1 คอลัมน์ โดยทุกคอลัมน์กำหนดที่ระดับความลึกของดินลูกรังเท่ากันคือ 0.2 เมตร

2. นำก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ได้จากระบบการผลิตก๊าซดังรูป 3.4 เข้าสู่คอลัมน์โดยให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 50 ส่วนในล้านส่วนและมีอัตราการไหลของก๊าซที่ 8 ลิตรต่อนาที

3. ทำการวัดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่จุดทางออกของคอลัมน์พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างที่จุด A1 ดังรูปที่ 3.5 มาทำการวิเคราะห์

การทดลองที่ 2 จะสิ้นสุดเมื่อความเข้มข้นที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบผลที่ได้คือความเข้มข้นที่ทางออกของแต่ละคอลัมน์เพื่อนำไปคำนวณหาความจุสูงสุดที่ตัวกลางนั้นสามารถจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไว้ได้ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นกราฟระหว่างความเข้มข้นกับเวลาและประสิทธิภาพการกำจัดกับเวลาแล้วนำผลที่ได้ไปทำการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พารามิเตอร์ที่ทำการวัดในการทดลองที่ 2 จะเหมือนกันทั้ง 4 คอลัมน์แสดงดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองที่ 2

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการทดลองที่ 2

| ตัวแปรควบคุม   | ค่าที่ทำการควบคุม  |
|--|--|
| 1. ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางเข้า                                      | 50 ส่วนในล้านส่วน  |
| 2. อัตราการไหลของก๊าซ  | 8 ลิตรต่อนาที  |
| 3. ความลึกของชั้นตัวกลาง   | 0.2 เมตร   |
| ตัวแปรที่ต้องการศึกษา  | ข้อกำหนดในการทดลอง   |
| 1. ศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัด<br>ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวกลางทั้ง 4 แบบ | จนกว่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์<br>ที่ทางเข้าระบบจะเท่ากับความเข้มข้นที่ทางออก |
| 1. ประสิทธิภาพการกำจัดในแต่ละคอลลัมน์  | ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกใน<br>แต่ละคอลลัมน์                             |

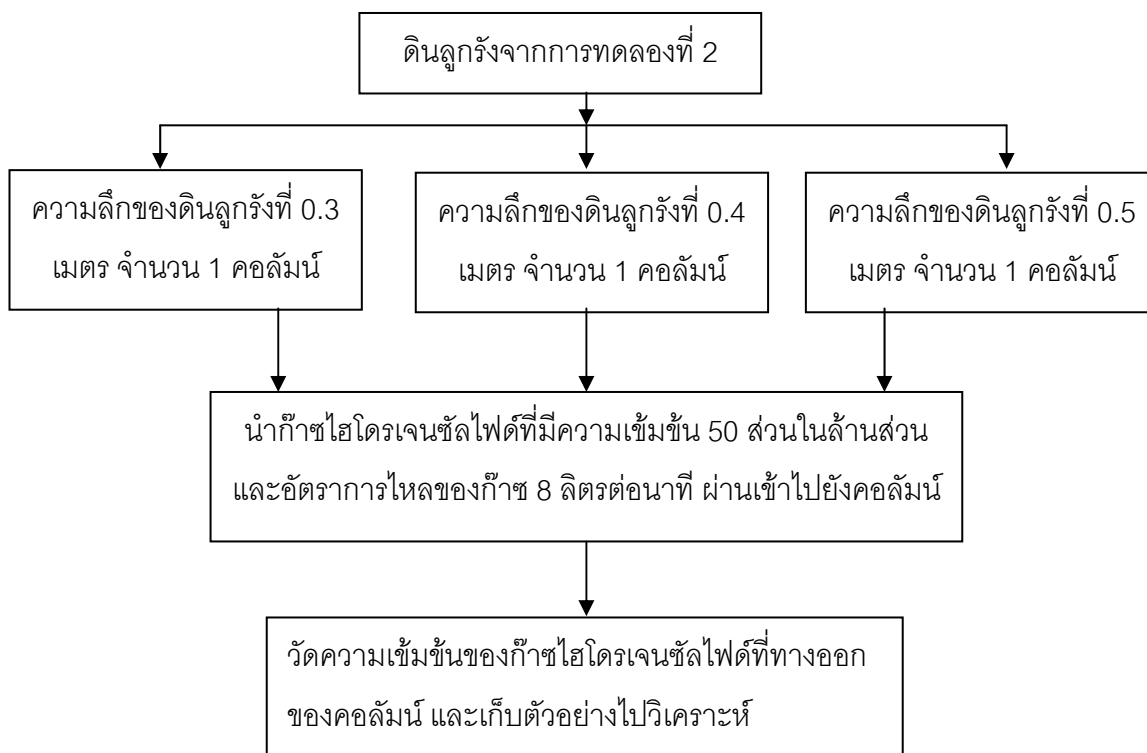


ตารางที่ 3.5 จุดเก็บตัวอย่าง ความถี่และพารามิเตอร์ที่ทำการวัดในการทดลองที่ 2

| พารามิเตอร์                    | จุดเก็บตัวอย่าง | ความถี่ในการวิเคราะห์ |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------|
| ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | จุดออกของก๊าซ   | ทุกวัน                |
| ความเป็นกรด – ด่าง             | จุด A1          | ทุก 3 วัน             |
| ความชื้น                       | จุด A1          | ทุก 3 วัน             |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ            | จุด A1          | ทุก 3 วัน             |
| ความดันลด                      | จุด A2          | ทุก 3 วัน             |
| การหลุดตัว                     | จุดใส่ตัวกลาง   | ทุก 3 วัน             |

### 3.7.3 การทดลองที่ 3 ประเมินประสิทธิภาพการกำจัดที่ทางออก ณ ความลึกของวัสดุตัวกลางหนึ่ง ๆ กับเวลา

การทดลองที่ 3 จะใช้ตัวกลางที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 มาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่แต่ละระยะความลึกของตัวกลางตามรายละเอียดการทดลองในรูปที่ 3.11 โดยมีความลึกของตัวกลางที่ 0.3 เมตรจำนวน 1 คอลัมน์ ความลึกของตัวกลางที่ 0.4 เมตรจำนวน 1 คอลัมน์ และความลึกของตัวกลางที่ 0.5 เมตรจำนวน 1 คอลัมน์ ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วน (0.070 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาที โดยระบบจะทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน การทดลองที่ 3 จะใช้เวลาเหมือนกับการทดลองที่ 2 คือจะสิ้นสุดเมื่อความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบจะเท่ากับที่ออกจากระบบ ผลที่ได้คือความเข้มข้นที่ทางออกของแต่ละระยะความลึก ณ แต่ละเวลาที่ผ่านไป จากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเป็นกราฟระหว่างความเข้มข้นทางออกกับเวลาและประสิทธิภาพการกำจัดกับเวลา โดยจุดที่เก็บตัวอย่างจะอยู่ในรูปที่ 3.5 และพารามิเตอร์ที่ทำการวัดดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.11 แผนผังการทดลองที่ 3

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองที่ 3

| ตัวแปรควบคุม   | ค่าที่ทำการควบคุม                                      |
|--|--|
| 1. ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางเข้า<br>2. อัตราการไหลของก๊าซ<br>3. ตัวกลางที่ใช้ | 50 ส่วนในล้านส่วน<br>8 ลิตรต่อนาที<br>จากการทดลองที่ 2 |
| ตัวแปรที่ต้องการศึกษา  | ค่าที่ใช้ในการทดลอง                                    |
| 1. ประสิทธิภาพการกำจัดที่แต่ละระยะความลึกของตัวกลาง                                      | 0.3, 0.4, และ 0.5 เมตร                                 |
| ตัวแปรตาม  | พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์                                |
| 1. ประสิทธิภาพในการกำจัดในแต่ละคอลัมน์   | ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทางออกในแต่ละคอลัมน์  |

ตารางที่ 3.7 จุดเก็บตัวอย่างและพารามิเตอร์ที่ทำการวัดในการทดลองที่ 3

| พารามิเตอร์                    | จุดเก็บตัวอย่าง       | ความถี่ในการวิเคราะห์ |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ที่ระยะความลึก 0.3 เมตร        |                       |                       |
| ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | จุดออกของก๊าซ         | ทุกวัน                |
| ความเป็นกรด – ด่าง             | จุด A1 และ A2         | ทุก 3 วัน             |
| ความชื้น                       | จุด A1 และ A2         | ทุก 3 วัน             |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ            | จุด A1 และ A2         | ทุก 3 วัน             |
| ความดันลด                      | จุด A3                | ทุก 3 วัน             |
| การหลุดตัว                     | จุดใส่ตัวกลาง         | ทุก 3 วัน             |
| ที่ระยะความลึก 0.4 เมตร        |                       |                       |
| ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | จุดออกของก๊าซ         | ทุกวัน                |
| ความเป็นกรด – ด่าง             | จุด A1 A2 และ A3      | ทุก 3 วัน             |
| ความชื้น                       | จุด A1 A2 และ A3      | ทุก 3 วัน             |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ            | จุด A1 A2 และ A3      | ทุก 3 วัน             |
| ความดันลด                      | จุด A4                | ทุก 3 วัน             |
| การหลุดตัว                     | จุดใส่ตัวกลาง         | ทุก 3 วัน             |
| ที่ระยะความลึก 0.5 เมตร        |                       |                       |
| ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ | จุดออกของก๊าซ         | ทุกวัน                |
| ความเป็นกรด – ด่าง             | จุด A1, A2, A3 และ A4 | ทุก 3 วัน             |
| ความชื้น                       | จุด A1, A2, A3 และ A4 | ทุก 3 วัน             |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ            | จุด A1, A2, A3 และ A4 | ทุก 3 วัน             |
| ความดันลด                      | จุด A5                | ทุก 3 วัน             |
| การหลุดตัว                     | จุดใส่ตัวกลาง         | ทุก 3 วัน             |

### 3.8 การวิเคราะห์พารามิเตอร์

พารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ในการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง

| พารามิเตอร์        | วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ |
|--------------------|--------------------------------------|
| ความเป็นกรด - ด่าง | ASTM D 4972 - 01                     |
| ความชื้น           | JIS M 8812 - 1984                    |
| อินทรีย์วัตถุ      | ICARDA                               |
| ความดันลด          | มาโนมิเตอร์                          |
| การหลุดตัว         | ตลับเมตร                             |

### 3.9 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบ

#### 3.9.1 ภาระบรรทุก

ค่าภาระบรรทุก (Mass loading , กรัมต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลางต่อชั่วโมง) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบต่อปริมาตรของตัวกลาง

$$\text{ภาระบรรทุก} = \frac{Q \times C_{in}}{V}$$

โดยที่  $C_{in}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$V$  = ปริมาตรของตัวกลาง (ลูกบาศก์เมตร)

$Q$  = อัตราการไหลของก๊าซ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

#### 3.9.2 ประสิทธิภาพการกำจัด

ประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency, ร้อยละ) แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารมลพิษที่เข้าระบบ

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

โดยที่  $C_{in}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$C_{out}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$V$  = ปริมาตรตัวกลาง (ลูกบาศก์เมตร)

### 3.9.3 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง

เป็นการหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัม) กับมวลของตัวกลาง (กรัม)

$$\text{ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง} = \frac{Q \times (C_{in} - C_{out})}{M} \times T$$

โดยที่  $Q$  = อัตราการไหลของก๊าซ (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)

$C_{in}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$C_{out}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบ (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$M$  = มวลของตัวกลาง (กรัม)

$T$  = เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (ชั่วโมง)

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 สมบัติของตัวกลาง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุที่นำมาใช้เป็นตัวกลางคือ ดินลูกรัง ซึ่งดินลูกรังที่นำมาใช้ในงานวิจัยมาจากประเทศไทย โดยมาจาก 2 แหล่งคือแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม เมื่อได้ดินลูกรังจากแต่ละแหล่งมาแล้วให้นำดินลูกรังทั้งหมดไปตากแดดจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 4.75 มิลลิเมตรแต่ติดค้างที่ขนาด 1.18 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้ขนาดดินที่ใช้ในงานวิจัยคือขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร เมื่อนำไปทดสอบสมบัติจะได้ผลการทดสอบดังตาราง 4.1 – ตาราง 4.4



(ก) ขนาด 2.36 มิลลิเมตร



(ข) ขนาด 1.18 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.1 ดินลูกรังแถบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร (ก) และ (ข)



(ค) ขนาด 2.36 มิลลิเมตร



(ง) ขนาด 1.18 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.2 ดินลูกรังแถบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม (ค) และ (ง)

ตารางที่ 4.1 สมบัติตัวกลางของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| พารามิเตอร์         | หน่วย                    | จำนวน<br>ตัวอย่าง | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------|
| ความเป็นกรด – ด่าง  | -                        | 3                 | 5.77      | 0.04                     |
| ความชื้น            | ร้อยละ                   | 3                 | 1.14      | 0.007                    |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ | ร้อยละ                   | 3                 | 0.12      | 0.01                     |
| ความหนาแน่น         | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร | 3                 | 1.41      | 0.001                    |
| ความพรุน            | ร้อยละ                   | 3                 | 51.07     | 0.01                     |

ตารางที่ 4.2 สมบัติตัวกลางของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| พารามิเตอร์         | หน่วย                    | จำนวน<br>ตัวอย่าง | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------|
| ความเป็นกรด – ค่า   | -                        | 3                 | 5.74      | 0.03                     |
| ความชื้น            | ร้อยละ                   | 3                 | 1.03      | 0.014                    |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ | ร้อยละ                   | 3                 | 0.11      | 0.01                     |
| ความหนาแน่น         | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร | 3                 | 1.47      | 0.002                    |
| ความพรุน            | ร้อยละ                   | 3                 | 53.38     | 0.02                     |

ตารางที่ 4.3 สมบัติตัวกลางของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงครามที่ขนาดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| พารามิเตอร์         | หน่วย                    | จำนวน<br>ตัวอย่าง | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------|
| ความเป็นกรด – ค่า   | -                        | 3                 | 5.62      | 0.02                     |
| ความชื้น            | ร้อยละ                   | 3                 | 1.05      | 0.001                    |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ | ร้อยละ                   | 3                 | 0.38      | 0.007                    |
| ความหนาแน่น         | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร | 3                 | 1.29      | 0.000                    |
| ความพรุน            | ร้อยละ                   | 3                 | 44.72     | 0.11                     |



ตารางที่ 4.4 สมบัติตัวกลางของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงครามที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| พารามิเตอร์         | หน่วย                    | จำนวน<br>ตัวอย่าง | ค่าเฉลี่ย | ส่วนเบี่ยงเบน<br>มาตรฐาน |
|---------------------|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------|
| ความเป็นกรด – ด่าง  | -                        | 3                 | 5.62      | 0.03                     |
| ความชื้น            | ร้อยละ                   | 3                 | 0.96      | 0.005                    |
| ปริมาณอินทรีย์วัตถุ | ร้อยละ                   | 3                 | 0.28      | 0.011                    |
| ความหนาแน่น         | กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร | 3                 | 1.35      | 0.005                    |
| ความพรุน            | ร้อยละ                   | 3                 | 46.62     | 0.02                     |

#### 4.1.1 ความเป็นกรด – ด่าง

เป็นการวัดความเป็นกรด – ด่างของดิน โดยดินประกอบด้วยพันธุ์พืช (plant roots) และจุลินทรีย์ ซึ่งความเป็นกรด – ด่างมีผลโดยตรงต่อสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อดิน ดินที่มีความเป็นกลางจะมีค่าความเป็นกรด – ด่างประมาณ 7 ส่วนดินที่มีความเป็นกรดจะมีค่าความเป็นกรด – ด่างต่ำกว่า 7 และดินที่มีความเป็นด่างจะมีค่าความเป็นกรด – ด่างมากกว่า 7 ซึ่งค่าความเป็นกรด – ด่างของดินสามารถเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ความเป็นกรด – ด่างของดิน

| ค่าความเป็นกรด – ด่าง | คำอธิบาย    |
|-----------------------|-------------|
| มากกว่า 5.5           | กรดแก่      |
| 5.5 – 5.9             | กรดปานกลาง  |
| 6.0 – 6.4             | กรดอ่อน     |
| 6.5 – 6.9             | กรดอ่อนมาก  |
| 7.0                   | กลาง        |
| 7.1 – 7.5             | ด่างอ่อนมาก |
| 7.6 – 8.0             | ด่างอ่อน    |
| 8.1 – 8.5             | ด่างปานกลาง |
| มากกว่า 8.5           | ด่างแก่     |

จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพบว่าดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.74 และ 5.77 ตามลำดับ แสดงว่าดินทั้ง 2 ขนาดมีค่าความเป็นกรด – ด่างอยู่ในช่วงที่มีความเป็นกรดปานกลาง ส่วนดินลูกรังของถนนสาย ท่าแร่ – ศรีสงครามที่ขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.62 และ 5.62 ตามลำดับ แสดงว่าดินทั้ง 2 ขนาดมีค่าความเป็นกรด – ด่างอยู่ในช่วงที่มีความเป็นกรดปานกลาง

#### 4.1.2 ความชื้น

ความชื้นเป็นพารามิเตอร์ที่ช่วยให้เกิดการดูดซับธาตุอาหารไว้สำหรับให้จุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิต โดยความชื้นตัวกลางที่เหมาะสมจะมีค่าประมาณร้อยละ 20 – 60 (Mcnevin และ Barford, 2000) ผลการวิเคราะห์พบว่าดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร และถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีความชื้นเท่ากับร้อยละ 1.03, 1.14, 0.96 และ 1.05 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความชื้นที่ต่ำมาก

#### 4.1.3 อินทรีย์วัตถุ (Organic matter)

ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวกลางควรมีมากกว่าร้อยละ 55 ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตัวกลางมีความจำเป็นสำหรับระบบชีวภาพที่ทำงานไม่ต่อเนื่องหรือหยุดในบางช่วงเวลา โดยปกติแล้วในระบบตัวกลางชีวภาพ จุลินทรีย์จะใช้สารมลพิษเป็นแหล่งพลังงานหากระบบหยุดทำงานในบางช่วงจุลินทรีย์จึงใช้สารอินทรีย์ในตัวกลางแทน (Leson และ Winer, 1991) ผลการวิเคราะห์พบว่า ดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร และถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 – 0.4 ซึ่งน้อยมาก

#### 4.1.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาการออกแบบโครงสร้างรองรับตัวกลาง เนื่องจากถ้ามีความหนาแน่นมากจะทำให้โครงสร้างต้องรองรับน้ำหนักตัวกลางที่สูงขึ้นด้วย (ณัฐพล รัตนมุขย์, 2549) ผลการวิเคราะห์พบว่า ดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร และถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 1.3 – 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 4.1.5 ความพรุน

ความพรุนเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของการกระจายอากาศ และความดันลดที่ผ่านชั้นของตัวกลาง ความพรุนสำหรับชั้นตัวกลางเช่น ดินควรอยู่ในช่วงร้อยละ 40 – 50 (Mcnevin และ Barford, 2000) วัสดุที่มีความพรุนสูงจะทำให้มีการกระจายตัวของอากาศได้ดี ผลการวิเคราะห์ที่ตัวกลางพบว่า ดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร และถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีความพรุนเท่ากับร้อยละ 53.37, 51.07, 46.61 และ 44.71 ตามลำดับ ดังนั้นตัวกลางจากทั้ง 2 แหล่งและ 2 ขนาดจึงมีความพรุนที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุตัวกลางได้

#### 4.2 ผลการศึกษาการหาปริมาณเหล็กในแต่ละขนาด

ในงานวิจัยนี้มีตัวกลางคือ ดินลูกรัง มาจาก 2 แหล่งคือ แอบถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และแอบถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม โดยได้ทำการศึกษาหาปริมาณเหล็กจากดินลูกรังขนาด 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร แล้วนำแต่ละขนาดไปหาปริมาณเหล็กที่ต้องการคือปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) แล้วทำการเลือกดินลูกรังจากแหล่งที่มีขนาดของดินลูกรังที่ให้ปริมาณเหล็กออกไซด์มากที่สุด ปริมาณเหล็กแบบต่างๆ จากทั้ง 2 แหล่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณเหล็กของถนนสายอุดรธานี – สกลนครและถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม

| พารามิเตอร์   | ถนนสายอุดรธานี – สกลนคร |           | ถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม |           |
|---|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
|   | ขนาดดิน                 | ขนาดดิน   | ขนาดดิน                  | ขนาดดิน   |
|   | 2.36                    | 1.18      | 2.36                     | 1.18      |
|   | มิลลิเมตร               | มิลลิเมตร | มิลลิเมตร                | มิลลิเมตร |
| ปริมาณเหล็กทั้งหมด<br>(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)                | 6,511                   | 5,664     | 4,891                    | 2,665     |
| ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )<br>(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) | 16.92                   | 10.75     | 4.55                     | 4.41      |
| ปริมาณเหล็กออกไซด์<br>( $Fe_2O_3$ )<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก)   | 65.95                   | 33.35     | 26.07                    | 18.01     |

จากตาราง 4.6 พบว่า ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตรของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย เนื่องจากมีปริมาณเหล็กออกไซด์อยู่มาก

#### 4.3 ผลการศึกษาตัวกลางที่เหมาะสม

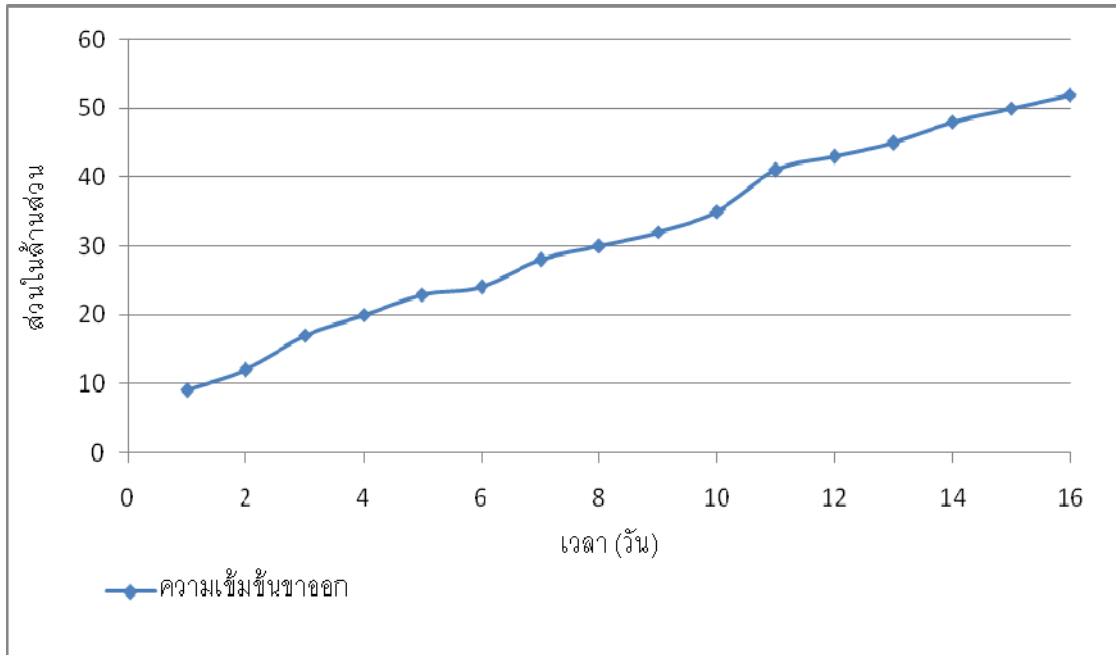
การทดลองนี้เพื่อศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยนำดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนครที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตรมาใช้ในการทดลองนี้ คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีอยู่ 2 คอลัมน์ ส่วนตัวกลางที่ใช้คือดินลูกรังมีทั้งหมด 4 แบบคือ แบบที่ 1 เป็นดินลูกรังที่ไม่ฆ่าเชื้อ แบบที่ 2 คือดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อ แบบที่ 3 คือดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และแบบที่ 4 คือดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วน (0.07 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาทีเท่ากันตลอดการทดลอง กำหนดให้ระดับความลึกของดินลูกรังเท่ากันคือ 0.2 เมตร ส่วนเวลาในการเดินระบบการทดลองจะใช้เวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน การทดลองนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อความเข้มข้นที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบ โดยดินลูกรังแบบที่ 1, 2, 3 และ 4 จะใช้เวลาในการที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบคือ 16, 18, 26 และ 32 วัน ตามลำดับ

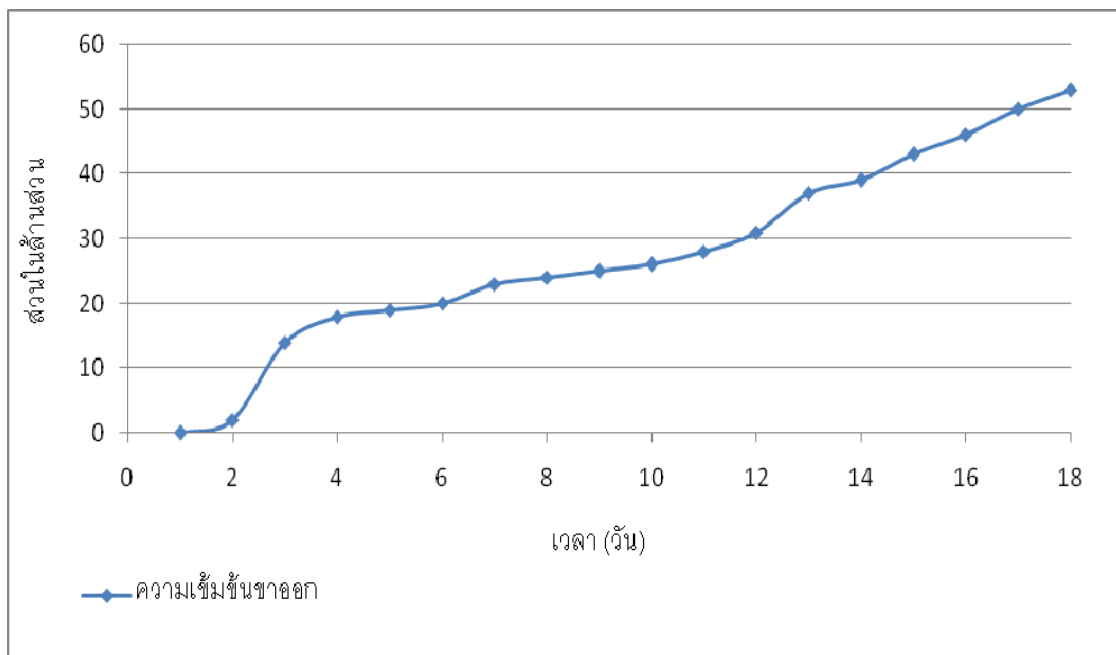
#### 4.3.1 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลา

รูปที่ 4.3 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ พบว่าตัวกลางไม่สามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เนื่องจากเมื่อระบบเริ่มเดินเพียงในวันที่ 1 ของการเดินระบบ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ไหลทะลุผ่านชั้นของตัวกลางเลยซึ่งอาจเกิดจากการที่อัตราการไหลของก๊าซมีค่ามากเกินไปทำให้ไหลทะลุผ่านชั้นตัวกลางอย่างรวดเร็วหรือความสามารถของตัวกลางที่ไม่สามารถจับกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ เมื่อการเดินระบบผ่านไป 16 วันความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบจะเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบ

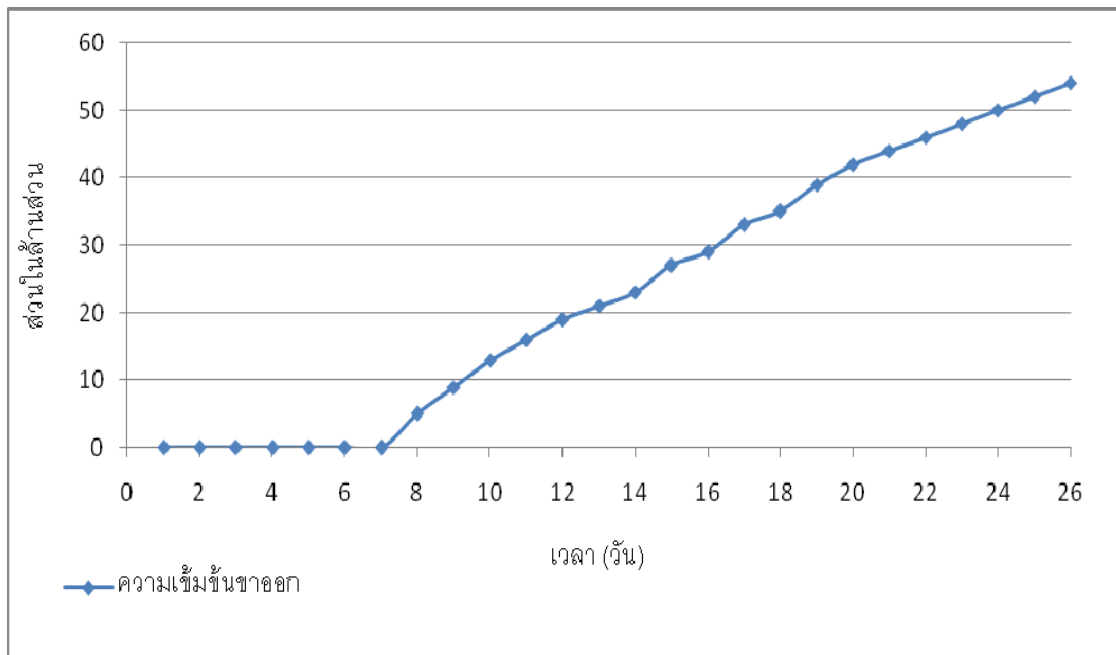
รูปที่ 4.4 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ พบว่าตัวกลางสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยในวันที่ 1 ของการเดินระบบสามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ซึ่งมีความเข้มข้นขาออกที่ 0 ส่วนในล้านส่วน ตั้งแต่วันที่ 2 ของการเดินระบบความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เริ่มไหลทะลุผ่านชั้นตัวกลางมีความเข้มข้นขาออกที่ 2 ส่วนในล้านส่วน และเมื่อการเดินระบบผ่านไป 18 วัน ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบจะเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบ



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบไม่ผ่าเชื้อ



รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบผ่าเชื้อ

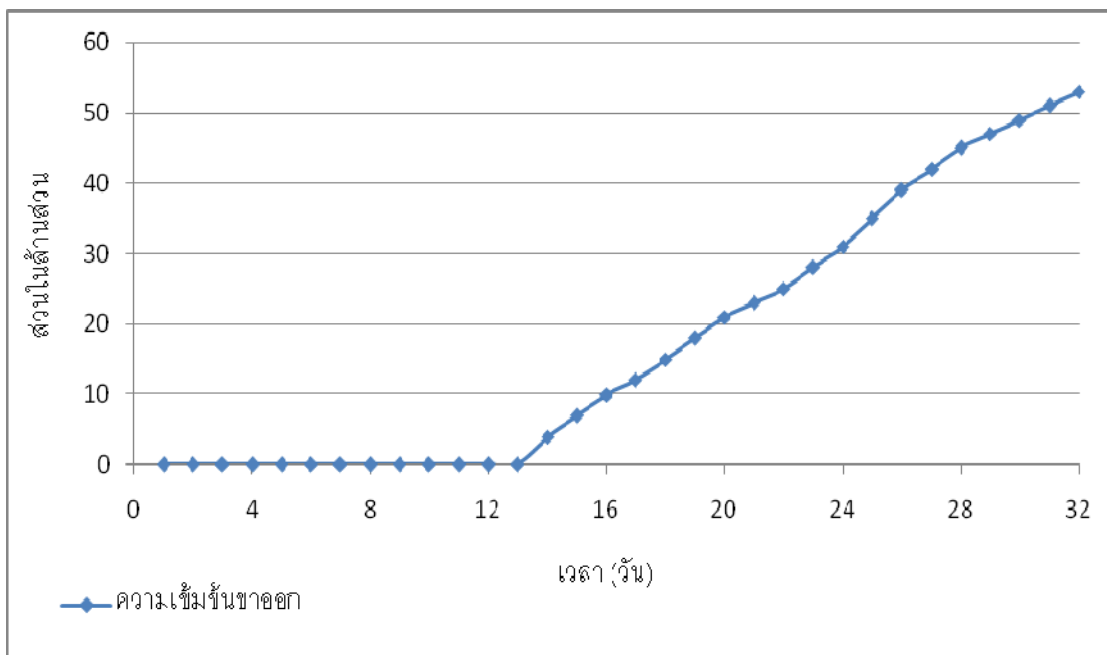


รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก ร้อยละ 10 โดยมวล

รูปที่ 4.5 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล พบว่าตัวกลางสามารถจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ซึ่งอาจเกิดจากผงเหล็กที่ผสมลงไป ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบที่ 0 ส่วนในล้านส่วนจะใช้เวลา 7 วันของการเดินระบบ และในวันที่ 8 ของการเดินระบบจะเริ่มมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลทะลุออกมา

รูปที่ 4.6 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล พบว่าตัวกลางสามารถจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ประมาณ 2 เท่าของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล กล่าวคือมีช่วงเวลาที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบที่ 0 ส่วนในล้านส่วนคือ 13 วัน และในวันที่ 14 ของการเดินระบบจึงเริ่มมีความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลทะลุออกมา





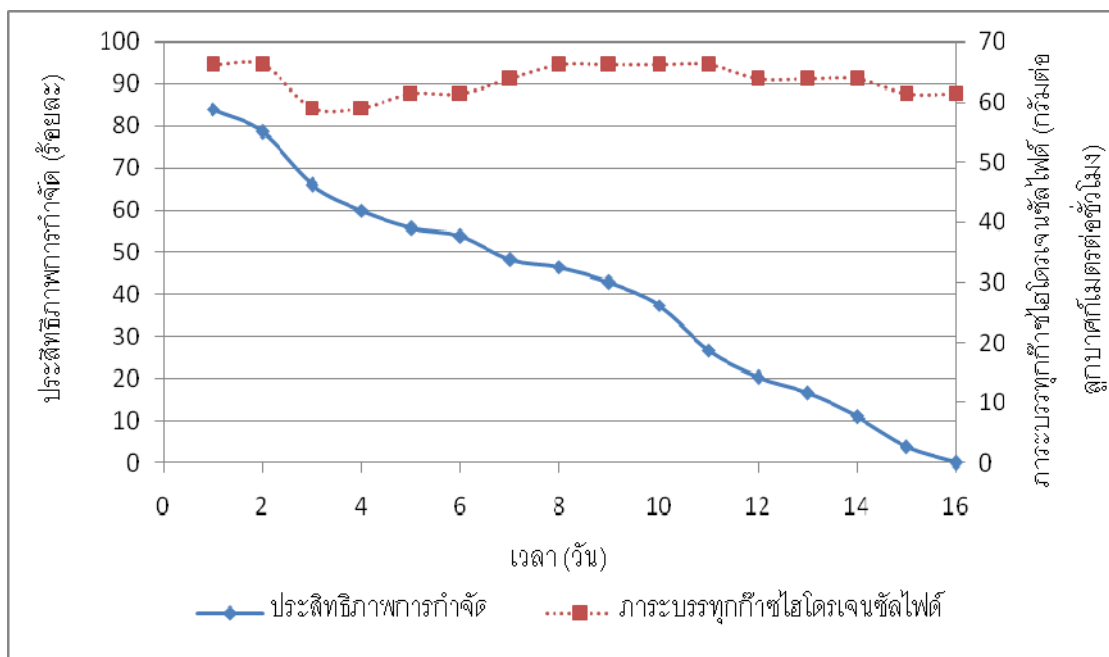
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก ร้อยละ 20 โดยมวล

จากข้อมูลข้างต้นสามารถกล่าวสรุปได้ว่า ตัวกลางคือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กมีความสามารถในการจับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและแบบฆ่าเชื้อ เนื่องจากความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เริ่มออกจากระบบจะใช้เวลา นานกว่า โดยตัวกลางที่ใช้เวลานานที่สุดคือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลคือ 14 วัน ส่วนตัวกลางที่ใช้เวลากว่าที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เริ่มออกจากระบบเร็วที่สุดคือดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ เนื่องจากมีความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากระบบภายในวันแรกของการทดลอง

#### 4.3.2 อิทธิพลของภาระบรรทุกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

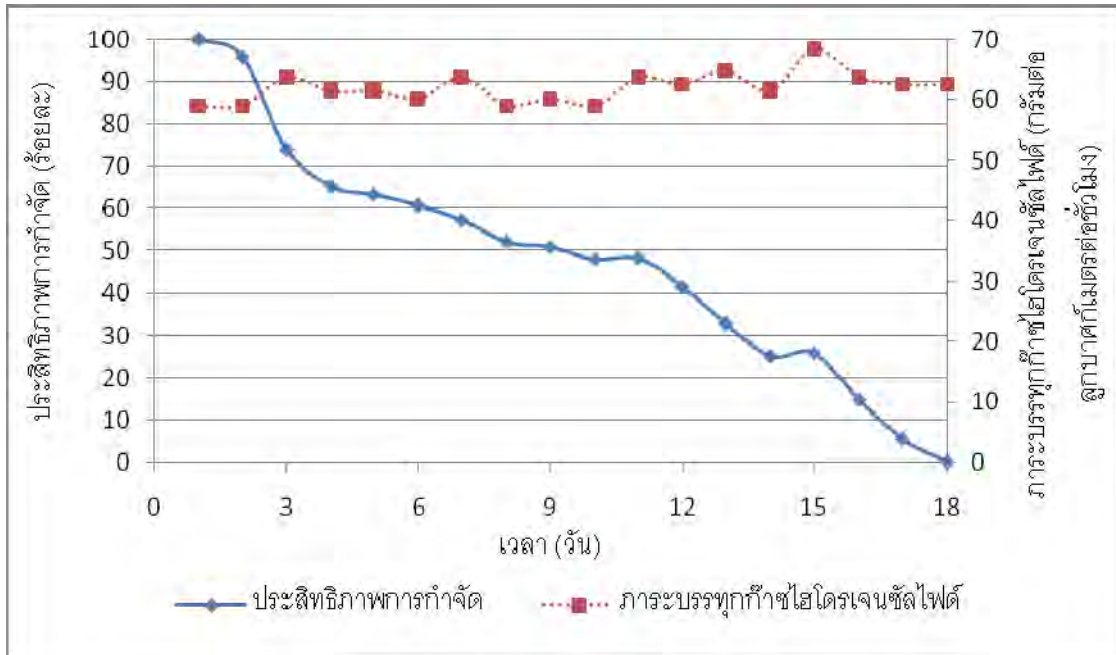
รูปที่ 4.7 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาระบรรทุกของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 จะใช้เวลาทั้งหมด 16 วัน ส่วนช่วงเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดที่อยู่ในช่วงร้อยละ 100 ของตัว

กลางดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อนั้นไม่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงว่าคุณสมบัติของตัวกลางอย่างเหล็กออกไซด์ในดินลูกรังไม่สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ ค่าภาวะบรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (16 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $63.48 \pm 2.57$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรของตัวกลางต่อชั่วโมง การคำนวณค่าภาวะบรทุกและประสิทธิภาพการกำจัดในหัวข้อ 3.9.1 และ 3.9.2 ตามลำดับ

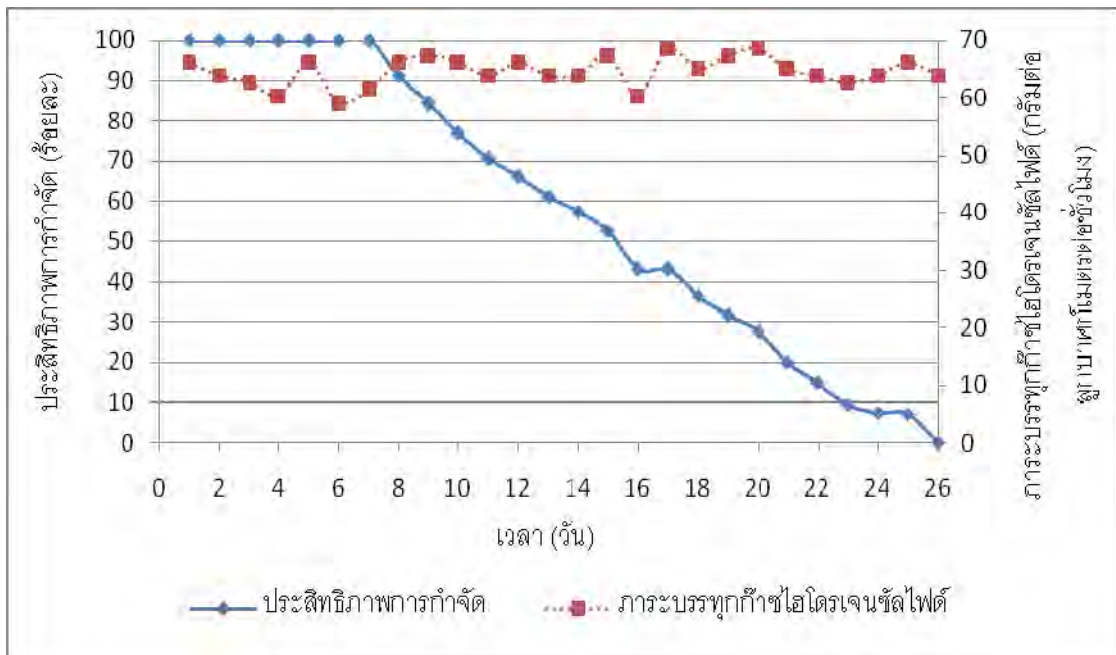


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรทุกของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ

รูปที่ 4.8 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาวะบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 18 วัน โดยช่วงเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดที่อยู่ในช่วงร้อยละ 100 คือ 1 วัน ค่าภาวะบรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (18 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $62.07 \pm 2.50$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ

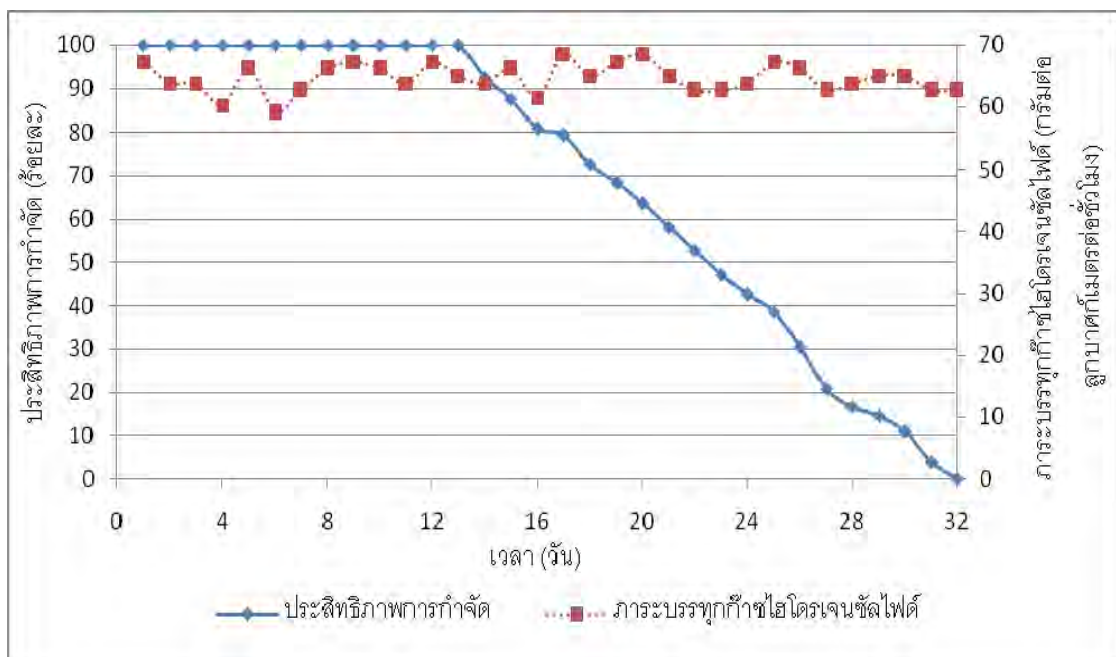


รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าการบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อที่ผสมผงเหล็กร้อยละ

10 โดยมวล

รูปที่ 4.9 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาระบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 26 วัน ช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 7 วัน ส่วนค่าภาระบรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (26 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $64.54 \pm 2.52$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.10 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาระบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 32 วัน ช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 13 วัน ส่วนค่าภาระบรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (32 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $64.62 \pm 2.33$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง

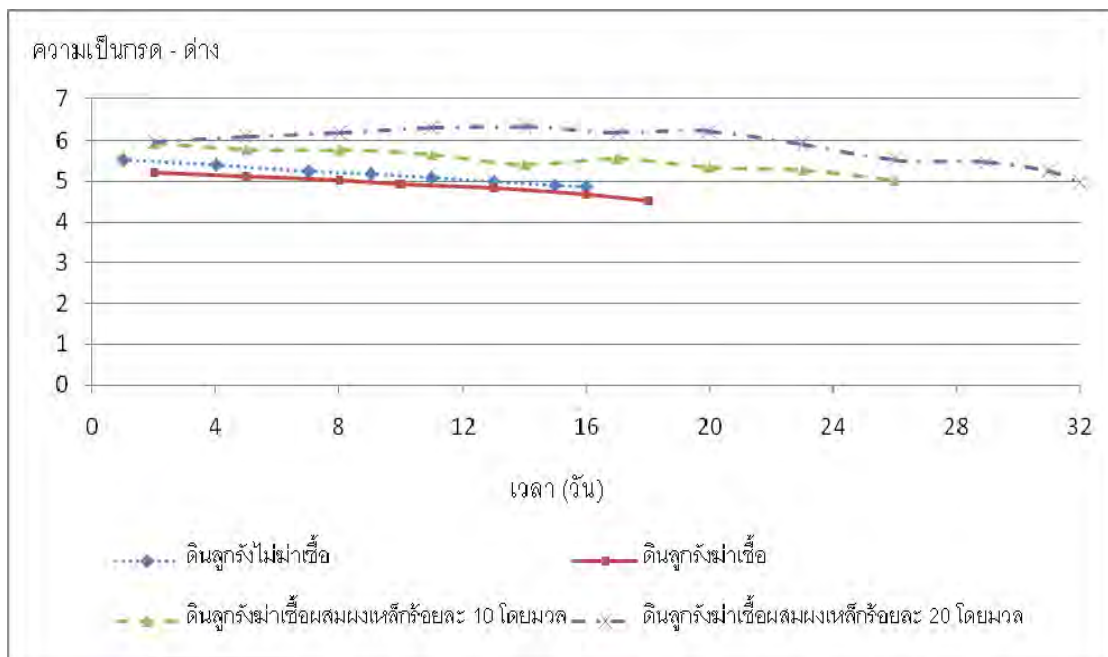


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาระบรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนี้ สามารถกล่าวสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัด ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความลึกและค่าภาระบรรทุกทุกอย่าง นั้นจะขึ้นกับชนิดของตัวกลาง ซึ่ง ตัวกลางอย่างดินลูกรังที่ผสมผงเหล็กจะมีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่า ดินลูกรังที่ไม่ได้ผสมผงเหล็ก โดยตัวกลางที่ผสมผงเหล็กในปริมาณที่มากขึ้นจะมีประสิทธิภาพการ กำจัดที่มากขึ้นด้วย ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และร้อยละ 20 โดยมวล จะมีช่วงเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ 7 และ 13 วัน ตามลำดับ ซึ่งมี ประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 2 เท่านั่นเอง

#### 4.3.3 ความเป็นกรด – ด่าง

ค่าความเป็นกรด – ด่างที่อยู่ในช่วง 6 – 8 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ที่ใช้ ในการเจริญเติบโต (Devanny และคณะ, 1999) ในการเก็บดินลูกรังทั้ง 4 แบบนำไปวิเคราะห์หาค่า ความเป็นกรด – ด่างนั้นจะเก็บทุกๆ 3 วันซึ่งจะเก็บที่จุด 0.1 เมตรของคอลัมน์ ซึ่งค่าความเป็นกรด – ด่างที่ได้จะมีค่าความเป็นกรด – ด่างค่อยๆ ลดลงไปเป็นกรด โดยดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อเริ่มต้นมี ค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.53 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 16 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่าง เท่ากับ 4.87 ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.21 เมื่อสิ้นสุดการ ทดลองที่เวลา 18 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 4.53 ส่วนดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก ร้อยละ 10 โดยมวลเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.94 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 26 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.03 และดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.97 เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 32 วันมีค่า ความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 4.94 ดังแสดงในรูป 4.11



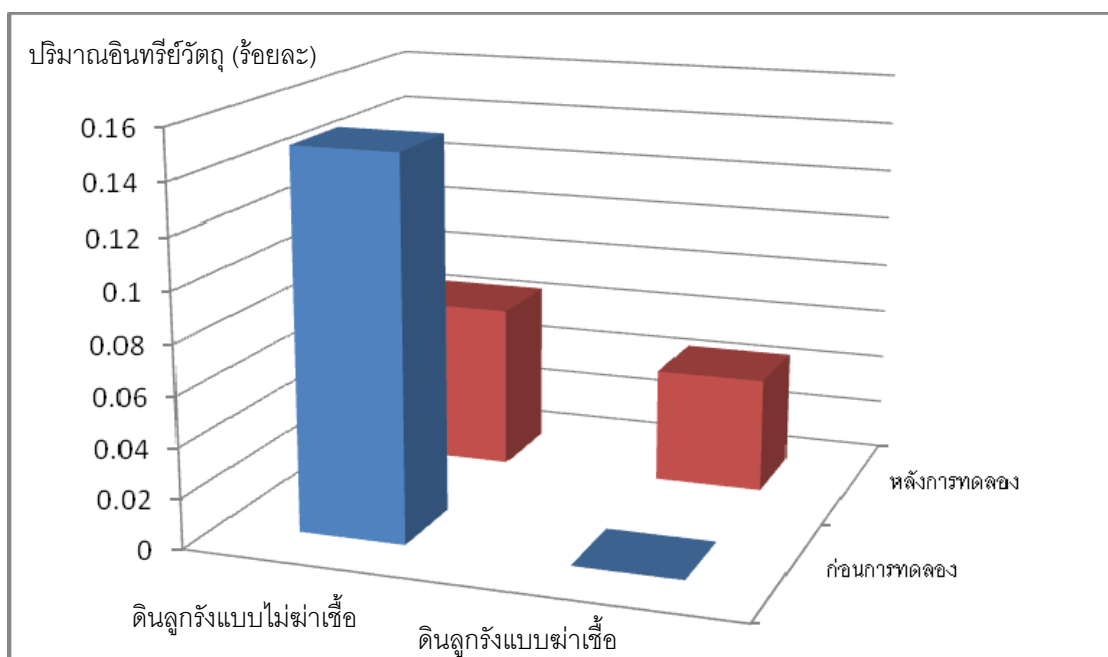
รูปที่ 4.11 ค่าความเป็นกรด - ต่างของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ

จากผลที่ได้สามารถกล่าวสรุปได้ว่า ตัวกลางที่ใช้เวลาในการเดินระบบเป็นเวลานานจะยิ่งทำให้มีค่าความเป็นกรด - ต่างลดต่ำลงโดยเกิดจากการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์กับความชื้น อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรด - ต่างเริ่มต้นก็มีความสำคัญกับค่าความเป็นกรด - ต่างสุดท้ายด้วย

#### 4.3.4 อินทรีย์วัตถุ

อินทรีย์วัตถุประกอบด้วยซากพืชซากสัตว์ และจุลินทรีย์ในดินในขั้นตอนการย่อยสลาย ซึ่งเมื่อการย่อยสลายสมบูรณ์แล้วจะเรียกว่า ฮิวมัส (NRCS, 2008) โดยจะเกี่ยวข้องกับธาตุอาหารสำรอง, การกักเก็บความชื้น และกิจกรรมทางชีวภาพ (biological activity) (ICARDA, 2000) โดยปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อจะมีค่าเริ่มต้นจากร้อยละ 0.15 ลดลงมาเป็นร้อยละ 0.06 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (16 วัน) ในดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อมีค่าเริ่มต้นจากร้อยละ 0 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.04 เมื่อเวลาผ่านไป 18 วัน (จบการทดลอง) ซึ่งเพิ่มขึ้นน้อยมาก ส่วนในดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลและดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ

20 โดยมีผล ไม่ได้นำมาคิดหาปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินเนื่องจากปริมาณอินทรีย์ที่น้อยมากเกินกว่าจะมีอิทธิพลในการกำจัดได้ อินทรีย์วัตถุเป็นปัจจัยสำคัญในเครื่องกรองชีวภาพแต่เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ใช่จึงไม่ให้ความสำคัญมากเท่าใดนัก จึงเป็นการหาไว้เพื่อพัฒนาการของอินทรีย์วัตถุที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบเท่านั้น



รูปที่ 4.12 ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ

#### 4.3.5 ความดันลดและการทрудตัว

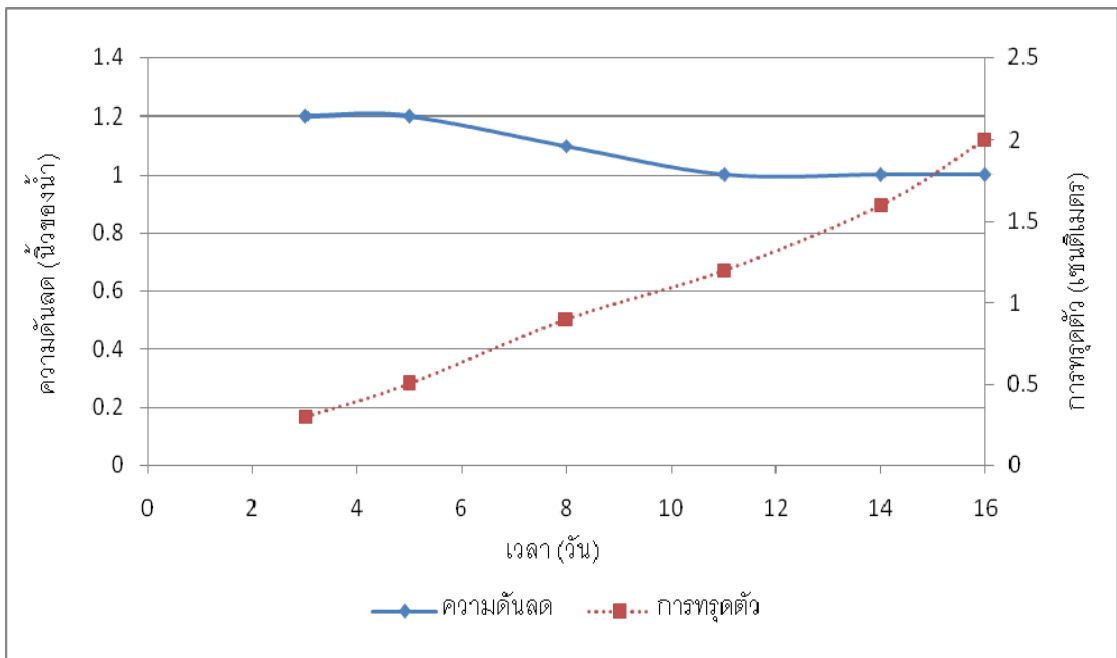
ความดันลดเป็นตัวชี้วัดถึงการสูญเสียความดันของอากาศที่เข้าระบบ ถ้าในระบบมีค่าความดันลดสูงจะทำให้เครื่องปั๊มอากาศต้องการพลังงานมากขึ้นและเป็นผลให้อากาศไหลทะลุผ่านตัวกลางได้ ความดันลดเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความชื้นในตัวกลางและความพรุนของตัวกลาง ถ้าความชื้นมากและมีความพรุนน้อยเป็นผลให้มีค่าความดันลดมาก (Anit และ Artuz, 1999)

รูปที่ 4.13 – 4.14 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและการทрудตัวของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ ตามลำดับ พบว่าเมื่อการทрудตัวของตัวกลางมาก

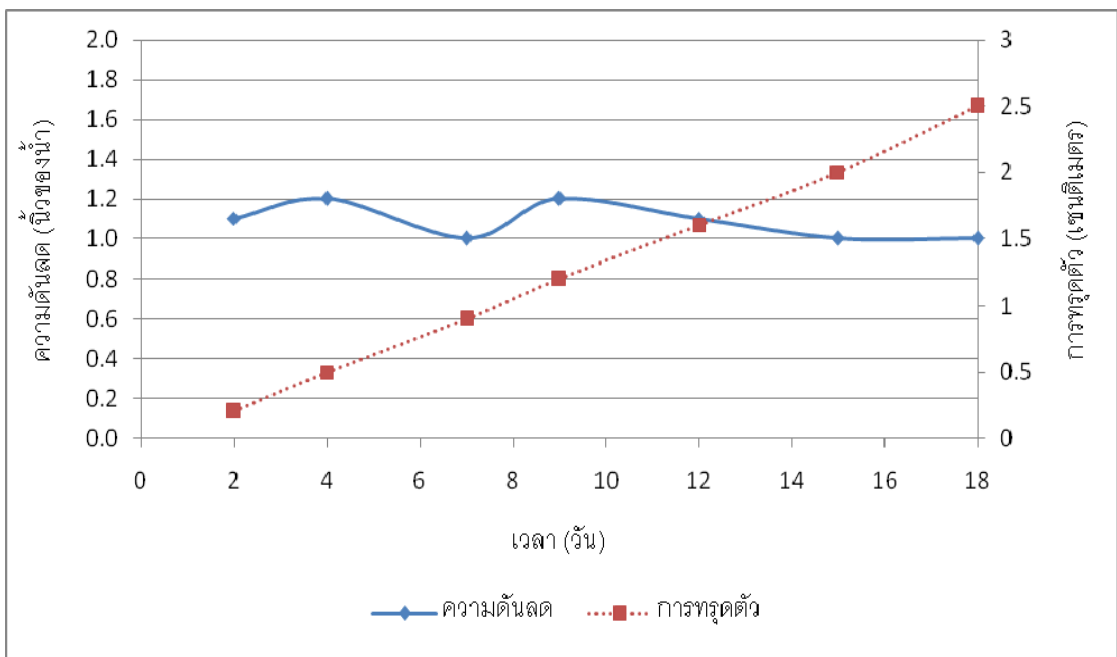
ขึ้นแต่ความดันลดกลับลดลงซึ่งอาจเกิดจากการที่ดินลูกรังไม่จับตัวกันเป็นก้อนมีการทรุดตัวและอัดตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้อากาศสามารถไหลทะลุผ่านช่องว่างของดินลูกรังบางส่วนได้สะดวก ดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อมีค่าความดันลดและการทรุดตัวหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 16 วันคือ 1.0 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.0 \pm 0.1$  นิ้วของน้ำและ 2.0 เซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการทรุดตัว 0.12 เซนติเมตรต่อวัน ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อมีค่าความดันลดและการทรุดตัวหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 18 วันคือ 1.0 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.1 \pm 0.1$  นิ้วของน้ำและ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการทรุดตัว 0.14 เซนติเมตรต่อวัน

รูปที่ 4.15 – 4.16 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลและดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ตามลำดับ พบว่าเมื่อการทรุดตัวของตัวกลางมีมากขึ้นค่าความดันลดมีค่ามากขึ้นด้วย ซึ่งอาจเกิดจากการที่ผงเหล็กและดินลูกรังมีการคลุกเคล้าทั่วกันและรวมตัวกันด้วยความชื้นอย่างทั่วถึงกัน ทำให้อากาศไม่สามารถไหลผ่านได้อย่างสะดวกดังนั้นค่าความดันลดจึงเพิ่มขึ้นสำหรับดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลมีค่าความดันลดและการทรุดตัวหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 26 วันคือ 1.1 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.0 \pm 0.1$  นิ้วของน้ำและ 3.7 เซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการทรุดตัว 0.14 เซนติเมตรต่อวัน และดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลมีค่าความดันลดและการทรุดตัวหลังจากเดินระบบเป็นเวลา 32 วันคือ 1.2 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $0.9 \pm 0.3$  นิ้วของน้ำและ 4.7 เซนติเมตร ตามลำดับ คิดเป็นอัตราการทรุดตัว 0.15 เซนติเมตรต่อวัน

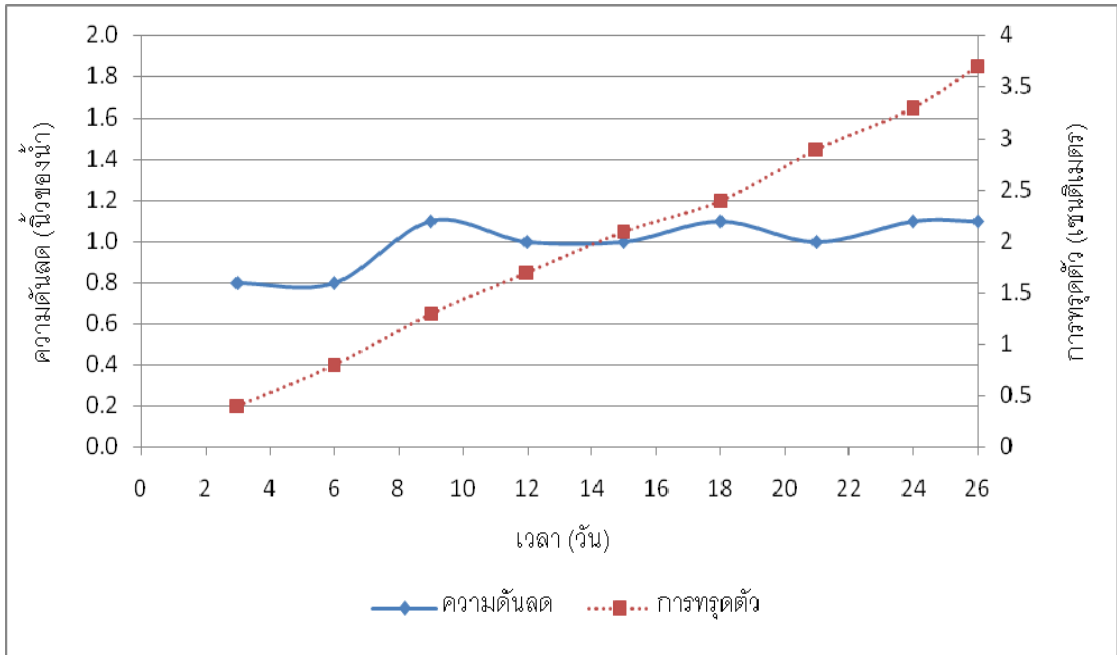




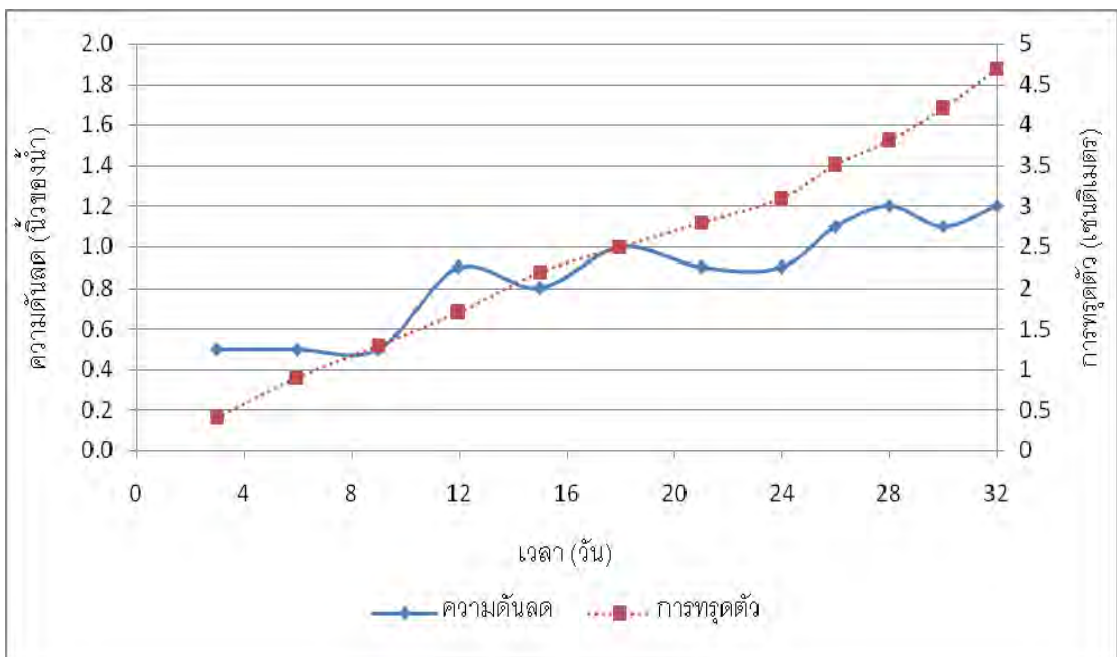
รูปที่ 4.13 ความชื้นดินและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบไม่พำเชื้อ



รูปที่ 4.14 ความชื้นดินและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบพำเชื้อ



รูปที่ 4.15 ความชื้นดินและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล



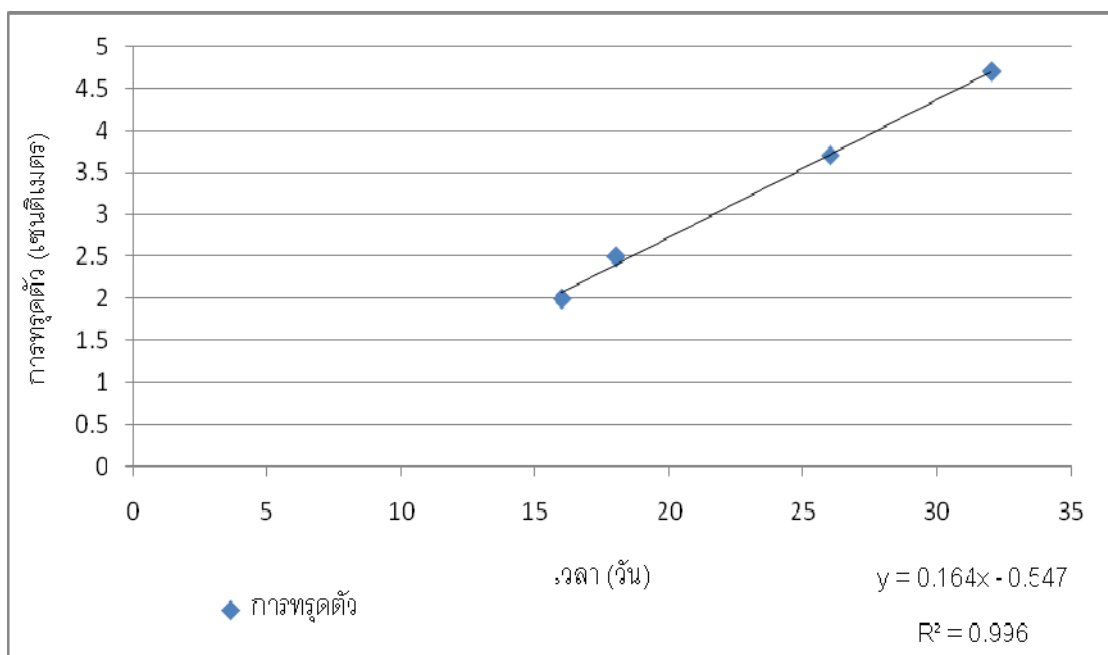
รูปที่ 4.16 ความชื้นดินและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

จากข้อมูลที่กล่าวไปข้างต้นสามารถสรุปได้ดังตาราง 4.7 โดยความดันลดจะขึ้นกับลักษณะของตัวกลางกล่าวคือ ถ้าตัวกลางมีวัสดุเคลือบผิวและรวมตัวกันด้วยความชื้น (อย่างผงเหล็ก) จะทำให้ก๊าซที่ไหลผ่านเข้าคอลัมน์ไหลเข้าไม่สะดวก เป็นเหตุให้มีความดันเกิดขึ้นมากในคอลัมน์ทำให้ค่าความดันลดที่ได้สูงขึ้น ส่วนตัวกลางที่ไม่รวมตัวกันด้วยความชื้นค่าความดันลดที่ได้จะมีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากก๊าซที่ไหลผ่านเข้าคอลัมน์สามารถไหลผ่านได้อย่างสะดวก

สำหรับค่าการหลุดตัวสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงได้ โดยค่าการหลุดตัวนั้นเมื่อการเดินระบบยิ่งระบบเดินนานเท่าใด ค่าการหลุดตัวจะเพิ่มมากขึ้นและจะเพิ่มในอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกันดังรูป 4.17

ตารางที่ 4.7 ค่าความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ

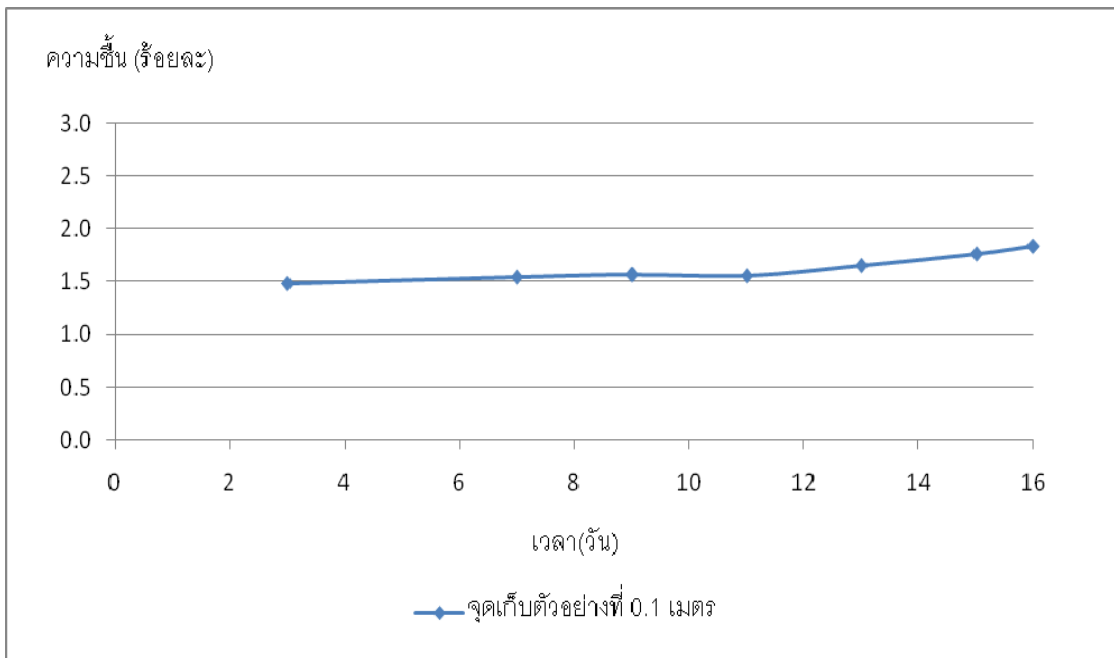
| ดินลูกรัง<br>แบบที่ | ระยะเวลา<br>(วัน) | ความดันลด<br>สุดท้าย<br>(นิ้วของน้ำ) | ความดันลด<br>เฉลี่ย<br>(นิ้วของน้ำ) | การหลุดตัวสุดท้าย<br>(เซนติเมตร) | อัตราการหลุดตัว<br>(เซนติเมตรต่อวัน) |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| 1                   | 16                | 1.0                                  | $1.0 \pm 0.1$                       | 2                                | 0.12                                 |
| 2                   | 18                | 1.0                                  | $1.1 \pm 0.1$                       | 2.5                              | 0.14                                 |
| 3                   | 26                | 1.1                                  | $1.0 \pm 0.1$                       | 3.7                              | 0.14                                 |
| 4                   | 32                | 1.2                                  | $0.9 \pm 0.3$                       | 4.7                              | 0.15                                 |



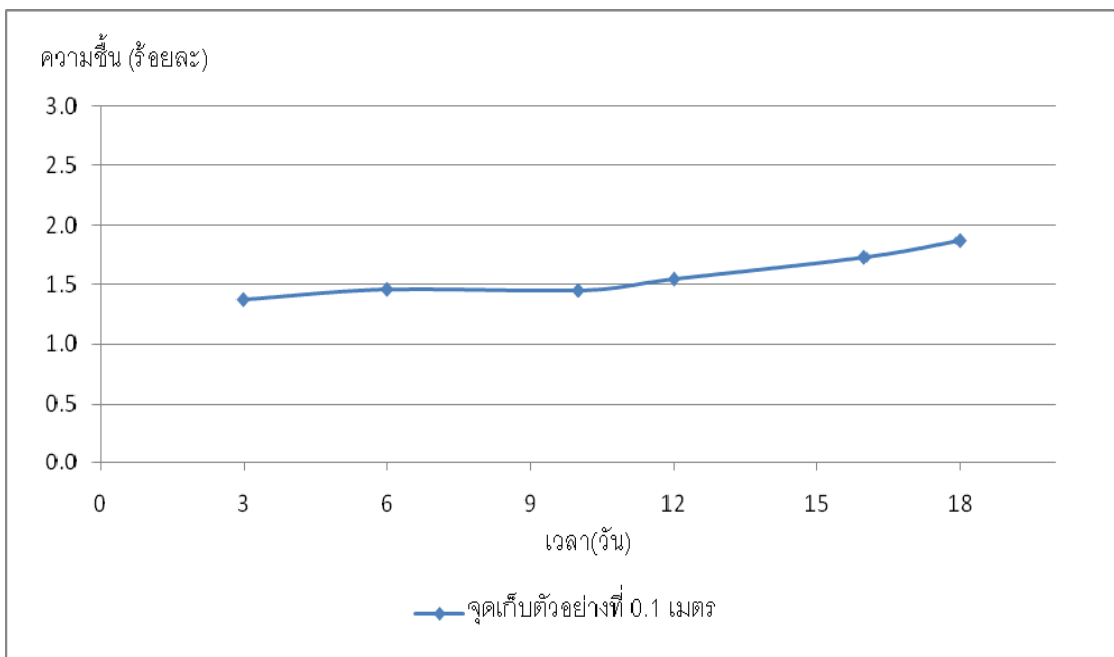
รูปที่ 4.17 สมการเส้นตรงสำหรับค่าการทรดตัวของการทดลองที่ 2

#### 4.3.6 ความชื้น

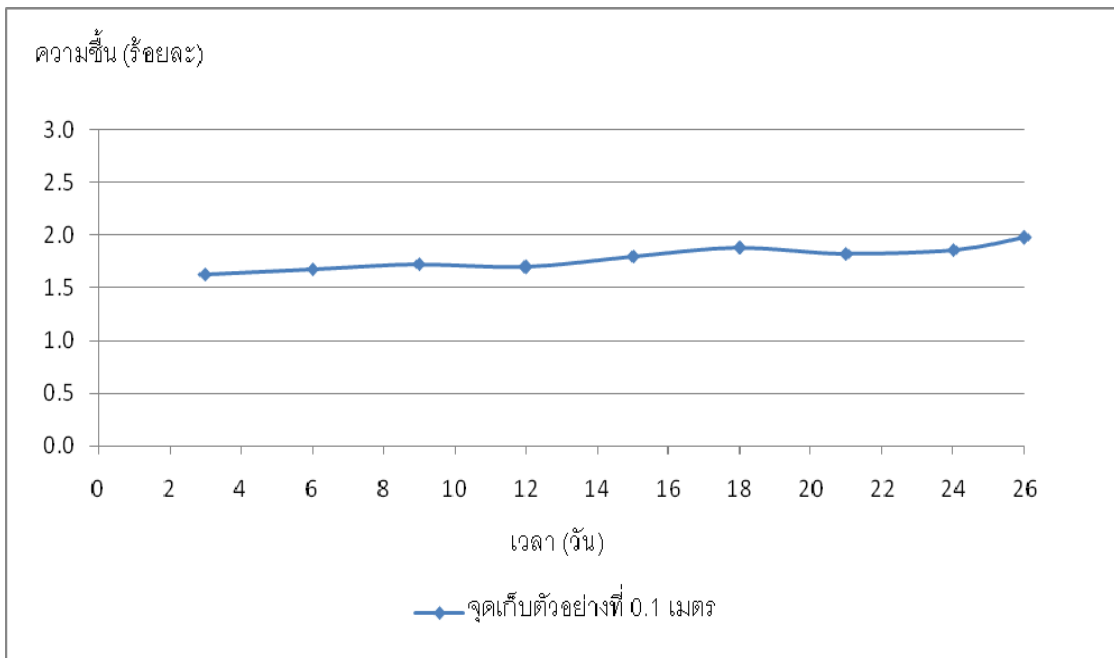
ค่าความชื้นของดินลูกรังทั้ง 4 แบบหลังเสร็จสิ้นระบบจะมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นการผลิตจากของเหลวแล้วใช้ลมเป่านำก๊าซและไอน้ำออกมาทำให้มีความชื้นในดินลูกรังเพิ่มขึ้น โดยดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อมีค่าความชื้นจากร้อยละ 1.48 เพิ่มเป็นร้อยละ 1.84 เมื่อระบบสิ้นสุดเป็นเวลา 16 วันคิดเป็นอัตราการเพิ่มร้อยละ 0.02 ต่อวัน ดังรูป 4.18 ในดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ เมื่อระบบสิ้นสุดเป็นเวลา 18 วันมีค่าความชื้นจากร้อยละ 1.37 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1.87 คิดเป็นอัตราการเพิ่มร้อยละ 0.03 ต่อวันดังรูป 4.19 ส่วนดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมีผลเมื่อระบบสิ้นสุดเป็นเวลา 26 วันมีค่าความชื้นจากร้อยละ 1.63 เพิ่มเป็นร้อยละ 1.98 คิดเป็นร้อยละ 0.01 ต่อวันดังรูป 4.20 และดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีผลเมื่อระบบสิ้นสุดเป็นเวลา 32 วันค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.66 เป็นร้อยละ 1.98 คิดเป็นร้อยละ 0.01 ต่อวันดังรูป 4.21



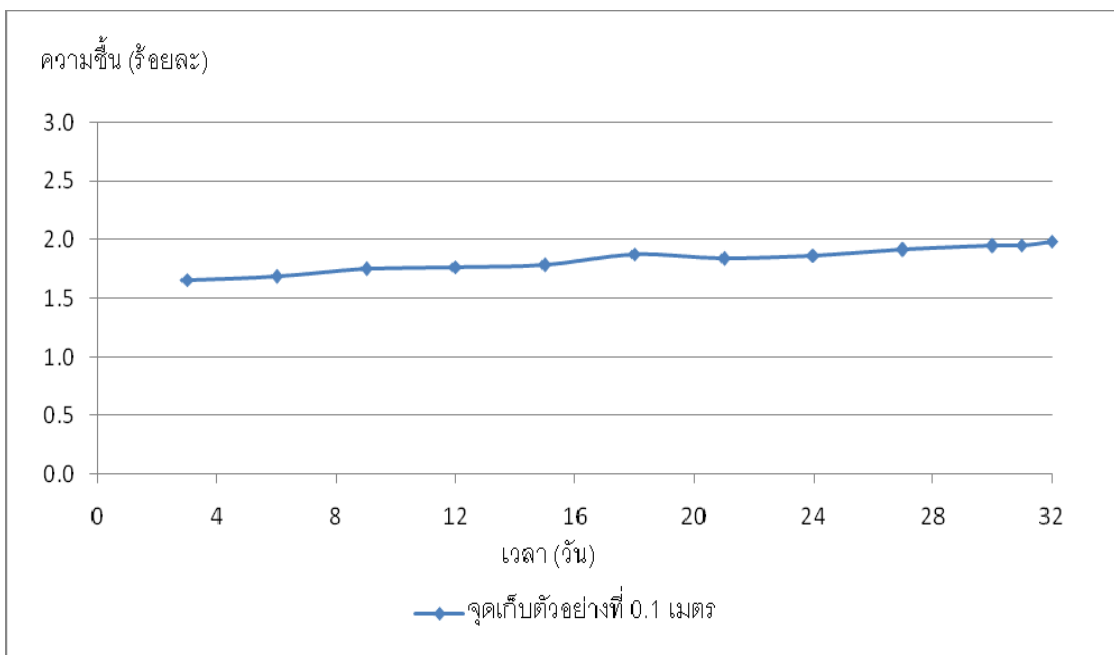
รูปที่ 4.18 ความชื้นของดินปลูกไร้แบบไม่ผ่าเชื้อ



รูปที่ 4.19 ความชื้นของดินปลูกไร้แบบผ่าเชื้อ



รูปที่ 4.20 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล



รูปที่ 4.21 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

จากข้อมูลที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถกล่าวสรุปได้ดังตาราง 4.8 ซึ่งอัตราการเพิ่มของความชื้นในดินลูกรังแต่ละแบบจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ไม่มากนัก

ตารางที่ 4.8 ค่าความชื้นของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ

| ดินลูกรัง<br>แบบที่ | ระยะเวลา<br>(วัน) | ความชื้นเริ่มต้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นสุดท้าย<br>(ร้อยละ) | อัตราการเพิ่มของความชื้น<br>(ร้อยละต่อวัน) |
|---------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| 1                   | 16                | 1.48                         | 1.84                        | 0.02                                       |
| 2                   | 18                | 1.37                         | 1.87                        | 0.03                                       |
| 3                   | 26                | 1.63                         | 1.98                        | 0.01                                       |
| 4                   | 32                | 1.66                         | 1.98                        | 0.01                                       |

#### 4.3.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีตัวกลางคือ ดินลูกรังอยู่ 4 แบบได้แก่ แบบที่ 1 ดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ แบบที่ 2 ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ แบบที่ 3 ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และแบบที่ 4 ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ในการทดลองนี้จะกำหนดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อ นาที โดยตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบสามารถสรุปได้จากตาราง 4.9

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังทั้ง 4 แบบ

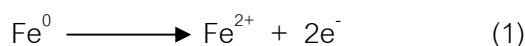
| พารามิเตอร์   | ดินแบบที่ 1     | ดินแบบที่ 2     | ดินแบบที่ 3     | ดินแบบที่ 4     |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัด<br>ร้อยละ 100 (วัน)  | 0               | 1               | 7               | 13              |
| ช่วงเวลาที่ใช้ทั้งหมดที่ทำให้ความ<br>เข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้า<br>ระบบเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจาก<br>ระบบ (วัน) | 16              | 18              | 26              | 32              |
| ภาวะบรรทุกเฉลี่ยตลอดการทดลอง<br>(กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อ<br>ชั่วโมง)  | 63.48 ±<br>2.57 | 62.07 ±<br>2.50 | 64.54 ±<br>2.52 | 64.62 ±<br>2.33 |
| ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับ<br>ได้ต่อปริมาณตัวกลาง<br>(มิลลิกรัมต่อกรัม)   | 1.90            | 2.75            | 5.01            | 7.34            |
| ปริมาณซัลเฟอร์ที่ถูกจับสะสม<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก)   | 0.34            | 0.51            | 5.18            | 7.95            |

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ช่วงเวลาที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบ เท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อกับแบบฆ่าเชื้อมีระยะเวลาใกล้เคียงกันคือ 16 และ 18 วัน ตามลำดับ และช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 ของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและแบบฆ่าเชื้อ คือ 0 และ 1 วัน ตามลำดับ แสดงว่าช่วงของการดูดซับ หรือการเกิดของ mass transfer zone ไม่มี ซึ่งช่วงของการดูดซับจะขึ้นกับอัตราเร็วของการดูดซับ และอัตราการไหลที่เข้าสู่คอลัมน์ (Vernon , 1990) ดังนั้นอาจเกิดจากการที่อัตราการไหลเข้าระบบ



ที่มากเกินไปทำให้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทะลุผ่านไปอย่างรวดเร็ว หรืออาจเกิดจากเหล็กออกไซด์ที่มีอยู่ในดินลูกรังอาจไม่เพียงพอที่จะกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

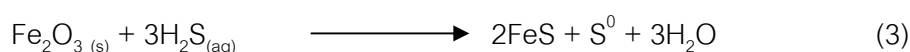
ช่วงเวลาที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล คือ 26 และ 32 วัน ตามลำดับ และช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 ของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล คือ 7 และ 13 วัน ตามลำดับ แสดงว่าช่วงของการดูดซับได้เกิดขึ้นในคอลัมน์ โดยอาจเกิดจากการที่ผสมผงเหล็กลงไปดินลูกรัง เนื่องจากเมื่อผงเหล็กมีความชื้นจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะกลายเป็นเหล็กเฟอร์ไรต์ และอิเล็กตรอน 2 โมล (มันสิ้นต้นทุนเวสต์ และมันรักร์ ต้นทุนเวสต์, 2547)



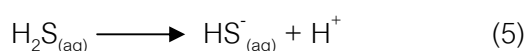
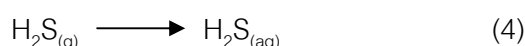
และเมื่อเหล็กเฟอร์ไรต์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Ritvo, Shitumbanuma และ Dixon, 2004)



สำหรับเหล็กออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นก๊าซที่ละลายน้ำได้ดี โดยเมื่อละลายอยู่ในน้ำ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์บางส่วนจะแตกตัวให้อิออน  $\text{HS}^-$  ทำให้มีส่วนผสมของไอออน  $\text{HS}^-$  และ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเกิดขึ้นในน้ำ สัดส่วนของส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด - ด่างและอุณหภูมิของน้ำ จะเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



จากสมการ (2) และ (3) พบว่า ในการทำปฏิกิริยาของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น อาจต้องอาศัยความชื้นที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการแตกตัวขึ้น เนื่องจากทั้งเฟอร์รัสไอออนและเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในรูปของเหลว โดยที่เฟอร์รัสไอออนจะมีความเร็วในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าเหล็กออกไซด์ที่ทำกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ใหญ่กว่า (Ritvo, Shitumbanuma และ Dixon, 2004) ดังนั้นดินลูกรังแบบที่มีการผสมผงเหล็กลงไปจึงมีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีกว่าดินลูกรังแบบที่ไม่ได้ผสมผงเหล็กลงไป

ค่าการะบรทุกขาเข้าของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของดินลูกรังทั้ง 4 แบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกำหนดความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าระบบและปริมาตรของตัวกลางคงที่ ทำให้ค่าการะบรทุกขาจะขึ้นกับความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบเท่านั้น

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางจะแสดงถึงมวลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกดูดซับต่อมวลของตัวกลาง มีวิธีการคำนวณดังหัวข้อ 3.9.3 โดยนำผลรวมมวลของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งหมดแล้วหารด้วยมวลของตัวกลาง ถ้าค่าของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางมากแสดงว่าตัวกลางสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากซึ่งดินลูกรังที่มีค่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางมากที่สุดและน้อยที่สุดคือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ คือ 7.34 และ 2.20 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เมื่อเหล็กในรูปแบบต่างๆ จับกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วจะได้ซัลเฟอร์ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ในการหาปริมาณซัลเฟอร์นั้นจะหาด้วยเครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometry) ซึ่ง ดินลูกรังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ถูกจับสะสมมากที่สุดคือ ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล มีอยู่ร้อยละ 7.95 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณผงเหล็กอยู่มาก และมีความเร็วในการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่า และมีปริมาณซัลเฟอร์ถูกจับสะสมน้อยที่สุดคือดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อมีอยู่ร้อยละ 0.34 โดยน้ำหนัก

จากข้อมูลดังกล่าวในข้างต้นคือปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง, ช่วงเวลาที่กำจัดได้ร้อยละ 100 และปริมาณซัลเฟอร์นี้สามารถกล่าวสรุปได้ว่า

ดินลูกรังที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากดินลูกรังทั้งหมด 4 แบบคือ ดินลูกรังแบบที่ 4 ซึ่งเป็นดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล และจะนำดินลูกรังนี้ไปใช้ในการทดลองที่ 3 ต่อไป และเมื่อนำไปหาความสามารถของเหล็กออกไซด์ต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยคิดเป็น 1 กรัมของเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้กี่มิลลิกรัม สามารถหาได้ดังตาราง 4.10

ตารางที่ 4.10 ความสามารถของเหล็กออกไซด์ต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

| ดินลูกรัง                                 | เหล็กออกไซด์<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) |           | เหล็กออกไซด์ต่อการกำจัด<br>ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์<br><br>(กรัมต่อมิลลิกรัม)  |
|---|------------------------------------|-----------|---|
|   | ก่อนทดลอง                          | หลังทดลอง |   |
| แบบไม่ฆ่าเชื้อ                            | 65.95                              | 65.93     | 1 กรัม Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่อ 0.01 มิลลิกรัม H <sub>2</sub> S |
| แบบฆ่าเชื้อ                               | 66.02                              | 65.12     | 1 กรัม Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่อ 0.33 มิลลิกรัม H <sub>2</sub> S |
| แบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 10 โดยมวล | 68.23                              | 67.57     | 1 กรัม Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่อ 1.03 มิลลิกรัม H <sub>2</sub> S |
| แบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็ก<br>ร้อยละ 20 โดยมวล | 67.16                              | 58.52     | 1 กรัม Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ต่อ 1.17 มิลลิกรัม H <sub>2</sub> S |

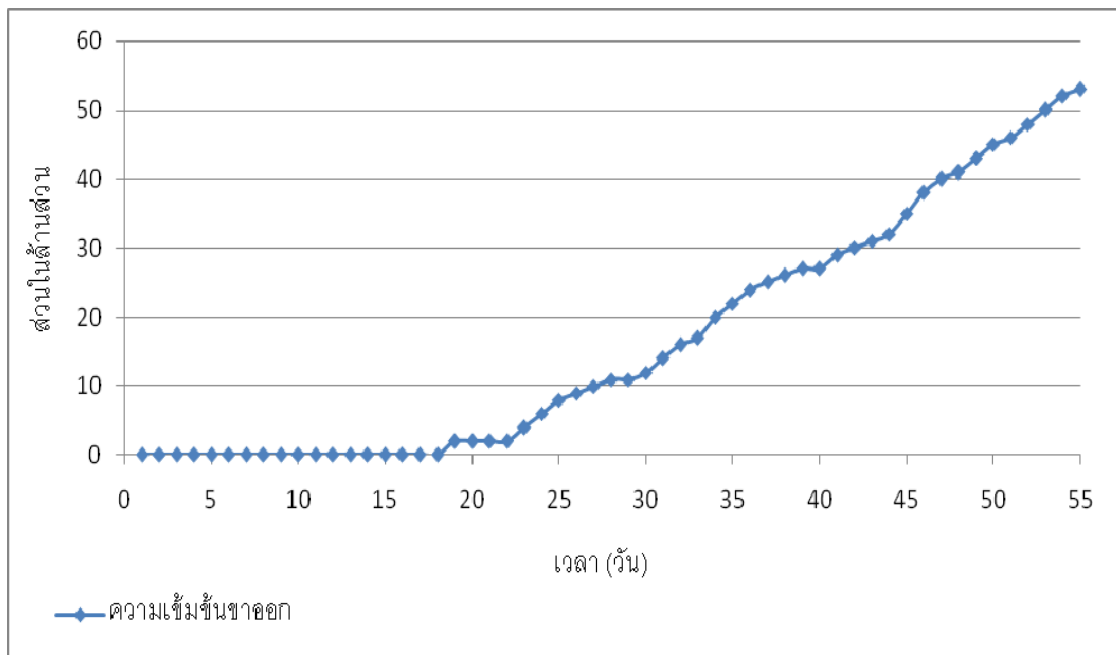
#### 4.4 ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกของชั้นตัวกลางที่ 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร โดยใช้ดินลูกรังจากการทดลองที่ 2 ซึ่งผลที่ได้คือดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลมาทำการทดลองในส่วนนี้ โดยความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง เวลาในการเดินระบบการทดลองจะใช้เวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน การทดลองนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อความเข้มข้นที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 โดยดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม

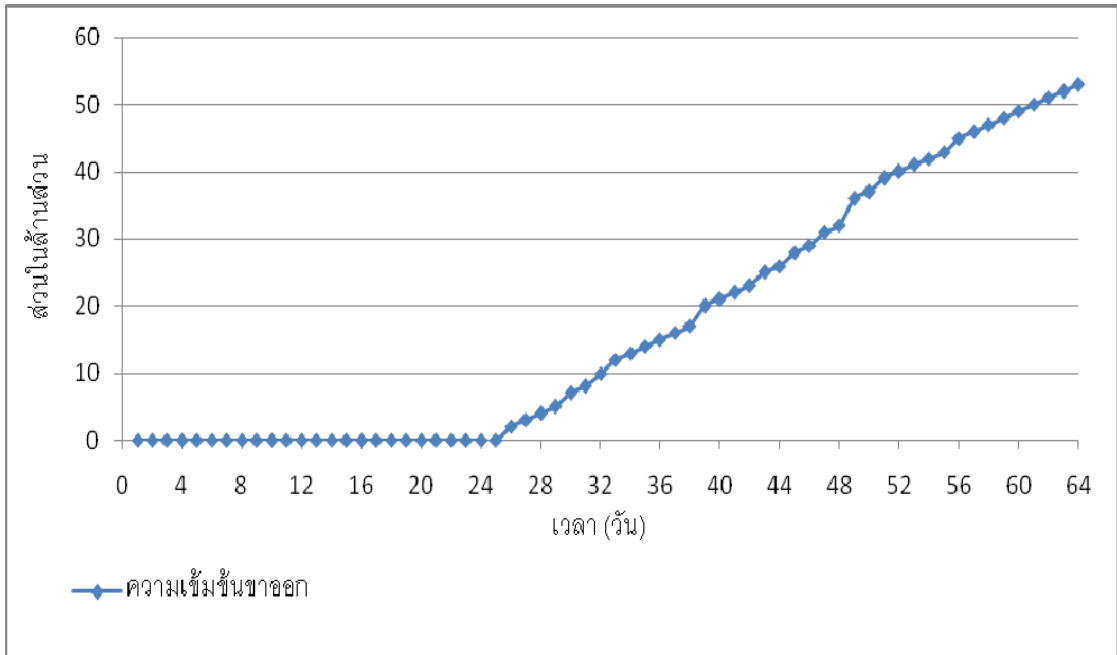
ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร จะใช้เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบคือ 55, 64, และ 74 วัน ที่ความลึกต่างๆ กันข้างต้น ตามลำดับ

#### 4.4.1 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลา

รูปที่ 4.22 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.3 เมตร พบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบที่ 0 ส่วนในล้านส่วนจะใช้เวลา 18 วันของการเดินระบบ และในวันที่ 19 ของการเดินระบบจะเริ่มมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลทะลุออกมา



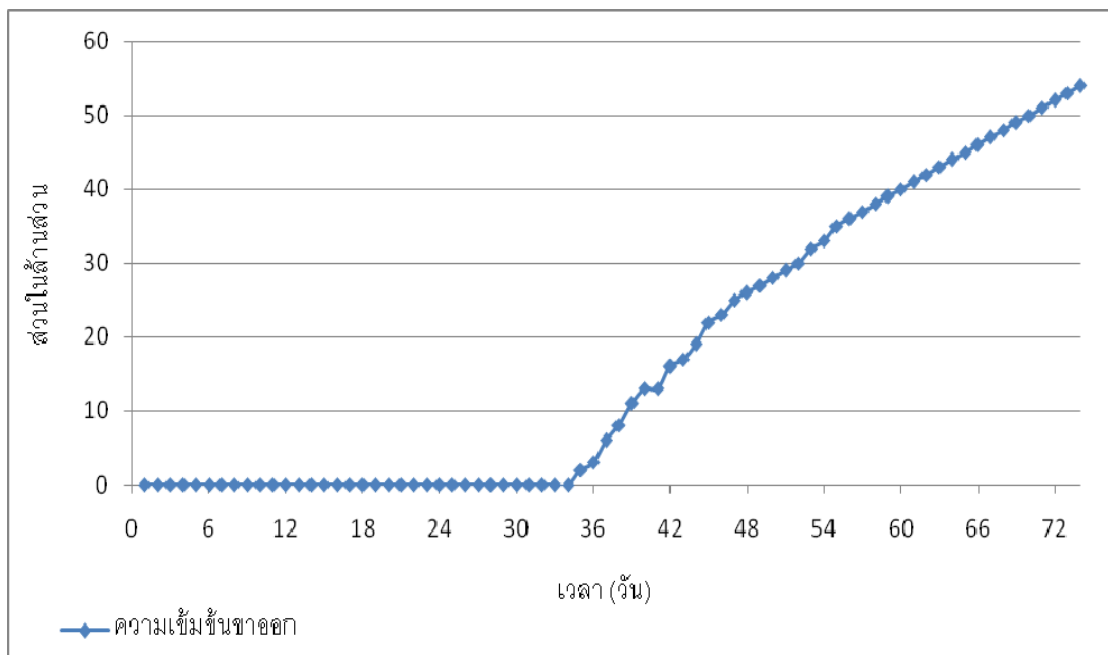
รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร



รูปที่ 4.23 ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร

รูปที่ 4.23 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.4 เมตร พบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบที่ 0 ส่วนในล้านส่วนจะใช้เวลา 25 วันของการเดินระบบ และในวันที่ 26 ของการเดินระบบจะเริ่มมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลทะลุออกมา

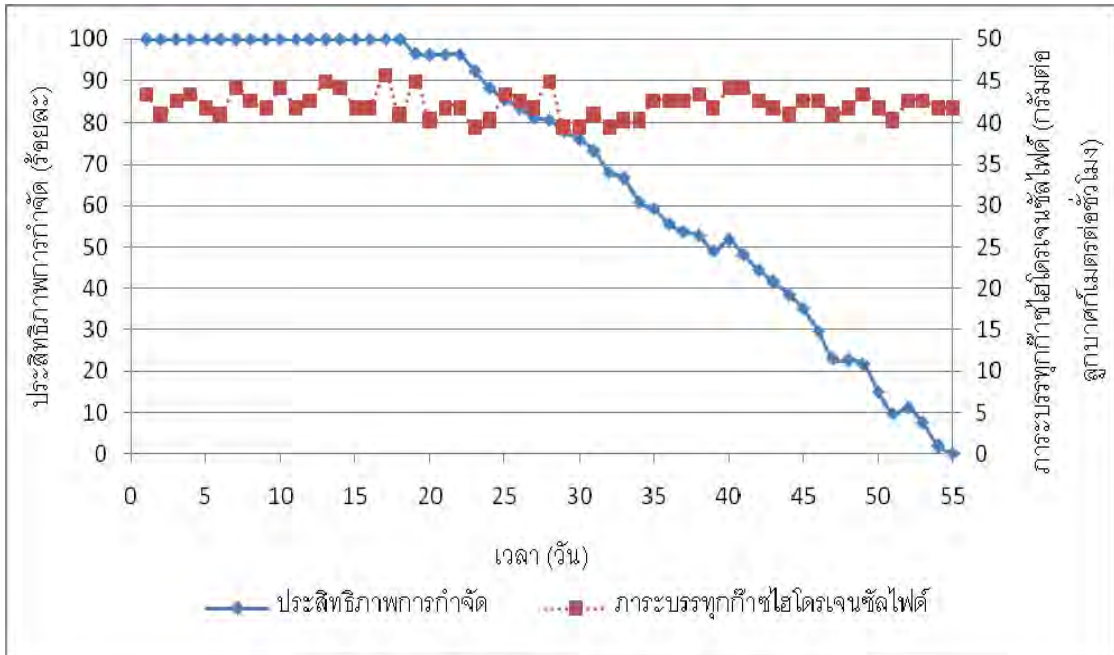
รูปที่ 4.24 แสดงถึงความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบกับเวลาของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.5 เมตร พบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบที่ 0 ส่วนในล้านส่วนจะใช้เวลา 34 วันของการเดินระบบ และในวันที่ 35 ของการเดินระบบจะเริ่มมีความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไหลทะลุออกมา



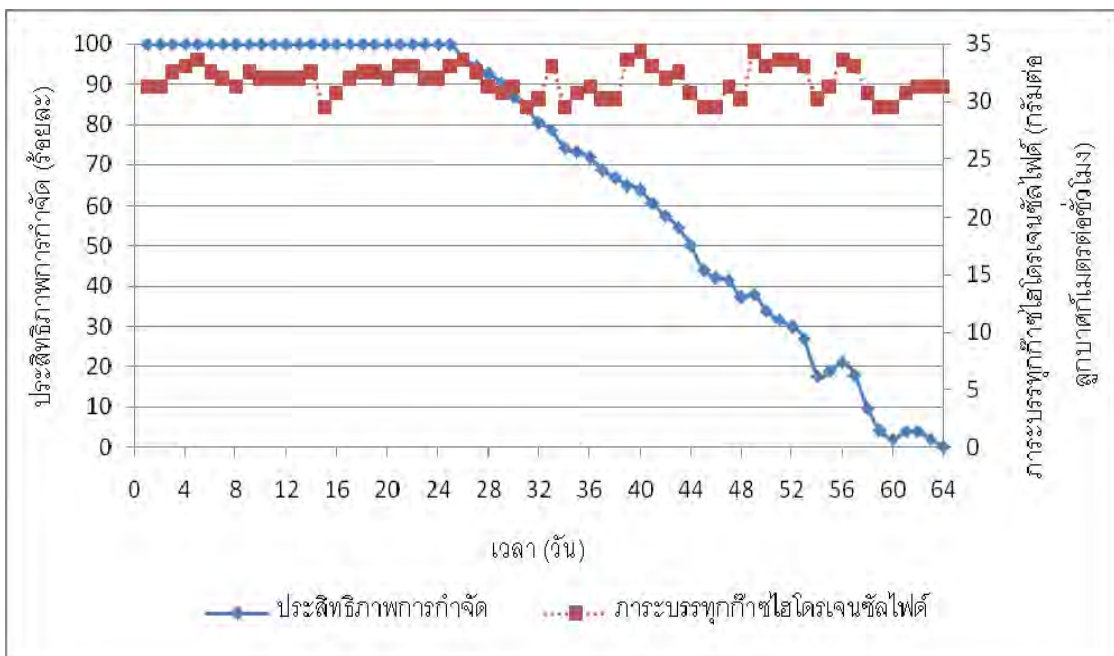
รูปที่ 4.24 ความชื้นในก้ำไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากระบบของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม  
ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร

#### 4.4.2 อิทธิพลของภาวะบรรจุที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด

รูปที่ 4.25 แสดงถึงประสิทธิภาพในการกำจัดก้ำไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาวะบรรจุของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระดับความลึก 0.3 เมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 55 วัน ช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 18 วัน ค่าภาวะบรรจุตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง (55วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $42.10 \pm 1.51$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง



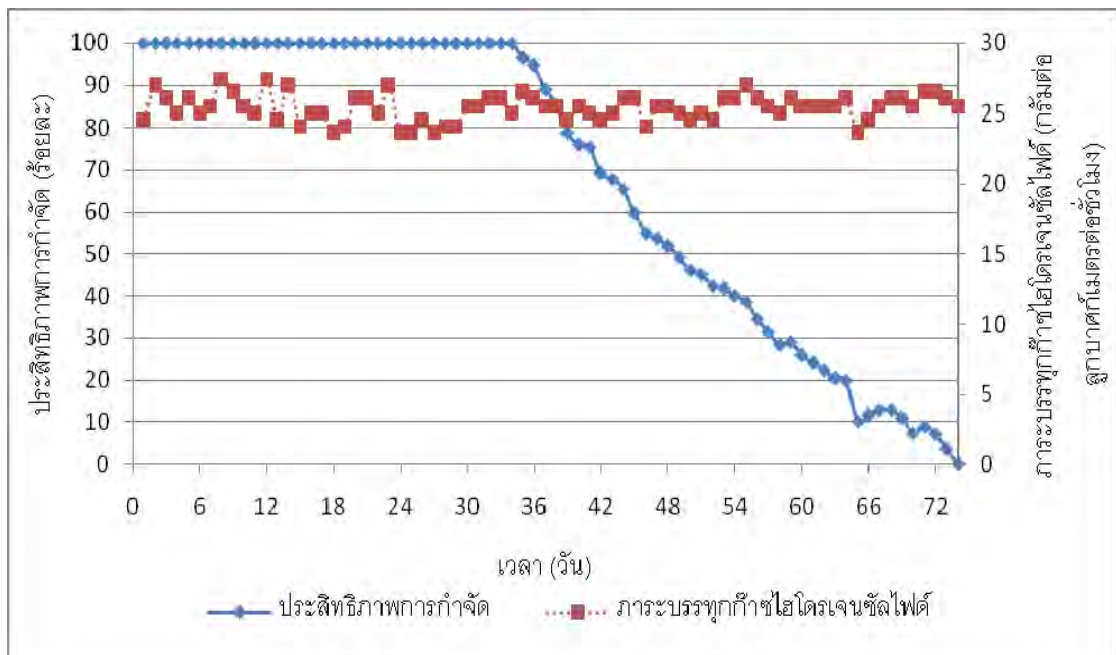
รูปที่ 4.25 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรจุของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร



รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรจุของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร

รูปที่ 4.26 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาวะ  
 บรรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.4 เมตร พบว่า  
 ประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 64 วัน ช่วงเวลาที่มี  
 ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 25 วัน ค่าภาวะบรรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง  
 (64 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $31.76 \pm 1.33$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง

รูปที่ 4.27 แสดงถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาวะ  
 บรรทุกของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.5 เมตร พบว่า  
 ประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 ใช้เวลาทั้งหมด 74 วัน ช่วงเวลาที่มี  
 ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 34 วัน ค่าภาวะบรรทุกตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลอง  
 (74 วัน) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $25.39 \pm 0.99$  กรัมต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง

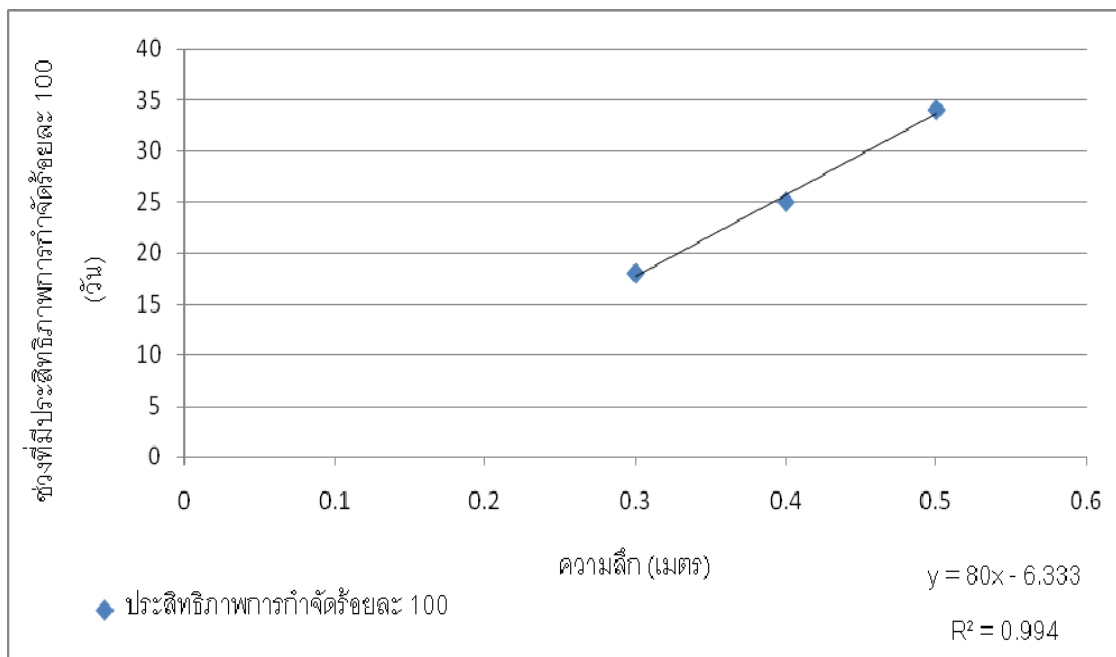


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดและค่าภาวะบรรทุกของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20  
 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร

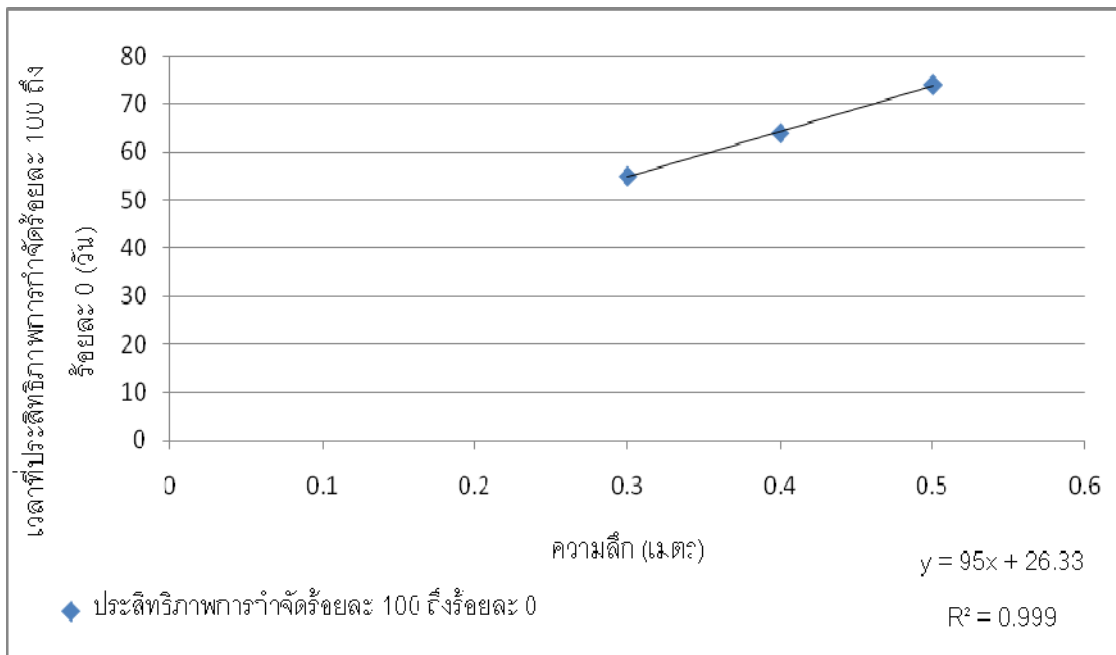


จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และค่าภาระบรรทุกจะขึ้นกับระยะความลึกของตัวกลาง เมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดจากร้อยละ 100 เป็นร้อยละ 0 จะใช้เวลามากขึ้นรวมทั้งช่วงเวลาที่มียมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 จะใช้เวลามากขึ้นด้วย ส่วนค่าภาระบรรทุกต่อหน่วยตัวกลางลดลงเมื่อระยะความลึกเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีปริมาตรตัวกลางที่มากขึ้น

เมื่อนำความลึกมาสร้างความสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่มียมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 จะได้ดังรูป 4.28 ส่วนในรูป 4.29 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาที่มียมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 ถึงร้อยละ 0



รูปที่ 4.28 สมการเส้นตรงระหว่างช่วงที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 กับความลึกของการทดลองที่ 3



รูปที่ 4.29 สมการเส้นตรงระหว่างเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 ถึงร้อยละ 0 กับ ความลึกของการทดลองที่ 3

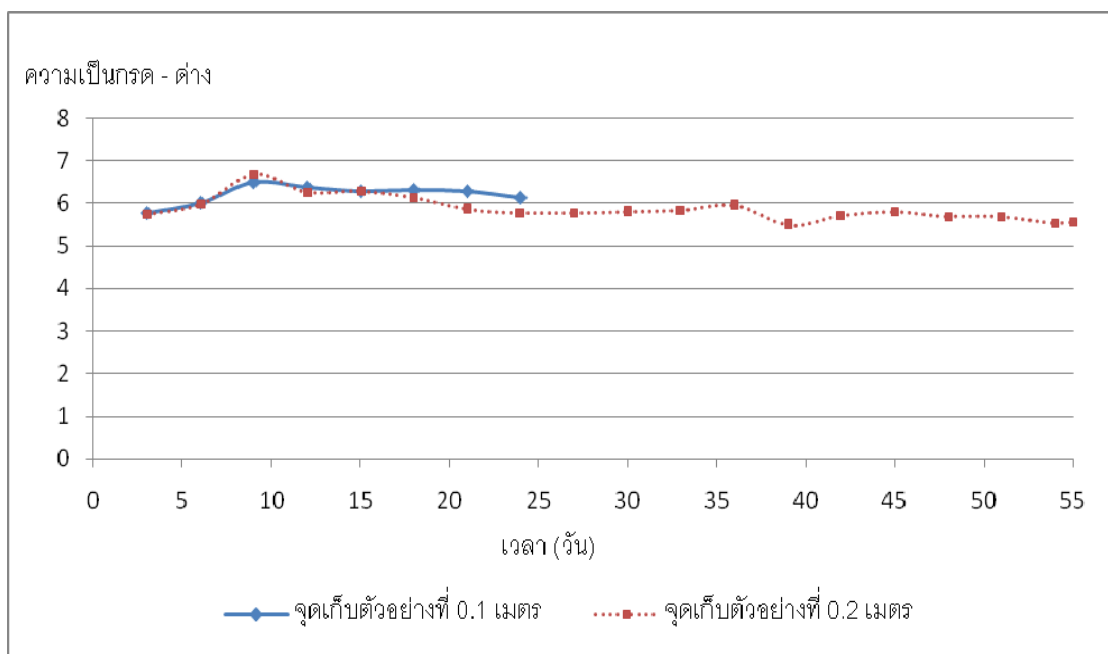
#### 4.4.3 ความเป็นกรด – ต่าง

ค่าความเป็นกรด – ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระยะความลึก 0.3 เมตรจะมีการเก็บผลวิเคราะห์อยู่ 2 จุดคือที่ 0.1 และ 0.2 เมตร ผลที่ได้พบว่า ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 24 วัน โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 5.78 เมื่อเวลาผ่านไป 24 วันมีค่าความเป็นกรด – ต่างเป็น 6.13 ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร สามารถเก็บผลได้จนจบการทดลอง (55 วัน) โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 5.76 เมื่อจบการทดลองมีค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 5.56 ผลที่ได้ดังรูป 4.30

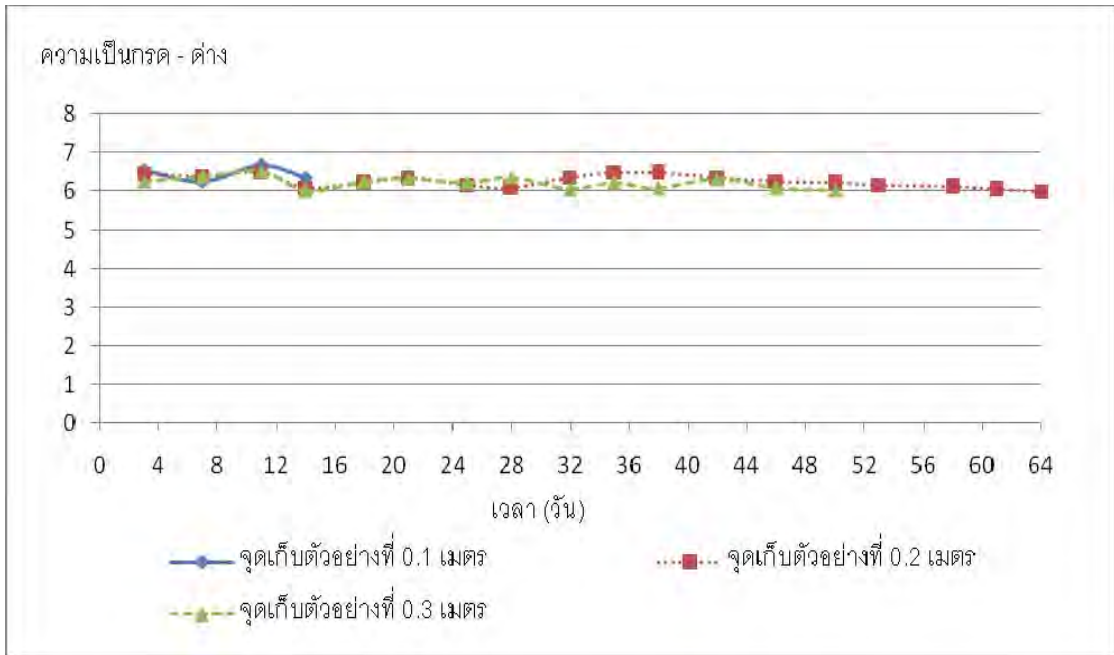
ค่าความเป็นกรด – ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระยะความลึก 0.4 เมตรจะมีการเก็บผลวิเคราะห์ที่จุด 0.1, 0.2 และ 0.3 เมตร ผลที่ได้พบว่าที่จุด เก็บตัวอย่าง 0.1 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 14 วัน โดยเริ่มต้นที่ค่าความเป็นกรด – ต่าง เท่ากับ 6.54 เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน มีค่าความเป็นกรด – ต่างเท่ากับ 6.34 ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร สามารถเก็บผลได้ถึงจนจบการทดลอง (64 วัน) โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ต่าง

เท่ากับ 6.46 เมื่อจบการทดลองมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.99 ส่วนจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 50 วัน โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.24 เมื่อเวลาผ่านไป 50 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.02 ดังรูป 4.31

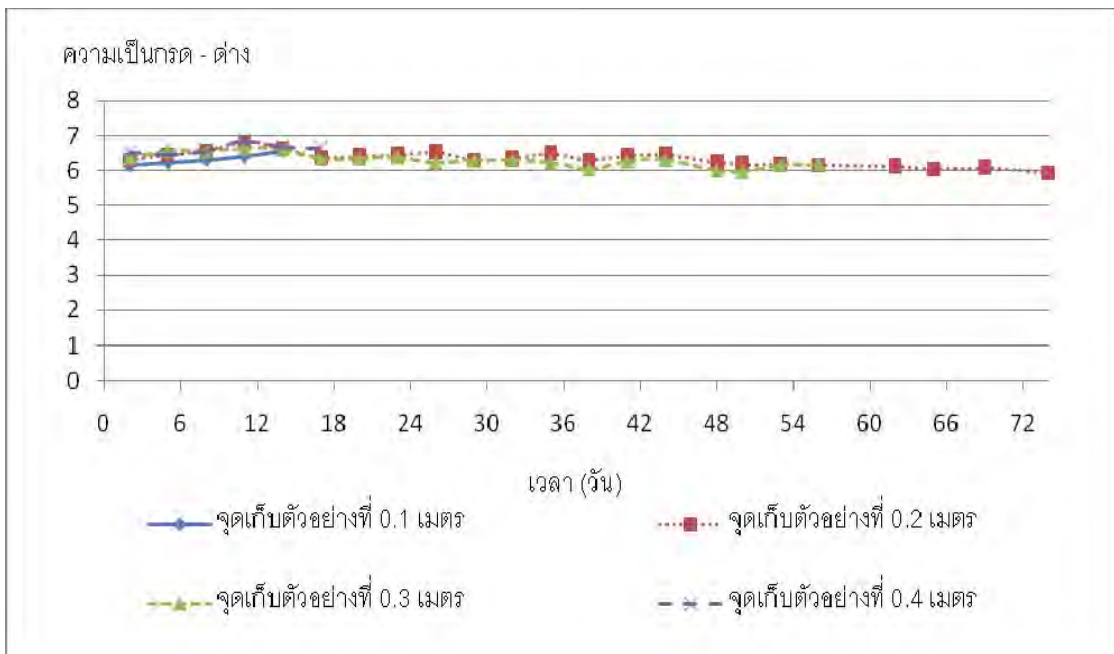
ค่าความเป็นกรด – ด่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระยะความลึก 0.5 เมตรจะมีการเก็บผลวิเคราะห์ที่จุด 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร ผลที่ได้พบว่า ที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.1 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 14 วัน โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.14 เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน มีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.42 ในจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร สามารถเก็บตัวอย่างได้จนจบการทดลอง (74 วัน) โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.30 เมื่อจบการทดลองมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 5.93 สำหรับจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 56 วัน โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.36 เมื่อเวลาผ่านไป 56 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.18 และในจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.4 เมตร สามารถเก็บผลได้เป็นเวลา 17 วัน โดยเริ่มต้นมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.51 เมื่อเวลาผ่านไป 17 วันมีค่าความเป็นกรด – ด่างเท่ากับ 6.61 ดังรูป 4.32



รูปที่ 4.30 ความเป็นกรด – ด่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่  
ความลึก 0.3 เมตร



รูปที่ 4.31 ความเป็นกรด - ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่  
ความลึก 0.4 เมตร

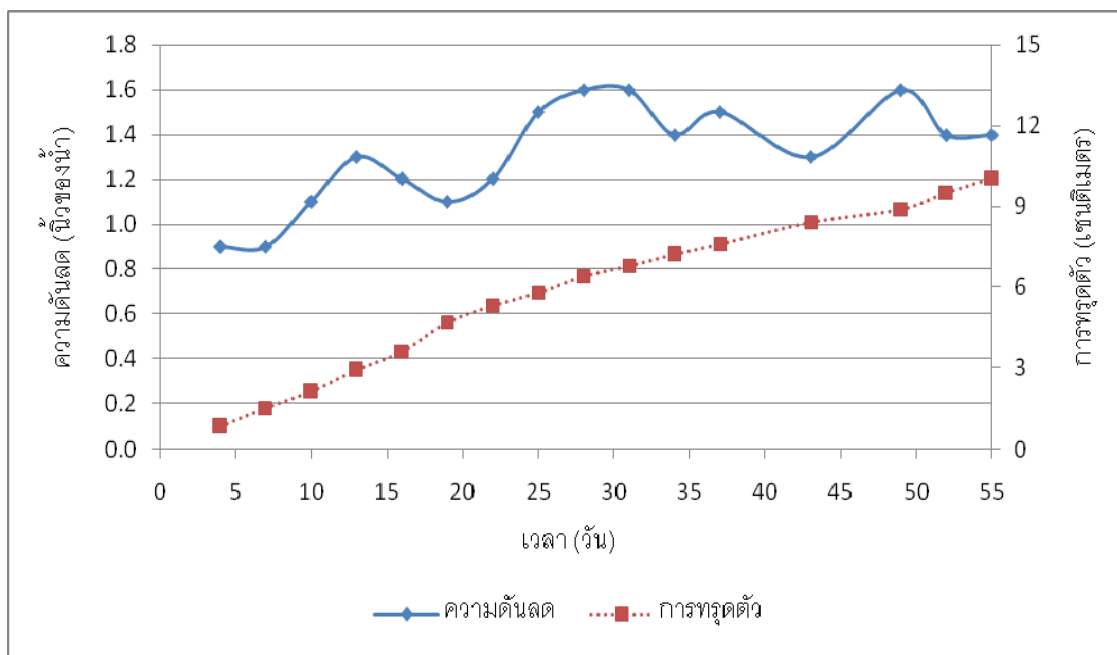


รูปที่ 4.32 ความเป็นกรด - ต่างของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่  
ความลึก 0.5 เมตร

โดยสรุปคือ ค่าความเป็นกรด - ด่างมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนแต่มีการขึ้นลงของค่าความเป็นกรด - ด่างในช่วงแคบๆ และเมื่อการทดลองสิ้นสุดลงค่าความเป็นกรด - ด่างของทุกระยะความลึกจะลดลงจากตอนเริ่มการทดลองทั้งสิ้น

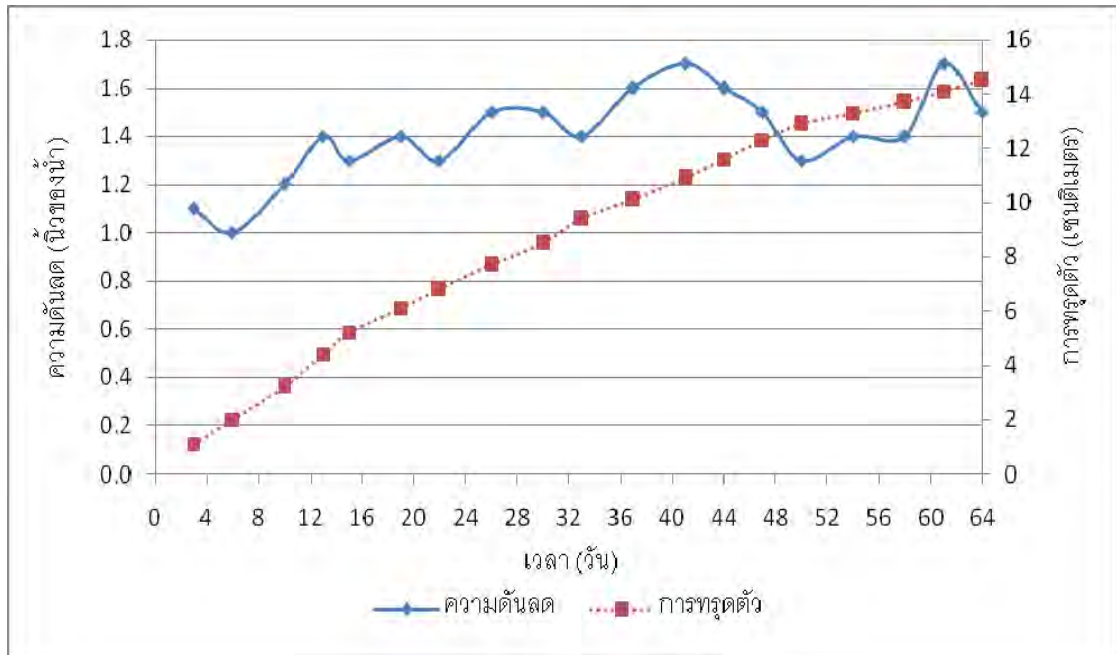
#### 4.4.4 ความดันลดและการทรุดตัว

รูปที่ 4.33 แสดงถึงค่าความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.3 เมตร ผลที่ได้คือเมื่อการทดลองสิ้นสุดลง (55 วัน) มีค่าความดันลด 1.4 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.3 \pm 0.2$  นิ้วของน้ำและมีค่าการทรุดตัว 10 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราการทรุดตัว 0.18 เซนติเมตรต่อวัน



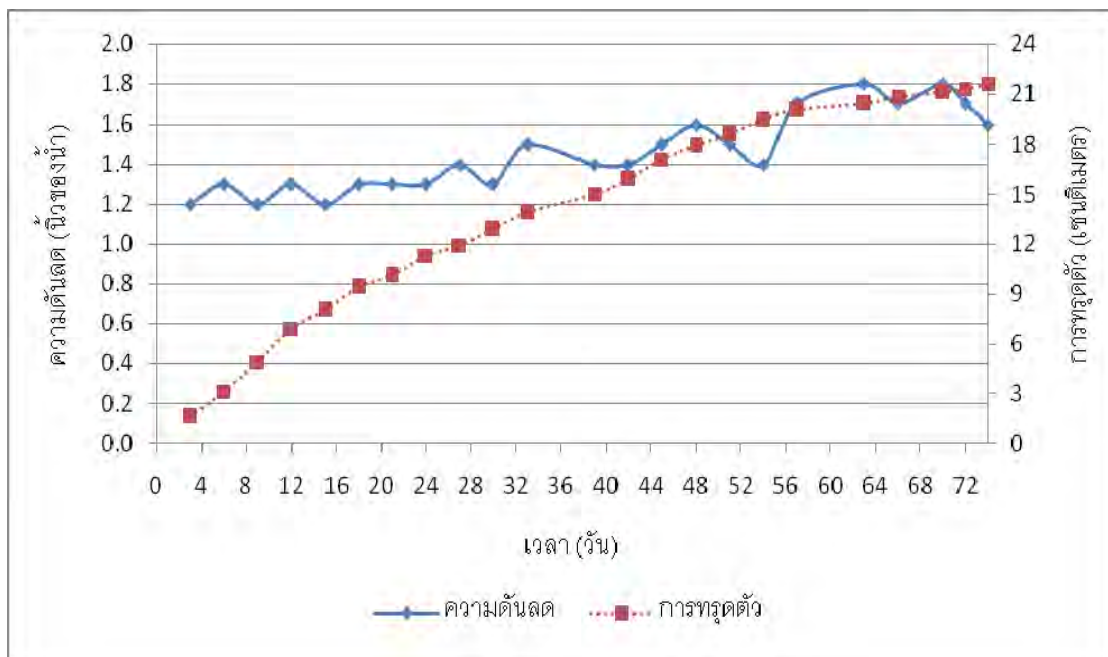
รูปที่ 4.33 ความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร

รูปที่ 4.34 แสดงถึงค่าความดันลดและการทрудตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่มีความลึก 0.4 เมตร ผลที่ได้คือเมื่อการทดลองสิ้นสุดลง (64 วัน) มีค่าความดันลด 1.5 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.4 \pm 0.2$  นิ้วของน้ำและมีค่าการทрудตัว 14.5 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราการทрудตัว 0.23 เซนติเมตรต่อวัน



รูปที่ 4.34 ความดันลดและการทрудตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่มีความลึก 0.4 เมตร

รูปที่ 4.35 แสดงถึงค่าความดันลดและการทрудตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่มีความลึก 0.5 เมตร ผลที่ได้คือเมื่อการทดลองสิ้นสุดลง (74 วัน) มีค่าความดันลด 1.6 นิ้วของน้ำ มีค่าเฉลี่ยเป็น  $1.5 \pm 0.2$  นิ้วของน้ำและมีค่าการทрудตัว 21.6 เซนติเมตร คิดเป็นอัตราการทрудตัว 0.29 เซนติเมตรต่อวัน



รูปที่ 4.35 ความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ ความลึก 0.5 เมตร

ในการวัดค่าความดันลด สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมานอมิเตอร์ โดยในจุดแรก นำมานอมิเตอร์ไปวัดที่จุดทางเข้าของระบบ (ด้านล่างของคอลัมน์) จุดที่สองไปวัดที่จุดความลึกของตัวกลางในแต่ละระยะความลึกแล้วนำทั้งสองจุดมาลบออกจากกัน ตัวอย่างเช่น ที่ความลึก 0.3 เมตร ในวันที่ 4 ของการเดินระบบ ค่าความดันที่จุดทางเข้าของก้ำขมีค่า 2.9 นิ้วของน้ำและที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตรมีค่าความดัน 2.0 นิ้วของน้ำ ดังนั้นค่าความดันลดที่ได้คือ 0.9 นิ้วของน้ำ

ในการวัดค่าการทรุดตัว สามารถวัดได้โดยใช้ตลับเมตรในชั้นแรกเมื่อนำตัวกลางใส่ในคอลัมน์เรียบร้อยแล้วให้วัดก่อนว่ามีความสูงทั้งหมดเท่าไร โดยใช้ตลับเมตรวัดจากขอบบนของคอลัมน์ลงมาถึงตัวกลางแล้วทำการจดค่าไว้ เมื่อเดินระบบเป็นเวลา 3 วัน ให้นำตลับเมตรไปวัดจากขอบบนสุดของคอลัมน์จนถึงตัวกลางว่ามีค่าเป็นเท่าใดแล้วทำการหักออกจากค่าอันแรก ตัวอย่างเช่น ที่ความลึก 0.3 เมตร เมื่อนำตัวกลางใส่คอลัมน์แล้วปรากฏว่าห่างจากขอบบนของคอลัมน์ 40.2 เซนติเมตร ในวันที่ 4 ของการเดินระบบเมื่อวัดแล้วห่างจากขอบบน 41 เซนติเมตร ดังนั้นมีค่าการทรุดตัว 0.8 เซนติเมตร

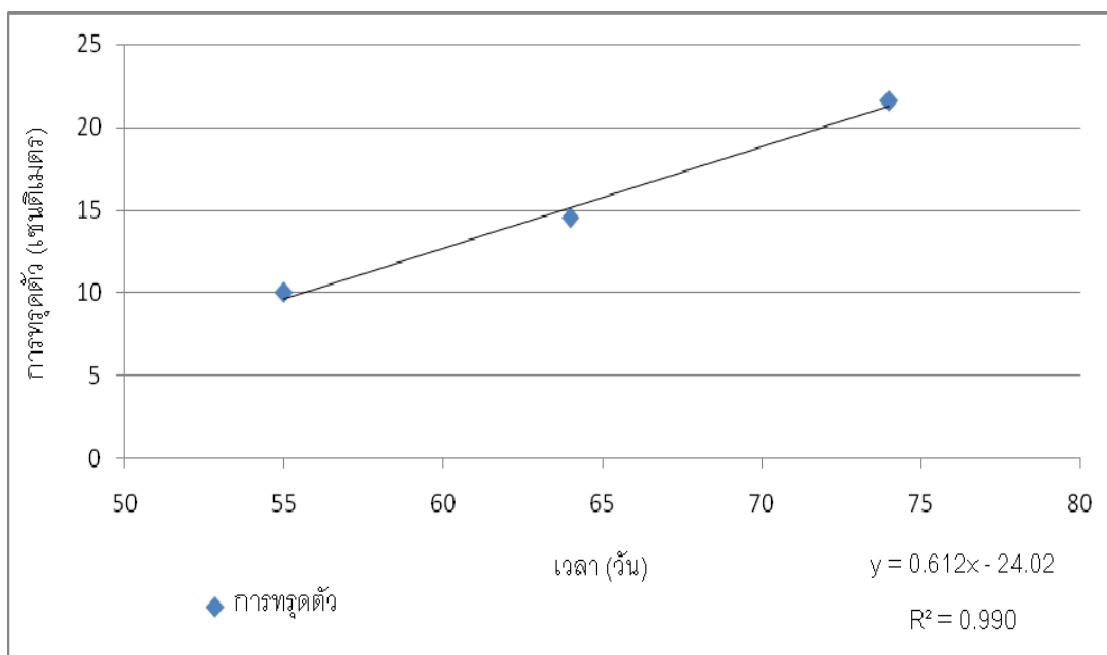
จากข้อมูลข้างต้นนี้สามารถกล่าวสรุปได้ดังตาราง 4.10 โดยค่าความดันลดจะขึ้นกับระยะความลึกของชั้นตัวกลาง ถ้าระยะความลึกของชั้นตัวกลางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความดันลดเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อระยะความลึกมากขึ้นทำให้ต้องรองรับน้ำหนักของตัวกลางที่มากขึ้นรวมทั้งเกิดการรวมตัวกันของดินลูกรังและผงเหล็ก ทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนจึงเป็นเหตุให้ก๊าซที่ไหลเข้าคอลัมน์ไหลผ่านตัวกลางอย่างไม่สะดวกทำให้มีค่าความดันเพิ่มขึ้นในคอลัมน์

สำหรับค่าการหลุดตัวที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร สามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงได้ โดยค่าการหลุดตัวนั้นเมื่อการเดินระบบยังระบบเดินนานเท่าใดค่าการหลุดตัวจะเพิ่มมากขึ้นดังรูป 4.36

ตารางที่ 4.11 ค่าความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร

| ระยะความลึก (เมตร) | ระยะเวลา (วัน) | ความดันลดสุดท้าย (นิ้วของน้ำ) | ความดันลดเฉลี่ย (นิ้วของน้ำ) | การหลุดตัวสุดท้าย (เซนติเมตร) | อัตราการหลุดตัว (เซนติเมตรต่อวัน) |
|--------------------|----------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 0.3                | 55             | 1.4                           | $1.3 \pm 0.2$                | 10                            | 0.18                              |
| 0.4                | 64             | 1.5                           | $1.4 \pm 0.2$                | 14.5                          | 0.23                              |
| 0.5                | 74             | 1.6                           | $1.5 \pm 0.2$                | 21.6                          | 0.29                              |

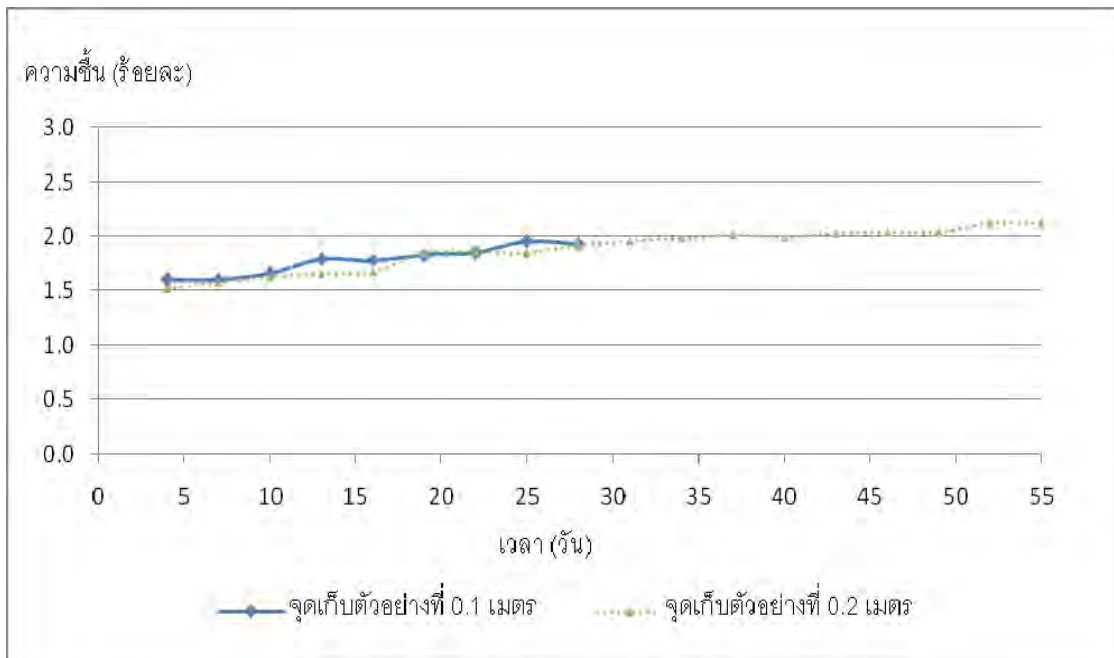




รูปที่ 4.36 สมการเส้นตรงของค่าการดูดน้ำของการทดลองที่ 3

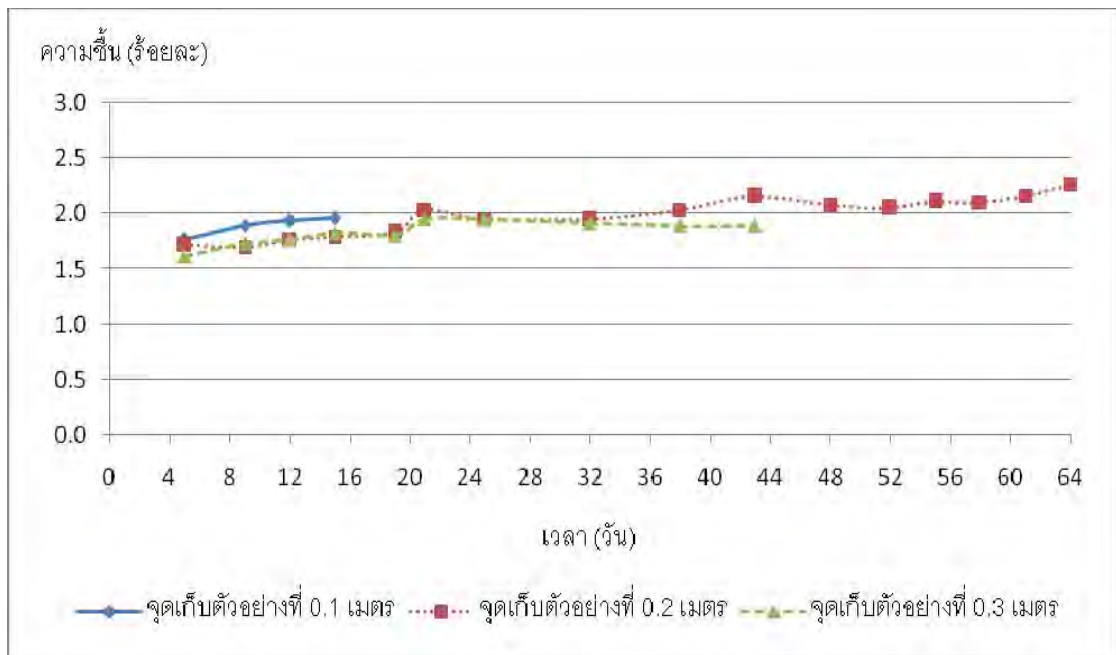
#### 4.4.5 ความชื้น

ค่าความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.3 เมตร จะมีการเก็บตัวอย่างที่จุด 0.1 และ 0.2 เมตร. โดยที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.1 เมตร จะเก็บผลวิเคราะห์ได้ 28 วัน เนื่องจากดินเกิดการรวมตัวกันทำให้ไม่สามารถเก็บดินมาวิเคราะห์ได้ ผลที่ได้คือค่าความชื้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.60 เป็นร้อยละ 1.94 ซึ่งคิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับ ร้อยละ 0.01 ต่อวัน ส่วนที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.2 เมตรสามารถเก็บผลวิเคราะห์ได้ถึงจนจบการทดลอง (55 วัน) ผลที่ได้คือค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.52 เป็นร้อยละ 2.12 ซึ่งคิดเป็นค่าอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 ต่อวัน ดังรูป 4.37



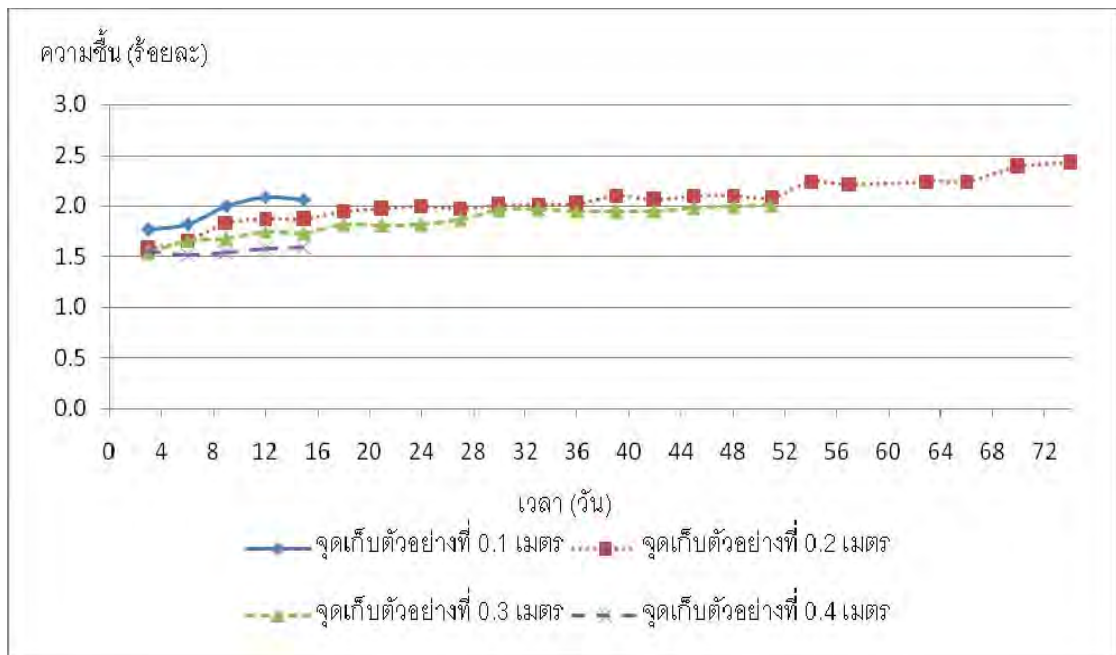
รูปที่ 4.37 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร

ค่าความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.4 เมตรจะทำการเก็บผลวิเคราะห์ที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.1, 0.2 และ 0.3 เมตร โดยจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตรสามารถเก็บผลวิเคราะห์ได้ 15 วัน ผลที่ได้คือค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.76 เป็นร้อยละ 1.96 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 ต่อวัน ที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.2 เมตรสามารถเก็บผลวิเคราะห์ได้จนจบการทดลอง (64 วัน) ค่าความชื้นที่ได้จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.72 เป็นร้อยละ 2.27 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 และที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.3 เมตรสามารถเก็บผลวิเคราะห์ได้ 43 วันผลที่ได้คือค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.62 เป็นร้อยละ 1.89 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 ต่อวัน ดังรูป 4.38



รูปที่ 4.38 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร

ค่าความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ระยะความลึก 0.5 เมตร มีการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ที่จุด 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 เมตร โดยจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตรสามารถเก็บตัวอย่างได้ 15 วันผลที่ได้คือมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.77 เป็นร้อยละ 2.06 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.02 ต่อวัน ที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.2 เมตร ค่าความชื้นจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.58 เป็นร้อยละ 2.42 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 ต่อวัน ซึ่งที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.2 เมตรนี้สามารถเก็บผลได้จนจบการทดลอง (74 วัน) จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตรสามารถเก็บตัวอย่างได้ 57 วันมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.54 เป็นร้อยละ 2.03 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.01 ต่อวัน และที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.4 เมตร สามารถเก็บตัวอย่างได้ 15 วันมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.55 เป็นร้อยละ 1.60 คิดเป็นอัตราการเพิ่มต่อวันเท่ากับร้อยละ 0.003 ต่อวัน ดังรูป 4.39



รูปที่ 4.39 ความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนี้สามารถกล่าวได้ว่า ที่ระยะความลึกเพิ่มมากขึ้นเมื่อการทดลองสิ้นสุดลงความชื้นจะเพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่ระยะความลึก 0.3 เมตรเมื่อการทดลองสิ้นสุดลงมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.12 ที่ระยะความลึก 0.4 เมตรเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความชื้นเท่ากับ ร้อยละ 2.27 และที่ระยะความลึก 0.5 เมตรเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.42 เนื่องจากจะใช้เวลานานมากขึ้นกว่าที่ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับที่ออกจากระบบ และในแต่ละความลึกที่จุดใกล้ทางเข้าของระบบเริ่มต้นจะมีค่าความชื้นมากกว่าจุดอื่นๆ ที่สูงขึ้นไป อย่างเช่น ที่ระยะความลึก 0.3 เมตร ที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร ซึ่งเป็นจุดเก็บที่อยู่ใกล้ทางเข้าของระบบมากที่สุด มีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 1.60 และที่จุดเก็บตัวอย่าง 0.2 เมตร ซึ่งเป็นจุดเก็บตัวอย่างที่สูงขึ้นไปมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 1.52 เป็นต้น เนื่องจากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นการผลิตจากของเหลวแล้วใช้ลมเป่าเอาก๊าซและไอน้ำออกมา ดังนั้นความชื้นจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากจุดทางเข้าของก๊าซก่อน ค่าความชื้นทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังตาราง 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่าความชื้นของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร

| ระยะจุดเก็บ<br>(เมตร) | ระยะเวลา<br>(วัน) | ความชื้นเริ่มต้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นสุดท้าย<br>(ร้อยละ) | อัตราการเพิ่มของ<br>ความชื้น<br>(ร้อยละต่อวัน) |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| ความลึก 0.3 เมตร      |                   |                              |                             |  |
| 0.1                   | 28                | 1.60                         | 1.94                        | 0.01   |
| 0.2                   | 55                | 1.52                         | 2.12                        | 0.01   |
| ความลึก 0.4 เมตร      |                   |                              |                             |  |
| 0.1                   | 15                | 1.76                         | 1.96                        | 0.01   |
| 0.2                   | 64                | 1.72                         | 2.27                        | 0.01   |
| 0.3                   | 43                | 1.62                         | 1.89                        | 0.01   |
| ความลึก 0.5 เมตร      |                   |                              |                             |  |
| 0.1                   | 15                | 1.77                         | 2.06                        | 0.02   |
| 0.2                   | 74                | 1.58                         | 2.42                        | 0.01   |
| 0.3                   | 57                | 1.54                         | 2.03                        | 0.01   |
| 0.4                   | 15                | 1.55                         | 1.60                        | 0.003  |

#### 4.4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร โดยใช้ดินลูกรังที่ได้จากการทดลองที่ 2 คือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ในการทดลองนี้กำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบคือ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาที โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร สามารถสรุปได้ดังตาราง 4.13

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร

| พารามิเตอร์   | ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล |              |              |
|---|--|--------------|--------------|
|   | 0.3 เมตร                                       | 0.4 เมตร     | 0.5 เมตร     |
| ช่วงเวลาที่มึประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 (วัน)  | 18   | 25           | 34           |
| ช่วงเวลาที่ใช้ทั้งหมดที่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าระบบเท่ากับความเข้มข้นออกระบบ (วัน) | 55   | 64           | 74           |
| ภาระบรรทุกเฉลี่ยตลอดการทดลอง (กรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)  | 42.10 ± 1.51                                   | 31.76 ± 1.33 | 25.39 ± 0.90 |
| ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม)                              | 9.04   | 7.57         | 7.57         |

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดของดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร (ต่อ)

| พารามิเตอร์                                       | ดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล |          |          |
|---|--|----------|----------|
|   | 0.3 เมตร                                       | 0.4 เมตร | 0.5 เมตร |
| ปริมาณซัลเฟอร์ที่ถูกจับสะสม<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 8.55   | 10.20    | 10.71    |

จากตาราง 4.13 พบว่า เมื่อระยะความลึกเพิ่มมากขึ้นช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความลึก 0.3 เมตร มีช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 เป็นเวลา 18 วัน ที่ความลึก 0.4 เมตร มีช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 เป็นเวลา 25 วัน และที่ความลึก 0.5 เมตร มีช่วงเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 เป็นเวลา 34 วัน ส่วนช่วงเวลาที่ใช้งานความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบ เท่ากับความเข้มข้นที่ออกจากระบบที่ยาวนานที่สุดคือ ที่ความลึก 0.5 เมตรคือ 74 วัน สั้นที่สุดคือ ที่ความลึก 0.3 เมตรคือ 55 วัน อาจเกิดจากช่วงของการดูดซับได้เพิ่มขึ้นตามระยะความลึกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ระยะความลึกที่เพิ่มขึ้นก๊าซที่ไหลเข้าระบบจะใช้เวลามากขึ้นทำให้ก๊าซสัมผัสกับตัวกลางได้มากขึ้น

ค่าการระบรทุกจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะความลึก เนื่องจากเมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาตรของตัวกลางเพิ่มขึ้นด้วย

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง พบว่าเมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางลดลง ซึ่งที่ความลึก 0.3 เมตรมีปริมาณมากที่สุดคือ 9.04 มิลลิกรัมต่อกรัมและน้อยที่สุดคือที่ความลึก 0.5 เมตรมีค่า 7.57 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากเมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นมวลของตัวกลางจะเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางจึงลดลง

สำหรับปริมาณซัลเฟอร์ที่ถูกจับสะสมจะมีค่ามากขึ้นตามระยะความลึกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีช่วงเวลาในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยาวนานขึ้นและมีปริมาณตัวดูดซับที่มากขึ้น โดยที่ความลึก 0.5 เมตรมีปริมาณซัลเฟอร์ถูกจับสะสมมากที่สุดคือร้อยละ 10.71 โดยน้ำหนัก และมีค่าน้อยที่สุดคือ ร้อยละ 8.55 โดยน้ำหนักที่ความลึก 0.3 เมตร



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาหาปริมาณและชนิดของเหล็กในดินลูกรัง

ในการทดลองได้นำดินลูกรังจากประเทศไทยมาใช้ ดินลูกรังที่ใช้ในการวิจัยมีอยู่ 2 แหล่งคือถนนสายอุดรธานี – สกลนคร และถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ซึ่งขนาดที่ใช้จะมีอยู่ 2 ขนาดคือ 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร นำดินลูกรังทั้ง 2 ขนาดจากทั้ง 2 แหล่งมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก ได้ข้อสรุปดังนี้

1. แหล่งดินลูกรังของถนนสายอุดรธานี – สกลนคร ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร มีปริมาณเหล็กทั้งหมด ปริมาณเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) มากกว่าดินลูกรังของถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดดิน 2.36 และ 1.18 มิลลิเมตร
2. ในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กออกไซด์พบว่า ที่ขนาดดิน 2.36 มิลลิเมตร มีปริมาณเหล็กออกไซด์สูงกว่าที่ขนาดดิน 1.18 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถดูค่าได้จากตาราง 4.1 – 4.4 จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า เหล็กออกไซด์จะเกาะเคลือบรอบๆ ดินลูกรัง ปริมาณเหล็กออกไซด์จะยิ่งมากถ้าดินลูกรังมีขนาดโตมาก

##### 5.1.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาตัวกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ในการทดลองได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรัง 4 แบบ เป็นการนำดินลูกรังจากการทดลองที่ 1 มาใช้ซึ่งแบบที่ 1 คือดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อ แบบที่ 2 คือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อ แบบที่ 3 คือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล และ

แบบที่ 4 คือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล โดยกำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซคงที่ 8 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง และกำหนดให้ความลึกของชั้นตัวกลางเท่ากับ 0.2 เมตร ได้ข้อสรุปดังนี้

1. การผสมผงเหล็กลงไปดินลูกรังนั้น มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าคุณสมบัติทั่วไปของดินลูกรัง เนื่องจากเมื่อผงเหล็กกลายเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์แล้วสามารถจับกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เร็วกว่าเหล็กออกไซด์ (Ritvo, Shitumbanuma และ Dixon, 2004)

2. เมื่อมีการเพิ่มผงเหล็กลงไปดินลูกรังจากร้อยละ 10 โดยมวลเป็นร้อยละ 20 โดยมวล สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ประมาณ 2 เท่า โดยดูได้จากช่วงเวลาที่ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 คือ 7 และ 13 วัน ตามลำดับ

3. สำหรับดินลูกรังที่ผสมผงเหล็กไม่จำเป็นต้องนำไปฆ่าเชื้อก่อนได้ เนื่องจากในดินลูกรังมีปริมาณอินทรีย์วัตถุอยู่น้อยมากดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการฆ่าเชื้อเพราะจุลินทรีย์เริ่มต้นน่าจะน้อย รวมทั้งการนำไปฆ่าเชื้อจะเป็นการเสียเวลาเนื่องจากต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง

4. เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2 ค่าความดันลดของดินลูกรังแบบไม่ฆ่าเชื้อและแบบฆ่าเชื้อจะลดลง เนื่องจากการที่ดินลูกรังไม่จับตัวกันเป็นก้อน มีการหลุดตัวและอัดตัวอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 และ 20 โดยมวล ค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้นเกิดจากผงเหล็กที่เคลือบดินลูกรังรวมตัวกันเป็นก้อนและเกิดการหลุดตัวอย่างเป็นระเบียบ

5. สำหรับค่าการหลุดตัวเมื่อการเดินระบบยาวนานเท่าใดค่าการหลุดตัวก็จะยิ่งมากขึ้น เมื่อการทดลองสิ้นสุดลงมีค่าการหลุดตัวของตัวกลางทั้ง 4 แบบคือ 2, 2.5, 3.7 และ 4.7 เซนติเมตร ตามลำดับ

6. ความชื้นในตัวกลางทั้ง 4 แบบจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเดินระบบ โดยจุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตรเป็นจุดที่สามารถเก็บตัวอย่างได้จนจบการทดลองซึ่งมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 1.84, 1.87, 1.98 และ 1.98 ตามลำดับ โดยความชื้นเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความดันลดในระบบ เช่น ตัวกลางในแบบที่ 4 คือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดย

มวล เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนระหว่างผงเหล็กกับเม็ดดินเป็นผลให้ก๊าซที่ไหลผ่านเข้าระบบไหลผ่านไม่สะดวกต้องใช้แรงดันมากขึ้นจึงทำให้มีค่าความดันลดที่เพิ่มขึ้นด้วย

7. เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะของเหลว ดังนั้นภายในคอลัมน์จึงต้องทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสถานะของเหลวเพียงพอแต่ต้องไม่ขึ้นจนเพียงพอทำให้ดินลูกรังเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนใหญ่

### 5.1.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน

ในการทดลองได้ศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ระยะความลึกต่างๆ กันคือ 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร โดยมีดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลเป็นตัวกลาง โดยกำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบเท่ากับ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาทีตลอดการทดลอง ได้ข้อสรุปดังนี้

1. เมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ระยะความลึก 0.5 เมตรช่วงเวลาที่มียุทธประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 จะเพิ่มประมาณ 2 เท่าของที่ระยะความลึก 0.3 เมตรคือ 34 และ 18 วัน ตามลำดับ

2. เมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวกลางนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อระยะความลึกเพิ่มขึ้นปริมาณของตัวกลางนั้นจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ผลที่ได้จากตาราง 4.13 นั้นพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลางของที่ระยะความลึก 0.4 และ 0.5 เมตรมีค่าเท่ากันคือ 7.57 มิลลิกรัมต่อกรัม

3. เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 3 ค่าความดันลดจะเพิ่มขึ้นตามระยะความลึกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องรองรับน้ำหนักของตัวกลางที่เพิ่มมากขึ้นด้วย ที่ระยะความลึก 0.3, 0.4 และ 0.5 เมตรมีค่าเท่ากับ 1.4, 1.5 และ 1.6 นิ้วของน้ำ ตามลำดับ

6. ค่าแนะนำที่ใช้ในการออกแบบคือ เมื่อความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 50 ส่วนในล้านส่วนที่อัตราการไหลของก๊าซ 8 ลิตรต่อนาที จะใช้ตัวกลางคือดินลูกรังแบบฆ่าเชื้อผสม

ผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล ที่ระยะความลึก 0.4 เมตรมีค่าการบรรทุกเฉลี่ย  $42.10 \pm 1.51$  กรัม ต่อลูกบาศก์เมตรตัวกลางต่อชั่วโมง จะได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้ต่อปริมาณตัวกลาง 7.57 มิลลิกรัมต่อกรัม

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยทำการแปรผันค่าความเข้มข้นที่เข้าระบบและอัตราการไหลของก๊าซ เมื่อตัวกลางมีระยะความลึกคงที่ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบและอัตราการไหลของก๊าซคงที่ตลอดการทดลอง ทำให้ทราบว่าถ้าระยะตัวกลางคงที่ ค่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เข้าระบบหรืออัตราการไหลของก๊าซปัจจัยใดที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

2. ในงานวิจัยนี้มีการผสมกันระหว่างผงเหล็กกับดินลูกรัง เมื่อการทดลองดำเนินไป การมีความชื้นทำให้ผงเหล็กและดินลูกรังรวมตัวกันและจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นเพื่อป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนจึงควรมีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความชื้นกับระยะเวลาในการเดินระบบ

3. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังสามารถนำดินลูกรังจากแหล่งอื่นๆ มาใช้ในงานวิจัย เพื่อนำผลที่ได้มาพิจารณาเปรียบเทียบกับดินลูกรังแต่ละแหล่งจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีเพียงใด เพื่อเป็นผลดีต่อการเลือกใช้ดินลูกรัง

4. ศึกษาเหล็กในรูปแบบอื่นที่มีอยู่ในดินลูกรังที่มีผลต่อการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อดูว่าเหล็กในรูปแบบใดในดินลูกรังที่กำจัดได้ดีที่สุด เนื่องจากดินลูกรังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศไทย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ณัฐพล รัตนमुखย์. การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยเครื่องกรองชีวภาพ.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และ วุฒิชัย ้วยวุฒิกเกียรติ. กลสมบัติของดินลูกรังในประเทศไทยศึกษา

เน้นหนักการใช้ประโยชน์ในงานทางหลวง. กรุงเทพมหานคร : กองวิเคราะห์และวิจัย

กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, 2528.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์ และ มันรัช ตัณฑุลเวศม์. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย พิมพ์ครั้งที่ 2.

กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

“พลังงานจากก๊าซชีวภาพ”, สิ่งแวดล้อมประเทศไทย 7,26 (พฤศจิกายน – ธันวาคม 2549):

88 – 92.

วุฒิชัย พิธิพงษ์. การกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผงตะไบ

เหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรศักดิ์ ตันตวินิช และ สมหวัง ช่างสุวรรณ. ธรณีวิทยาแหล่งดินลูกรังบริเวณภาคตะวันออกเฉียง

ประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม,

2538.

อัจฉรีย์ กาญจนพิบูลวงศ์. การกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินลูกรัง.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

## ภาษาอังกฤษ

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Hydrogen sulfide [Online].

2006. Available from : <http://www.atsdr.cdc.gov/mhmi/mmg114.html>

[2006 , December 12]

American Society of Testing and Materials. Standard Test Method for pH of soil.

D 4972 – 01 Annual Book of ASTM standard, 04.08 section 4. 1996.

American Society of Testing and Materials. Standard Test Method for Particle – Size

Analysis of Soils. D 422 Annual Book of ASTM standard, 04.08 section 4. 1996.

Anit, B. Selvi. and Artuz, J. Robert. Biofiltration of air [Online]. Available from:

<http://www.rpi.edu/dept/Chem-eng/Biotech-Environ/MISC/biofilt/biofiltration.htm>

[2008, January 25]

Arthur Wellinger and Anna Lindberg. Biogas upgrading and utilization. (1999), p 15.

Barona, A., Elias, A., Arias, R., Cano, I., and Gonzalez, R. Biofilter response to gradual

and sudden variations in operating conditions. Biochemical Engineering Journal

22 (2004): 25-31.

Devinny, S., Deshusses, A., and Webster, S. Biofiltration for air pollution control.

New York: Lewis Publishers, 1999.

Elias, A., Barona, A., Arreguy, J., Rios, I., Aranguiz, J., and Penas, J. Evaluation of a

packing material for the biodegradation of H<sub>2</sub>S and product analysis.

Process Biochemistry 37 (2002): 813 – 820.

Horikawa, M. S., Rossi, F., Gimenes, M.L., Costa, C. M. M., and Silva, M. G. C.

Chemical Adsorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification. Brazillian Journal of

Chemical Engineering. 21 (2004).

International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).

Ferrous analysis in fresh plant tissue [Online]. Available from :

[http://www.icarda.org/Publications/Lab\\_Manual/read.htm](http://www.icarda.org/Publications/Lab_Manual/read.htm) [2007]

Japanese Standards Association. General rules for permissible tolerance of chemical

analyses and physical tests. Japanese Industrial Standard (JIS), 1991.

Kapdi, S. S., Vijay, V. K., Rajesh, S. K., and Prasad, R. Biogas scrubbing,

Compression and storage: perspective and prospectus in Indian context.

Renewable Energy 97 (2005): 1195 – 1202.

- Leson, M. C., and Winer, A. M. Biofiltration an innovation air pollution control technology For VOC emission. Journal of the Air & Waste Management Association. 41(1991): 1045 – 1054.
- Material Safety Data Sheet. Safety (MSDS) data for hydrogen sulfide [Online]. Available from: [http://www.physchem.ox.ac.uk/MSDS/HY/hydrogen\\_sulfide.html](http://www.physchem.ox.ac.uk/MSDS/HY/hydrogen_sulfide.html) [2005, May 3]
- Mcnevin Dennis and Barford John. Biofiltration as an odour abatement strategy. Biochemical Engineering Journal. 5(2000): 231 – 242.
- Moosavi, G.R., Naddafi, K., Mesdaghinia, A., Vaezi, F., and Mahmoudi, M. H<sub>2</sub>S Removal In an Oxidative Packed Bed Scrubber Using Different Chemical Oxidants. Journal of Applied Sciences. 5(2005): 651 – 654.
- Occupational Safety & Health Administration. The appropriate method for assessing Hydrogen sulfide peak exposure levels [Online]. 1995. Available from: <http://www.osha.gov> [2007, June 12]
- Organic matter in soil. Natural Resources Conservation Service (NRCS) [Online]. Available from: <http://www.nrcs.usda.gov/feature/backyard/orgmtrsl.html> [2008, January 10]
- Rasi, S., Veijanen, A., and Rintala, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. Energy 2006.
- Ritvo Gad, Shitumbanuma Victor and Dixon, J.B. Soil solution sulfide control by two iron – oxide minerals in a submerged microcosm. Aquaculture. 239(2004): 217- 235.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Hydrogen sulfide [Online]. 2005. Available from : <http://www.epa.gov> [2005, January 21]
- Vernon, L. Snoeyink, “Adsorption of organic compounds,” in American water works association, water quality and treatment, pp. 791 – 797.
- Zicari, M.S. Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow manure compost. Master's Thesis, Graduate school, Cornell University, 2003.

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนและผลการทดสอบสมบัติดินลูกรัง

### 1. การทดสอบหาค่าความพรุนของตัวกลาง

1. ใส่ตัวอย่างลงในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับในกระบอกตวงคงที่ ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับปริมาตรที่ต้องการให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกกระบอกตวงใหม่จนกว่าจะได้ระดับคงที่ที่ตรงกับปริมาตรที่ต้องการ

2. บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวงเป็น  $X_0$

3. เติมน้ำลงในกระบอกตวงเพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่ช่องว่างภายในตัวกลาง โดยการกระแทกกันกระบอกตวง

4. เมื่อน้ำลงไปแทนที่ช่องว่างจนถึงปริมาตรที่ต้องการแล้วนำไปชั่งน้ำหนักเป็น  $X_1$

$$\text{ความพรุน (\%)} = \frac{(X_1 - X_0)}{\rho_w / \text{ปริมาตรที่เติม}} \times 100$$

โดย  $\rho_w = 996.99$  กรัมต่อลิตร

ปริมาตรที่ต้องการ = 0.01 ลิตร

ก.1 ความพรุนของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | ความพรุน<br>(ร้อยละ) | ความพรุนเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 123.5784        | 128.8013        | 52.2964              | 53.37                      |
| 2        | 123.3557        | 128.6859        | 53.4629              |                            |
| 3        | 123.4495        | 128.8682        | 54.3506              |                            |

ก.2 ความพรุนของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | ความพรุน<br>(ร้อยละ) | ความพรุนเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 122.9481        | 128.0020        | 50.6916              | 51.07                      |
| 2        | 122.7433        | 128.0410        | 53.1369              |                            |
| 3        | 123.2146        | 128.1392        | 49.3947              |                            |

ก.3 ความพรุนของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | ความพรุน<br>(ร้อยละ) | ความพรุนเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 87.2413         | 91.6910         | 44.6313              | 46.61                      |
| 2        | 87.0270         | 91.6170         | 46.0386              |                            |
| 3        | 86.5740         | 91.4760         | 49.1680              |                            |

ก.4 ความพรุนของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | ความพรุน<br>(ร้อยละ) | ความพรุนเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 85.5910         | 90.1770         | 45.9985              | 44.71                      |
| 2        | 85.7310         | 89.8680         | 41.4949              |                            |
| 3        | 85.6400         | 90.2890         | 46.6304              |                            |

## 2. การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวกลาง

1. อบตัวอย่างให้แห้งที่ 110 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์
2. ชั่งกระบอกตวง (10 มิลลิลิตร) บันทึกน้ำหนัก
3. ใส่ตัวอย่างในกระบอกตวงจนเกือบเต็ม กระแทกกันกระบอกตวงบนแผ่นยางจนกระทั่งระดับตัวอย่างในกระบอกตวงคงที่
4. ถ้าระดับที่คงที่ไม่เท่ากับ 10 มิลลิลิตร ให้ตักตัวอย่างเข้าหรือออกจากกระบอกตวงแล้วกระแทกกันกระบอกตวงใหม่ จนกว่าจะได้ระดับคงที่เป็น 10 มิลลิลิตร
5. บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างพร้อมกระบอกตวง

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = (\text{น้ำหนักก่อนใส่ดิน} - \text{น้ำหนักหลังใส่ดิน})/10$$

### ก.5 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | ก่อนใส่ดิน<br>(กรัม) | หลังใส่ดิน<br>(กรัม) | ความหนาแน่น<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | ความหนาแน่นเฉลี่ย<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) |
|----------|----------------------|----------------------|---|---|
| 1        | 31.8645              | 46.0435              | 1.4179  | 1.42  |
| 2        | 31.8695              | 46.0206              | 1.4151  |   |
| 3        | 31.8704              | 46.0534              | 1.4183  |   |

### ก.6 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | ก่อนใส่ดิน<br>(กรัม) | หลังใส่ดิน<br>(กรัม) | ความหนาแน่น<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | ความหนาแน่นเฉลี่ย<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) |
|----------|----------------------|----------------------|---|---|
| 1        | 31.8691              | 46.0136              | 1.4145  | 1.41  |
| 2        | 31.8744              | 46.0218              | 1.4147  |   |
| 3        | 31.8747              | 45.9964              | 1.4122  |   |

ก.7 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | ก่อนใส่ดิน<br>(กรัม) | หลังใส่ดิน<br>(กรัม) | ความหนาแน่น<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | ความหนาแน่นเฉลี่ย<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) |
|----------|----------------------|----------------------|---|---|
| 1        | 31.8666              | 45.3618              | 1.3495  | 1.35  |
| 2        | 31.8676              | 45.3358              | 1.3468  |   |
| 3        | 31.8679              | 45.4376              | 1.3570  |   |

ก.8 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | ก่อนใส่ดิน<br>(กรัม) | หลังใส่ดิน<br>(กรัม) | ความหนาแน่น<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | ความหนาแน่นเฉลี่ย<br>(กรัมต่อลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) |
|----------|----------------------|----------------------|---|---|
| 1        | 31.8684              | 44.8032              | 1.2935  | 1.29  |
| 2        | 31.8671              | 44.8070              | 1.2940  |   |
| 3        | 31.8676              | 44.8117              | 1.2944  |   |

### 3. การทดสอบหาค่าความชื้นของตัวกลาง

1. นำตัวอย่างทิ้งไว้สัมผัสอากาศ 10 ชั่วโมง
2. อบขวดซึ่งสารพร้อมฝา 120 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ บันทึกน้ำหนัก  $X_0$
3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดซึ่งสารพร้อมฝาจากข้อ 2. บันทึกน้ำหนัก  $X_1$
4. นำตัวอย่างจากข้อ 3. ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ บันทึกน้ำหนัก  $X_2$

$$\text{ค่าความชื้น(\%)} = ((X_1 - X_2)/(X_1 - X_0)) \times 100$$

#### ก.9 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | $X_2$<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 125.0588        | 126.0734        | 126.0628        | 1.0447               | 1.0285                     |
| 2        | 120.2497        | 121.3402        | 121.3291        | 1.0179               |                            |
| 3        | 126.1161        | 127.1523        | 127.1417        | 1.0230               |                            |

#### ก.10 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | $X_2$<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 126.8822        | 127.9409        | 127.9289        | 1.1335               | 1.1405                     |
| 2        | 124.0951        | 125.1418        | 125.1298        | 1.1465               |                            |
| 3        | 126.9040        | 127.9289        | 127.9172        | 1.1416               |                            |

#### ก.11 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ - ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | $X_2$<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 126.0634        | 127.0763        | 127.0665        | 0.9675               | 0.9633                     |
| 2        | 117.6122        | 118.6877        | 118.6774        | 0.9577               |                            |
| 3        | 120.3651        | 121.4017        | 121.3917        | 0.9647               |                            |

ก.12 ความหนาแน่นของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ – ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | $X_0$<br>(กรัม) | $X_1$<br>(กรัม) | $X_2$<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | ความชื้นเฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 1        | 126.0790        | 127.1198        | 127.1089        | 1.0473               | 1.0490                     |
| 2        | 124.4127        | 126.4511        | 126.4402        | 1.0497               |                            |
| 3        | 126.3185        | 127.3281        | 127.3175        | 1.0499               |                            |

#### 4. การทดสอบหาค่าความเป็นกรด – ต่างของตัวกลาง

1. ชั่งดินลูกรังประมาณ 10 กรัมใส่บีกเกอร์
2. เติมน้ำละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์ที่เตรียมไว้
3. ใช้แท่งแก้วคนแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. ใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด – ต่าง วัดค่าความเป็นกรด – ต่างของสารละลาย

#### ก.13 ความเป็นกรด – ต่าง

| แหล่งที่มา                  | ขนาด<br>(มิลลิเมตร) | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย |
|-----------------------------|---------------------|------------|------------|------------|-----------|
| ถนนสายอุดรธานี –<br>สกลนคร  | 2.36                | 5.77       | 5.72       | 5.74       | 5.74      |
|                             | 1.18                | 5.81       | 5.74       | 5.76       | 5.77      |
| ถนนสายท่าแร่ –<br>ศรีสงคราม | 2.36                | 5.61       | 5.59       | 5.65       | 5.62      |
|                             | 1.18                | 5.64       | 5.61       | 5.62       | 5.62      |



## 5. การทดสอบหาค่าอินทรีย์วัตถุในดิน (OM)

1. ชั่งดินลูกรังประมาณ 1 กรัมใส่บีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 1 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร คนด้วยแท่งแก้ว 1 นาทีแล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
3. เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดอซิฟอสฟอริกเข้มข้นปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วทิ้งให้เย็น
4. หยดไดฟีนิลลามีน อินดิเคเตอร์จำนวน 10 หยด แล้วไตเตรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 โมลาร์ จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีเขียว บันทึกปริมาตรที่ใช้

ค่าร้อยละอินทรีย์วัตถุในดิน หาได้จาก

$$M = 10/V_{\text{blank}}$$

$$\% \text{ Oxidizable organic carbon (w/w)} = ((V_{\text{blank}} - V_{\text{sample}}) \times 0.3 \times M) / Wt$$

$$\% \text{ Total organic carbon (w/w)} = 1.334 \times \% \text{ Oxidizable organic carbon}$$

$$\% \text{ Organic matter (w/w)} = 1.724 \times \% \text{ Total organic carbon}$$

โดย  $M$  = ค่าโมลาริตีของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

$V_{\text{blank}}$  = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)

$V_{\text{sample}}$  = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

$Wt$  = น้ำหนักของดิน (กรัม)

### ก.14 การไตเตรตของแบลงค์

| ครั้งที่ | ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร) | เฉลี่ย (มิลลิลิตร) | M    |
|----------|---------------------------|--------------------|------|
| 1        | 20.3                      | 20.35              | 0.49 |
| 2        | 20.4                      |                    |      |
| 3        | 20.35                     |                    |      |

ก.15 อินทรีย์วัตถุในดินของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | น้ำหนักดิน (กรัม) | ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร) | % OOC | % TOC | % OM  | OM เฉลี่ย (ร้อยละ) |
|----------|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 1        | 1.0132            | 20.05                     | 0.044 | 0.058 | 0.100 | 0.112              |
| 2        | 1.0109            | 20                        | 0.051 | 0.068 | 0.117 |                    |
| 3        | 1.0143            | 20                        | 0.051 | 0.068 | 0.117 |                    |

ก.16 อินทรีย์วัตถุในดินของดินลูกรังถนนสายอุดรธานี - สกลนคร ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | น้ำหนักดิน (กรัม) | ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร) | % OOC | % TOC | % OM  | OM เฉลี่ย (ร้อยละ) |
|----------|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 1        | 1.0112            | 20                        | 0.051 | 0.068 | 0.117 | 0.123              |
| 2        | 1.0122            | 19.95                     | 0.058 | 0.078 | 0.134 |                    |
| 3        | 1.0127            | 20                        | 0.051 | 0.068 | 0.117 |                    |

ก.17 อินทรีย์วัตถุในดินของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ - ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 2.36 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | น้ำหนักดิน (กรัม) | ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร) | % OOC | % TOC | % OM  | OM เฉลี่ย (ร้อยละ) |
|----------|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 1        | 1.0160            | 19.55                     | 0.116 | 0.155 | 0.267 | 0.279              |
| 2        | 1.0064            | 19.5                      | 0.125 | 0.166 | 0.286 |                    |
| 3        | 1.0137            | 19.5                      | 0.124 | 0.165 | 0.284 |                    |

ก.18 อินทรีย์วัตถุในดินของดินลูกรังถนนสายท่าแร่ - ศรีสงคราม ที่ขนาดเม็ดดิน 1.18 มิลลิเมตร

| ครั้งที่ | น้ำหนักดิน (กรัม) | ปริมาตรที่ใช้ (มิลลิลิตร) | % OOC | % TOC | % OM  | OM เฉลี่ย (ร้อยละ) |
|----------|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| 1        | 1.0236            | 19.2                      | 0.166 | 0.221 | 0.381 | 0.377              |
| 2        | 1.0097            | 19.25                     | 0.161 | 0.214 | 0.369 |                    |
| 3        | 1.0250            | 19.2                      | 0.165 | 0.221 | 0.380 |                    |

ภาคผนวก ข.

ผลการศึกษาดั้วกลางที่เหมาะสมในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

ข.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังไม่ฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 1/06/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 9                       | 0.013               | 83.93     | 0.03137  |
| 2        | 2/06/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 12                      | 0.017               | 78.57     | 0.26632  |
| 3        | 3/06/51  | 50                     | 0.070               | 59.05   | 17                      | 0.024               | 66.00     | 0.44254  |
| 4        | 4/06/51  | 50                     | 0.070               | 59.05   | 20                      | 0.028               | 60.00     | 0.60274  |
| 5        | 5/06/51  | 52                     | 0.072               | 61.41   | 23                      | 0.032               | 55.77     | 0.75759  |
| 6        | 6/06/51  | 52                     | 0.072               | 61.41   | 24                      | 0.033               | 53.85     | 0.90711  |
| 7        | 7/06/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 28                      | 0.039               | 48.15     | 1.04595  |
| 8        | 8/06/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 30                      | 0.042               | 46.43     | 1.18478  |
| 9        | 9/06/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 32                      | 0.044               | 42.86     | 1.31294  |
| 10       | 10/06/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 35                      | 0.049               | 37.50     | 1.42508  |
| 11       | 11/06/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 41                      | 0.057               | 26.79     | 1.50518  |
| 12       | 12/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 43                      | 0.060               | 20.37     | 1.56391  |
| 13       | 13/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 45                      | 0.063               | 16.67     | 1.61197  |
| 14       | 14/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 48                      | 0.067               | 11.11     | 1.64401  |
| 15       | 15/06/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 50                      | 0.070               | 3.85      | 1.65469  |
| 16       | 16/06/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 52                      | 0.072               | 0.00      | 1.65469  |

ข.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเพื่อที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 18/06/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.26699  |
| 2        | 19/06/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 2                       | 0.003               | 96.00     | 0.52330  |
| 3        | 20/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 14                      | 0.019               | 74.07     | 0.73690  |
| 4        | 21/06/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 18                      | 0.025               | 65.38     | 0.91846  |
| 5        | 22/06/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 19                      | 0.026               | 63.46     | 1.09467  |
| 6        | 23/06/51 | 51                     | 0.071               | 60.23   | 20                      | 0.028               | 60.78     | 1.26021  |
| 7        | 24/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 23                      | 0.032               | 57.41     | 1.42574  |
| 8        | 25/06/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 24                      | 0.033               | 52.00     | 1.56458  |
| 9        | 26/06/51 | 51                     | 0.071               | 60.23   | 25                      | 0.035               | 50.98     | 1.70342  |
| 10       | 27/06/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 26                      | 0.036               | 48.00     | 1.83157  |
| 11       | 28/06/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 28                      | 0.039               | 48.15     | 1.97041  |
| 12       | 29/06/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 31                      | 0.043               | 41.51     | 2.08789  |
| 13       | 30/06/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 37                      | 0.051               | 32.73     | 2.18401  |
| 14       | 1/07/51  | 52                     | 0.072               | 61.41   | 39                      | 0.054               | 25.00     | 2.25342  |
| 15       | 2/07/51  | 58                     | 0.081               | 68.50   | 43                      | 0.060               | 25.86     | 2.33352  |
| 16       | 3/07/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 46                      | 0.064               | 14.81     | 2.37624  |

ข.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่  | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|---------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |         | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 4/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 50                      | 0.070               | 5.66      | 2.39226  |
| 18       | 5/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 53                      | 0.074               | 0.00      | 2.39226  |

ข.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเพื่อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 7/07/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.29903  |
| 2        | 8/07/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.58738  |
| 3        | 9/07/51  | 53                     | 0.074               | 62.59   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.87040  |
| 4        | 10/07/51 | 51                     | 0.071               | 60.23   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.14273  |
| 5        | 11/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.44176  |
| 6        | 12/07/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.70876  |
| 7        | 13/07/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.98643  |
| 8        | 14/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 5                       | 0.007               | 91.07     | 2.25876  |
| 9        | 15/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 9                       | 0.013               | 84.21     | 2.51508  |
| 10       | 16/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 13                      | 0.018               | 76.79     | 2.74469  |
| 11       | 17/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 16                      | 0.022               | 70.37     | 2.94761  |
| 12       | 18/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 19                      | 0.026               | 66.07     | 3.14518  |
| 13       | 19/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 21                      | 0.029               | 61.11     | 3.32140  |
| 14       | 20/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 23                      | 0.032               | 57.41     | 3.48694  |
| 15       | 21/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 27                      | 0.038               | 52.63     | 3.64713  |
| 16       | 22/07/51 | 51                     | 0.071               | 60.23   | 29                      | 0.040               | 43.14     | 3.76461  |

ข.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเพื่อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 23/07/51 | 58                     | 0.081               | 68.50   | 33                      | 0.046               | 43.10     | 3.89811  |
| 18       | 24/07/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 35                      | 0.049               | 36.36     | 4.00490  |
| 19       | 25/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 39                      | 0.054               | 31.58     | 4.10102  |
| 20       | 26/07/51 | 58                     | 0.081               | 68.50   | 42                      | 0.058               | 27.59     | 4.18646  |
| 21       | 27/07/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 44                      | 0.061               | 20.00     | 4.24520  |
| 22       | 28/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 46                      | 0.064               | 14.81     | 4.28792  |
| 23       | 29/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 48                      | 0.067               | 9.43      | 4.31462  |
| 24       | 30/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 50                      | 0.070               | 7.41      | 4.33598  |
| 25       | 31/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 52                      | 0.072               | 7.14      | 4.35734  |
| 26       | 1/08/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 54                      | 0.075               | 0.00      | 4.35734  |



ข.4 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเพื่อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาตรตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|---|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |   |
| 1        | 7/07/51  | 57                     | 0.079               | 67.32   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.30437   |
| 2        | 8/07/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.59272   |
| 3        | 9/07/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.88108   |
| 4        | 10/07/51 | 51                     | 0.071               | 60.23   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.15341   |
| 5        | 11/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.45244   |
| 6        | 12/07/51 | 50                     | 0.070               | 59.05   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.71944   |
| 7        | 13/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.00245   |
| 8        | 14/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.30148   |
| 9        | 15/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.60586   |
| 10       | 16/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.90489   |
| 11       | 17/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.19324   |
| 12       | 18/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.49762   |
| 13       | 19/07/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.79131   |
| 14       | 20/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 4                       | 0.006               | 92.59     | 4.05830   |
| 15       | 21/07/51 | 56                     | 0.078               | 66.13   | 7                       | 0.010               | 87.50     | 4.31996   |
| 16       | 22/07/51 | 52                     | 0.072               | 61.41   | 10                      | 0.014               | 80.77     | 4.54423   |

ข.4 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 23/07/51 | 58                     | 0.081               | 68.50   | 12                      | 0.017               | 79.31     | 4.78987  |
| 18       | 24/07/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 15                      | 0.021               | 72.73     | 5.00346  |
| 19       | 25/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 18                      | 0.025               | 68.42     | 5.21172  |
| 20       | 26/07/51 | 58                     | 0.081               | 68.50   | 21                      | 0.029               | 63.79     | 5.40929  |
| 21       | 27/07/51 | 55                     | 0.076               | 64.95   | 23                      | 0.032               | 58.18     | 5.58017  |
| 22       | 28/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 25                      | 0.035               | 52.83     | 5.72969  |
| 23       | 29/07/51 | 53                     | 0.074               | 62.59   | 28                      | 0.039               | 47.17     | 5.86318  |
| 24       | 30/07/51 | 54                     | 0.075               | 63.77   | 31                      | 0.043               | 42.59     | 5.98600  |
| 25       | 31/07/51 | 57                     | 0.079               | 67.32   | 35                      | 0.049               | 38.60     | 6.10348  |
| 26       | 1/08/51  | 56                     | 0.078               | 66.13   | 39                      | 0.054               | 30.36     | 6.19425  |
| 27       | 2/08/51  | 53                     | 0.074               | 62.59   | 42                      | 0.058               | 20.75     | 6.25299  |
| 28       | 3/08/51  | 54                     | 0.075               | 63.77   | 45                      | 0.063               | 16.67     | 6.30105  |
| 29       | 4/08/51  | 55                     | 0.076               | 64.95   | 47                      | 0.065               | 14.55     | 6.34377  |
| 30       | 5/08/51  | 55                     | 0.076               | 64.95   | 49                      | 0.068               | 10.91     | 6.37581  |
| 31       | 6/08/51  | 53                     | 0.074               | 62.59   | 51                      | 0.071               | 3.77      | 6.38649  |
| 32       | 7/08/51  | 53                     | 0.074               | 62.59   | 53                      | 0.074               | 0.00      | 6.38649  |

ข.5 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังไม่เผาเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็นกรด - ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|--------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1         | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 1            | 1/06/51  | 5.55               | 5.50       | 5.53       | 5.53   |
| 4            | 4/06/51  | 5.37               | 5.39       | 5.42       | 5.39   |
| 7            | 7/06/51  | 5.22               | 5.28       | 5.27       | 5.26   |
| 9            | 9/06/51  | 5.21               | 5.15       | 5.17       | 5.18   |
| 11           | 11/06/51 | 5.11               | 5.10       | 5.07       | 5.09   |
| 13           | 13/06/51 | 5.02               | 4.99       | 5.00       | 5.00   |
| 15           | 15/06/51 | 4.94               | 4.91       | 4.90       | 4.92   |
| 16           | 16/06/51 | 4.85               | 4.89       | 4.87       | 4.87   |

ข.6 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 19/06/51 | 5.22                 | 5.18       | 5.24       | 5.21   |
| 5            | 22/06/51 | 5.15                 | 5.10       | 5.16       | 5.14   |
| 8            | 25/06/51 | 5.07                 | 5.02       | 5.03       | 5.04   |
| 10           | 27/06/51 | 4.93                 | 4.97       | 4.89       | 4.93   |
| 13           | 30/06/51 | 4.81                 | 4.87       | 4.82       | 4.83   |
| 16           | 3/07/51  | 4.68                 | 4.63       | 4.72       | 4.68   |
| 18           | 5/07/51  | 4.51                 | 4.51       | 4.56       | 4.53   |

ข.7 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมีมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 8/07/51  | 5.99                 | 5.92       | 5.90       | 5.94   |
| 5            | 11/07/51 | 5.72                 | 5.83       | 5.82       | 5.79   |
| 8            | 14/07/51 | 5.70                 | 5.83       | 5.80       | 5.78   |
| 11           | 17/07/51 | 5.67                 | 5.65       | 5.67       | 5.66   |
| 14           | 20/07/51 | 5.41                 | 5.43       | 5.42       | 5.42   |
| 17           | 23/07/51 | 5.59                 | 5.56       | 5.53       | 5.56   |
| 20           | 26/07/51 | 5.30                 | 5.38       | 5.35       | 5.34   |
| 23           | 29/07/51 | 5.26                 | 5.34       | 5.28       | 5.29   |
| 26           | 1/08/51  | 5.05                 | 4.99       | 5.06       | 5.03   |

ข.8 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 8/07/51  | 6.00                 | 5.96       | 5.96       | 5.97   |
| 5            | 11/07/51 | 6.06                 | 6.07       | 6.15       | 6.09   |
| 8            | 14/07/51 | 6.17                 | 6.20       | 6.22       | 6.20   |
| 11           | 17/07/51 | 6.32                 | 6.30       | 6.35       | 6.32   |
| 14           | 20/07/51 | 6.31                 | 6.40       | 6.32       | 6.34   |
| 17           | 23/07/51 | 6.25                 | 6.17       | 6.19       | 6.20   |
| 20           | 26/07/51 | 6.19                 | 6.27       | 6.25       | 6.24   |
| 23           | 29/07/51 | 5.87                 | 5.95       | 5.86       | 5.89   |
| 26           | 1/08/51  | 5.48                 | 5.52       | 5.55       | 5.52   |
| 29           | 4/08/51  | 5.55                 | 5.48       | 5.41       | 5.48   |
| 31           | 6/08/51  | 5.34                 | 5.21       | 5.18       | 5.24   |
| 32           | 7/08/51  | 4.94                 | 5.02       | 4.92       | 4.96   |

ข.9 อินทรีย์วัตถุของดินลูกรังไม่เผาเชื้อ ที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | ปริมาณ FAS ที่ใช้<br>(ml) | M    | % OOC | %TOC  | %OM   | ค่าเฉลี่ย |
|----------|----------|----------|----------------------|---------------------------|------|-------|-------|-------|-----------|
| 2        | 2/06/51  | 1        | 1.0007               | 21.5                      | 0.46 | 0.041 | 0.055 | 0.095 | 0.032     |
|          |          | 2        | 1.0023               | 21.8                      |      | 0     | 0     | 0     |           |
|          |          | 3        | 1.0004               | 21.8                      |      | 0     | 0     | 0     |           |
| 4        | 4/06/51  | 1        | 1.0020               | 21.8                      | 0.46 | 0     | 0     | 0     | 0.032     |
|          |          | 2        | 1.0099               | 21.7                      |      | 0.014 | 0.018 | 0.031 |           |
|          |          | 3        | 1.0005               | 21.6                      |      | 0.028 | 0.037 | 0.063 |           |
| 7        | 7/06/51  | 1        | 0.9999               | 22.2                      | 0.45 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.103     |
|          |          | 2        | 1.0035               | 21.8                      |      | 0.054 | 0.072 | 0.124 |           |
|          |          | 3        | 1.0015               | 21.6                      |      | 0.081 | 0.108 | 0.186 |           |
| 9        | 9/06/51  | 1        | 1.0041               | 20.0                      | 0.5  | 0     | 0     | 0     | 0.115     |
|          |          | 2        | 1.0004               | 20.0                      |      | 0     | 0     | 0     |           |
|          |          | 3        | 1.0023               | 19.0                      |      | 0.150 | 0.200 | 0.344 |           |
| 11       | 11/06/51 | 1        | 1.0199               | 19.9                      | 0.5  | 0.015 | 0.020 | 0.034 | 0.045     |
|          |          | 2        | 1.0188               | 19.9                      |      | 0.015 | 0.020 | 0.034 |           |
|          |          | 3        | 1.0108               | 19.8                      |      | 0.030 | 0.040 | 0.068 |           |

ข.9 อินทรีย์วัตถุของดินลูกรังไม่เผาเชื้อ ที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | ปริมาณ FAS ที่ใช้<br>(ml) | M    | % OOC | %TOC  | %OM   | ค่าเฉลี่ย |
|----------|----------|----------|----------------------|---------------------------|------|-------|-------|-------|-----------|
| 13       | 13/06/51 | 1        | 1.0148               | 20.0                      | 0.5  | 0.030 | 0.039 | 0.068 | 0.057     |
|          |          | 2        | 1.0106               | 20.0                      |      | 0.030 | 0.040 | 0.068 |           |
|          |          | 3        | 0.9998               | 20.1                      |      | 0.015 | 0.020 | 0.035 |           |
| 15       | 15/06/51 | 1        | 1.0230               | 20.9                      | 0.48 | 0.014 | 0.019 | 0.032 | 0.076     |
|          |          | 2        | 1.0358               | 20.7                      |      | 0.042 | 0.056 | 0.096 |           |
|          |          | 3        | 1.0042               | 20.7                      |      | 0.043 | 0.057 | 0.099 |           |
| 16       | 16/06/51 | 1        | 1.0257               | 20.8                      | 0.48 | 0.028 | 0.037 | 0.065 | 0.065     |
|          |          | 2        | 1.0147               | 20.7                      |      | 0.043 | 0.057 | 0.098 |           |
|          |          | 3        | 1.0034               | 20.9                      |      | 0.014 | 0.019 | 0.033 |           |



ข.10 อินทรีย์วัตถุของดินลูกรังฆ่าเชื้อ ที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

|    |          |   |        |      |      |       |       |       |       |
|----|----------|---|--------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 3  | 20/06/51 | 1 | 1.0322 | 20.1 | 0.5  | 0     | 0     | 0     | 0.022 |
|    |          | 2 | 1.0440 | 20.0 |      | 0.014 | 0.019 | 0.033 |       |
|    |          | 3 | 1.0145 | 20.0 |      | 0.015 | 0.020 | 0.034 |       |
| 6  | 23/06/51 | 1 | 1.0176 | 19.9 | 0.5  | 0.029 | 0.039 | 0.068 | 0.034 |
|    |          | 2 | 1.0264 | 20.0 |      | 0.015 | 0.019 | 0.034 |       |
|    |          | 3 | 1.0070 | 20.1 |      | 0     | 0     | 0     |       |
| 10 | 27/06/51 | 1 | 1.0043 | 20.6 | 0.48 | 0.014 | 0.019 | 0.033 | 0.055 |
|    |          | 2 | 1.0254 | 20.5 |      | 0.028 | 0.037 | 0.065 |       |
|    |          | 3 | 1.0033 | 20.5 |      | 0.029 | 0.038 | 0.066 |       |
| 14 | 1/07/51  | 1 | 1.0555 | 20.7 | 0.48 | 0.014 | 0.018 | 0.031 | 0.043 |
|    |          | 2 | 1.0054 | 20.7 |      | 0.014 | 0.019 | 0.033 |       |
|    |          | 3 | 1.0102 | 20.6 |      | 0.029 | 0.038 | 0.066 |       |
| 16 | 3/07/51  | 1 | 1.0106 | 20.5 | 0.48 | 0.014 | 0.019 | 0.033 | 0.065 |
|    |          | 2 | 1.0207 | 20.4 |      | 0.028 | 0.038 | 0.065 |       |
|    |          | 3 | 1.0328 | 20.3 |      | 0.042 | 0.056 | 0.096 |       |

ข.10 อินทรีย์วัตถุของดินลูกรังฆ่าเชื้อ ที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่  | ครั้งที่ | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | ปริมาณ FAS ที่ใช้<br>(ml) | M    | % OOC | %TOC  | %OM   | ค่าเฉลี่ย |
|----------|---------|----------|----------------------|---------------------------|------|-------|-------|-------|-----------|
| 17       | 4/07/51 | 1        | 1.0111               | 21.0                      | 0.47 | 0.028 | 0.037 | 0.064 | 0.064     |
|          |         | 2        | 1.0174               | 21.0                      |      | 0.028 | 0.037 | 0.064 |           |
|          |         | 3        | 1.0083               | 21.0                      |      | 0.028 | 0.037 | 0.064 |           |
| 18       | 5/07/51 | 1        | 1.0053               | 21.5                      | 0.46 | 0.014 | 0.018 | 0.032 | 0.041     |
|          |         | 2        | 1.0283               | 21.5                      |      | 0.013 | 0.018 | 0.031 |           |
|          |         | 3        | 1.0544               | 21.4                      |      | 0.026 | 0.035 | 0.060 |           |

ข.11 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังไม่ฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของ<br>ตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|---|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.2 เมตร | ผลที่ได้ |   |
| 3        | 3/06/51  | 1.7                    | 0.5             | 1.2      | 0.3                                     |
| 5        | 5/06/51  | 1.5                    | 0.3             | 1.2      | 0.5                                     |
| 8        | 8/06/51  | 1.5                    | 0.4             | 1.1      | 0.9                                     |
| 11       | 11/06/51 | 1.5                    | 0.5             | 1.0      | 1.2                                     |
| 14       | 14/06/51 | 1.4                    | 0.4             | 1.0      | 1.6                                     |
| 16       | 16/06/51 | 1.4                    | 0.4             | 1.0      | 2.0                                     |

ข.12 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังที่ฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของ<br>ตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|---|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.2 เมตร | ผลที่ได้ |   |
| 2        | 19/06/51 | 2.0                    | 0.9             | 1.1      | 0.2                                     |
| 4        | 21/06/51 | 2.0                    | 0.8             | 1.2      | 0.5                                     |
| 7        | 24/06/51 | 1.9                    | 0.9             | 1.0      | 0.9                                     |
| 9        | 26/06/51 | 2.0                    | 0.8             | 1.2      | 1.2                                     |
| 12       | 29/06/51 | 1.8                    | 0.7             | 1.1      | 1.6                                     |
| 15       | 2/07/51  | 1.9                    | 0.9             | 1.0      | 2.0                                     |
| 18       | 5/07/51  | 1.9                    | 0.9             | 1.0      | 2.5                                     |

ข.13 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวล  
ที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของ<br>ตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|---|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.2 เมตร | ผลที่ได้ |   |
| 3        | 9/07/51  | 3.8                    | 3.0             | 0.8      | 0.4                                     |
| 6        | 12/07/51 | 4.6                    | 3.8             | 0.8      | 0.8                                     |
| 9        | 15/07/51 | 4.1                    | 3.0             | 1.1      | 1.3                                     |
| 12       | 18/07/51 | 4.2                    | 3.2             | 1.0      | 1.7                                     |
| 15       | 21/07/51 | 4.3                    | 3.3             | 1.0      | 2.1                                     |
| 18       | 24/07/51 | 4.1                    | 3.0             | 1.1      | 2.4                                     |
| 21       | 27/07/51 | 4.1                    | 3.1             | 1.0      | 2.9                                     |
| 24       | 30/07/51 | 4.1                    | 3.0             | 1.1      | 3.3                                     |
| 26       | 1/08/51  | 4.1                    | 3.0             | 1.1      | 3.7                                     |

ข.14 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล  
ที่ความลึก 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของ<br>ตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|---|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.2 เมตร | ผลที่ได้ |   |
| 3        | 9/07/51  | 3.4                    | 2.9             | 0.5      | 0.4                                     |
| 6        | 12/07/51 | 3.9                    | 3.4             | 0.5      | 0.9                                     |
| 9        | 15/07/51 | 3.8                    | 3.3             | 0.5      | 1.3                                     |
| 12       | 18/07/51 | 2.6                    | 1.7             | 0.9      | 1.7                                     |
| 15       | 21/07/51 | 4.1                    | 3.3             | 0.8      | 2.2                                     |
| 18       | 24/07/51 | 3.7                    | 2.7             | 1.0      | 2.5                                     |
| 21       | 27/07/51 | 3.8                    | 2.9             | 0.9      | 2.8                                     |
| 24       | 30/07/51 | 3.7                    | 2.8             | 0.9      | 3.1                                     |
| 26       | 1/08/51  | 2.9                    | 1.8             | 1.1      | 3.5                                     |
| 28       | 3/08/51  | 3.3                    | 2.1             | 1.2      | 3.8                                     |
| 30       | 5/08/51  | 2.9                    | 1.8             | 1.1      | 4.2                                     |
| 32       | 7/08/51  | 2.2                    | 1               | 1.2      | 4.7                                     |

ข.15 ความชื้นของดินลูกรังไม่ฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 3/06/51  | 1        | 50.7290          | 1.0073               | 51.7363                    | 51.7211                    | 1.509                | 1.481              |
|          |          | 2        | 49.1165          | 1.0091               | 50.1256                    | 50.1109                    | 1.457                |                    |
|          |          | 3        | 50.5463          | 1.0148               | 51.5611                    | 51.5461                    | 1.478                |                    |
| 7        | 7/06/51  | 1        | 49.8347          | 1.0019               | 50.8366                    | 50.8206                    | 1.597                | 1.542              |
|          |          | 2        | 57.5732          | 1.0025               | 58.5757                    | 58.5614                    | 1.426                |                    |
|          |          | 3        | 50.7080          | 1.0055               | 51.7135                    | 51.6974                    | 1.601                |                    |
| 9        | 9/06/51  | 1        | 50.5502          | 1.0047               | 51.5549                    | 51.5392                    | 1.563                | 1.566              |
|          |          | 2        | 57.3111          | 1.0051               | 58.3162                    | 58.3008                    | 1.532                |                    |
|          |          | 3        | 49.8980          | 0.9971               | 50.8951                    | 50.8791                    | 1.605                |                    |
| 11       | 11/06/51 | 1        | 50.5258          | 1.0134               | 51.5392                    | 51.5232                    | 1.579                | 1.556              |
|          |          | 2        | 50.7491          | 1.0098               | 51.7589                    | 51.7429                    | 1.584                |                    |
|          |          | 3        | 49.2374          | 0.9839               | 50.2213                    | 50.2065                    | 1.504                |                    |
| 13       | 13/06/51 | 1        | 57.3954          | 1.0056               | 58.4010                    | 58.3847                    | 1.621                | 1.652              |
|          |          | 2        | 50.9936          | 1.0138               | 52.0074                    | 51.9904                    | 1.677                |                    |
|          |          | 3        | 50.5100          | 0.9959               | 51.5059                    | 51.4894                    | 1.657                |                    |

ข.15 ความชื้นของดินลูกรังไม่เผาเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 15       | 15/06/51 | 1        | 50.5147          | 1.0094               | 51.5241                    | 51.5067                    | 1.724                | 1.762              |
|          |          | 2        | 50.5156          | 1.0075               | 51.5231                    | 51.5043                    | 1.866                |                    |
|          |          | 3        | 49.8194          | 1.0192               | 50.8386                    | 50.8213                    | 1.697                |                    |
| 16       | 16/06/51 | 1        | 50.3782          | 1.0076               | 51.3858                    | 51.3672                    | 1.846                | 1.835              |
|          |          | 2        | 50.4680          | 1.0237               | 51.4917                    | 51.4734                    | 1.788                |                    |
|          |          | 3        | 50.9426          | 1.0152               | 51.9578                    | 51.9388                    | 1.872                |                    |



ข.16 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 20/06/51 | 1        | 50.5092          | 1.0051               | 51.5143                    | 51.5011                    | 1.313                | 1.371              |
|          |          | 2        | 49.2680          | 1.0009               | 50.2689                    | 50.2553                    | 1.359                |                    |
|          |          | 3        | 50.6627          | 1.0197               | 51.6824                    | 51.6677                    | 1.442                |                    |
| 6        | 23/06/51 | 1        | 50.4597          | 1.0246               | 51.4843                    | 51.4694                    | 1.454                | 1.456              |
|          |          | 2        | 50.5794          | 1.0227               | 51.6021                    | 51.5875                    | 1.428                |                    |
|          |          | 3        | 57.4931          | 1.0223               | 58.5154                    | 58.5002                    | 1.487                |                    |
| 10       | 27/06/51 | 1        | 50.5549          | 1.0074               | 51.5623                    | 51.5475                    | 1.469                | 1.452              |
|          |          | 2        | 51.0256          | 1.0129               | 52.0385                    | 52.0239                    | 1.441                |                    |
|          |          | 3        | 50.4718          | 1.0040               | 51.4758                    | 51.4613                    | 1.444                |                    |
| 12       | 29/06/51 | 1        | 57.6055          | 1.0245               | 58.6300                    | 58.6143                    | 1.532                | 1.544              |
|          |          | 2        | 50.5954          | 1.0195               | 51.6149                    | 51.5988                    | 1.579                |                    |
|          |          | 3        | 49.1160          | 1.0062               | 50.1222                    | 50.1069                    | 1.521                |                    |
| 16       | 3/07/51  | 1        | 50.5186          | 1.0223               | 51.5409                    | 51.5236                    | 1.692                | 1.724              |
|          |          | 2        | 51.0159          | 1.0034               | 52.0193                    | 52.0023                    | 1.694                |                    |
|          |          | 3        | 50.4590          | 1.0199               | 51.4789                    | 51.4607                    | 1.784                |                    |

ข.16 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่  | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|---------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 18       | 5/07/51 | 1        | 50.5092          | 1.0051               | 51.5143                    | 51.4961                    | 1.811                | 1.867              |
|          |         | 2        | 49.2680          | 1.0009               | 50.2689                    | 50.2503                    | 1.858                |                    |
|          |         | 3        | 50.6627          | 1.0197               | 51.6824                    | 51.6627                    | 1.932                |                    |

ข.17 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมีมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 9/07/51  | 1        | 50.5598          | 1.0089               | 51.5687                    | 51.5523                    | 1.626                | 1.631              |
|          |          | 2        | 49.0146          | 1.0222               | 50.0368                    | 50.0202                    | 1.624                |                    |
|          |          | 3        | 57.3504          | 0.9672               | 58.3176                    | 58.3017                    | 1.644                |                    |
| 6        | 12/07/51 | 1        | 49.1058          | 1.0369               | 50.1427                    | 50.1257                    | 1.640                | 1.679              |
|          |          | 2        | 50.6350          | 1.0031               | 51.6381                    | 51.6205                    | 1.755                |                    |
|          |          | 3        | 50.4201          | 1.0038               | 51.4239                    | 51.4074                    | 1.644                |                    |
| 9        | 15/07/51 | 1        | 101.3211         | 1.0091               | 102.3302                   | 102.3121                   | 1.794                | 1.725              |
|          |          | 2        | 50.5011          | 1.0528               | 51.5539                    | 51.5355                    | 1.748                |                    |
|          |          | 3        | 50.3738          | 1.0408               | 51.4146                    | 51.3976                    | 1.633                |                    |
| 12       | 18/07/51 | 1        | 34.5620          | 1.0240               | 35.586                     | 35.5690                    | 1.660                | 1.699              |
|          |          | 2        | 49.6874          | 1.0048               | 50.6922                    | 50.6747                    | 1.742                |                    |
|          |          | 3        | 50.0120          | 1.0026               | 51.0146                    | 50.9976                    | 1.696                |                    |
| 15       | 21/07/51 | 1        | 107.5659         | 1.0037               | 108.5696                   | 108.5509                   | 1.863                | 1.798              |
|          |          | 2        | 50.8686          | 1.0195               | 51.8881                    | 51.8703                    | 1.746                |                    |
|          |          | 3        | 50.0359          | 1.0034               | 51.0393                    | 51.0214                    | 1.784                |                    |

ข.17 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 10 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 18       | 24/07/51 | 1        | 105.5164         | 1.0249               | 106.5413                   | 106.5213                   | 1.951                | 1.884              |
|          |          | 2        | 50.4354          | 1.0460               | 51.4814                    | 51.4624                    | 1.816                |                    |
|          |          | 3        | 102.5712         | 1.0186               | 103.5898                   | 103.5706                   | 1.885                |                    |
| 21       | 27/07/51 | 1        | 102.1957         | 1.0063               | 103.202                    | 103.1844                   | 1.749                | 1.822              |
|          |          | 2        | 57.5380          | 1.0311               | 58.5691                    | 58.5498                    | 1.872                |                    |
|          |          | 3        | 50.4022          | 1.0305               | 51.4327                    | 51.4137                    | 1.844                |                    |
| 24       | 30/07/51 | 1        | 100.6751         | 1.0051               | 101.6802                   | 101.6618                   | 1.831                | 1.861              |
|          |          | 2        | 102.5060         | 1.0056               | 103.5116                   | 103.4927                   | 1.879                |                    |
|          |          | 3        | 34.6638          | 1.0147               | 35.6785                    | 35.6595                    | 1.872                |                    |
| 26       | 1/08/51  | 1        | 112.8653         | 1.0548               | 113.9201                   | 113.8992                   | 1.981                | 1.979              |
|          |          | 2        | 106.5733         | 1.0255               | 107.5988                   | 107.5788                   | 1.950                |                    |
|          |          | 3        | 50.4725          | 1.0326               | 51.5051                    | 51.4844                    | 2.005                |                    |

ข.18 ความชื้นของดินลูกรังซำเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 9/07/51  | 1        | 34.7123          | 1.0144               | 35.7267                    | 35.7099                    | 1.656                | 1.660              |
|          |          | 2        | 50.3543          | 1.0638               | 51.4181                    | 51.4008                    | 1.626                |                    |
|          |          | 3        | 50.4472          | 1.0729               | 51.5201                    | 51.5019                    | 1.696                |                    |
| 6        | 12/07/51 | 1        | 50.4720          | 1.0114               | 51.4834                    | 51.4661                    | 1.711                | 1.686              |
|          |          | 2        | 50.9648          | 1.0169               | 51.9817                    | 51.9644                    | 1.701                |                    |
|          |          | 3        | 34.6637          | 1.0019               | 35.6656                    | 35.6491                    | 1.647                |                    |
| 9        | 15/07/51 | 1        | 50.9162          | 1.0268               | 51.9430                    | 51.9251                    | 1.743                | 1.749              |
|          |          | 2        | 50.5921          | 1.0046               | 51.5967                    | 51.5794                    | 1.722                |                    |
|          |          | 3        | 57.6395          | 1.0152               | 58.6547                    | 58.6366                    | 1.783                |                    |
| 12       | 18/07/51 | 1        | 50.3109          | 1.0116               | 51.3225                    | 51.3046                    | 1.769                | 1.768              |
|          |          | 2        | 57.4772          | 1.0109               | 58.4881                    | 58.4705                    | 1.741                |                    |
|          |          | 3        | 105.2475         | 1.0144               | 106.2619                   | 106.2437                   | 1.794                |                    |
| 15       | 21/07/51 | 1        | 105.1531         | 1.0082               | 106.1613                   | 106.1435                   | 1.766                | 1.785              |
|          |          | 2        | 57.4390          | 1.0120               | 58.4510                    | 58.4327                    | 1.808                |                    |
|          |          | 3        | 50.5650          | 1.0048               | 51.5698                    | 51.5519                    | 1.781                |                    |

ข.18 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 18       | 24/07/51 | 1        | 112.9406         | 1.0135               | 113.9541                   | 113.9352                   | 1.865                | 1.879              |
|          |          | 2        | 49.8786          | 1.0266               | 50.9052                    | 50.8858                    | 1.890                |                    |
|          |          | 3        | 34.7368          | 1.0418               | 35.7786                    | 35.7590                    | 1.881                |                    |
| 21       | 27/07/51 | 1        | 105.1065         | 1.0056               | 106.1121                   | 106.0935                   | 1.850                | 1.838              |
|          |          | 2        | 50.9135          | 1.0081               | 51.9216                    | 51.9034                    | 1.805                |                    |
|          |          | 3        | 50.1617          | 1.0484               | 51.2101                    | 51.1906                    | 1.860                |                    |
| 24       | 30/07/51 | 1        | 57.4866          | 1.0148               | 58.5014                    | 58.4823                    | 1.882                | 1.867              |
|          |          | 2        | 107.8457         | 1.0024               | 108.8481                   | 108.8293                   | 1.875                |                    |
|          |          | 3        | 50.0803          | 0.9983               | 51.0786                    | 51.0602                    | 1.843                |                    |
| 27       | 2/08/51  | 1        | 102.1775         | 1.0180               | 103.1955                   | 103.1761                   | 1.906                | 1.913              |
|          |          | 2        | 50.9509          | 1.0044               | 51.9553                    | 51.9364                    | 1.882                |                    |
|          |          | 3        | 50.3539          | 1.0294               | 51.3833                    | 51.3632                    | 1.953                |                    |
| 30       | 5/08/51  | 1        | 50.3350          | 1.0248               | 51.3598                    | 51.3402                    | 1.913                | 1.949              |
|          |          | 2        | 106.6381         | 1.0191               | 107.6572                   | 107.6373                   | 1.953                |                    |
|          |          | 3        | 105.1355         | 1.0139               | 106.1494                   | 106.1293                   | 1.982                |                    |

ข.18 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.2 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่  | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|---------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 31       | 6/08/51 | 1        | 106.4796         | 1.0319               | 107.5115                   | 107.4914                   | 1.948                | 1.952              |
|          |         | 2        | 106.6744         | 1.0159               | 107.6903                   | 107.6708                   | 1.919                |                    |
|          |         | 3        | 50.3303          | 0.9960               | 51.3263                    | 51.3065                    | 1.988                |                    |
| 32       | 7/08/51 | 1        | 49.5347          | 1.0094               | 50.5441                    | 50.5244                    | 1.952                | 1.985              |
|          |         | 2        | 47.6603          | 1.0265               | 48.6868                    | 48.6670                    | 1.929                |                    |
|          |         | 3        | 112.8782         | 1.0117               | 113.8899                   | 113.8689                   | 2.076                |                    |

ภาคผนวก ค.

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดที่ระยะความลึกต่างๆ กัน



ค.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 30/08/51 | 55                     | 0.076               | 43.30   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.29369  |
| 2        | 31/08/51 | 52                     | 0.072               | 40.94   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.57136  |
| 3        | 1/09/51  | 54                     | 0.075               | 42.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.85972  |
| 4        | 2/09/51  | 55                     | 0.076               | 43.30   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.15341  |
| 5        | 3/09/51  | 53                     | 0.074               | 41.73   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.43642  |
| 6        | 4/09/51  | 52                     | 0.072               | 40.94   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.71410  |
| 7        | 5/09/51  | 56                     | 0.078               | 44.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.01313  |
| 8        | 6/09/51  | 54                     | 0.075               | 42.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.30148  |
| 9        | 7/09/51  | 53                     | 0.074               | 41.73   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.58450  |
| 10       | 8/09/51  | 56                     | 0.078               | 44.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.88353  |
| 11       | 9/09/51  | 53                     | 0.074               | 41.73   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.16654  |
| 12       | 10/09/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.45490  |
| 13       | 11/09/51 | 57                     | 0.079               | 44.88   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.75927  |
| 14       | 12/09/51 | 56                     | 0.078               | 44.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.05830  |
| 15       | 13/09/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.34132  |
| 16       | 14/09/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.62433  |

ค.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 15/09/51 | 58                     | 0.081               | 45.66   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.93404  |
| 18       | 16/09/51 | 52                     | 0.072               | 40.94   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.21172  |
| 19       | 17/09/51 | 57                     | 0.079               | 44.88   | 2                       | 0                   | 96.49     | 5.50541  |
| 20       | 18/09/51 | 51                     | 0.071               | 40.15   | 2                       | 0.003               | 96.08     | 5.76706  |
| 21       | 19/09/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 2                       | 0.003               | 96.23     | 6.03940  |
| 22       | 20/09/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 2                       | 0.003               | 96.23     | 6.31173  |
| 23       | 21/09/51 | 50                     | 0.070               | 39.37   | 4                       | 0.006               | 92.00     | 6.55737  |
| 24       | 22/09/51 | 51                     | 0.071               | 40.15   | 6                       | 0.008               | 88.24     | 6.79766  |
| 25       | 23/09/51 | 55                     | 0.076               | 43.30   | 8                       | 0.011               | 85.45     | 7.04863  |
| 26       | 24/09/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 9                       | 0.013               | 83.33     | 7.28893  |
| 27       | 25/09/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 10                      | 0.014               | 81.13     | 7.51854  |
| 28       | 26/09/51 | 57                     | 0.079               | 44.88   | 11                      | 0.015               | 80.70     | 7.76418  |
| 29       | 27/09/51 | 50                     | 0.070               | 39.37   | 11                      | 0.015               | 78.00     | 7.97243  |
| 30       | 28/09/51 | 50                     | 0.070               | 39.37   | 12                      | 0.017               | 76.00     | 8.17535  |
| 31       | 29/09/51 | 52                     | 0.072               | 40.94   | 14                      | 0.019               | 73.08     | 8.37826  |
| 32       | 30/09/51 | 50                     | 0.070               | 39.37   | 16                      | 0.022               | 68.00     | 8.55982  |

ค.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 33       | 1/10/51  | 51                     | 0.071               | 40.15   | 17                      | 0.024               | 66.67     | 8.74138  |
| 34       | 2/10/51  | 51                     | 0.071               | 40.15   | 20                      | 0.028               | 60.78     | 8.90691  |
| 35       | 3/10/51  | 54                     | 0.075               | 42.51   | 22                      | 0.031               | 59.26     | 9.07779  |
| 36       | 4/10/51  | 54                     | 0.075               | 42.51   | 24                      | 0.033               | 55.56     | 9.23798  |
| 37       | 5/10/51  | 54                     | 0.075               | 42.51   | 25                      | 0.035               | 53.70     | 9.39284  |
| 38       | 6/10/51  | 55                     | 0.076               | 43.30   | 26                      | 0.036               | 52.73     | 9.54770  |
| 39       | 7/10/51  | 53                     | 0.074               | 41.73   | 27                      | 0.038               | 49.06     | 9.68653  |
| 40       | 8/10/51  | 56                     | 0.078               | 44.09   | 27                      | 0.038               | 51.79     | 9.84139  |
| 41       | 9/10/51  | 56                     | 0.078               | 44.09   | 29                      | 0.040               | 48.21     | 9.98557  |
| 42       | 10/10/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 30                      | 0.042               | 44.44     | 10.11372   |
| 43       | 11/10/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 31                      | 0.043               | 41.51     | 10.23120   |
| 44       | 12/10/51 | 52                     | 0.072               | 40.94   | 32                      | 0.044               | 38.46     | 10.33800   |
| 45       | 13/10/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 35                      | 0.049               | 35.19     | 10.43946   |
| 46       | 14/10/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 38                      | 0.053               | 29.63     | 10.52489   |
| 47       | 15/10/51 | 52                     | 0.072               | 40.94   | 40                      | 0.056               | 23.08     | 10.58897   |
| 48       | 16/10/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 41                      | 0.057               | 22.64     | 10.65305   |

ค.1 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 49       | 17/10/51 | 55                     | 0.076               | 43.30   | 43                      | 0.060               | 21.82     | 10.71713   |
| 50       | 18/10/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 45                      | 0.063               | 15.09     | 10.75985   |
| 51       | 19/10/51 | 51                     | 0.071               | 40.15   | 46                      | 0.064               | 9.80      | 10.78655   |
| 52       | 20/10/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 48                      | 0.067               | 11.11     | 10.81859   |
| 53       | 21/10/51 | 54                     | 0.075               | 42.51   | 50                      | 0.070               | 7.41      | 10.83995   |
| 54       | 22/10/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 52                      | 0.072               | 1.89      | 10.84529   |
| 55       | 23/10/51 | 53                     | 0.074               | 41.73   | 53                      | 0.074               | 0.00      | 10.84529   |

ค.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับ<br>ได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อ<br>กรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 31/08/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.28301  |
| 2        | 1/09/51  | 53                     | 0.074               | 31.30   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.56602  |
| 3        | 2/09/51  | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.85972  |
| 4        | 3/09/51  | 56                     | 0.078               | 33.07   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.15875  |
| 5        | 4/09/51  | 57                     | 0.079               | 33.66   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.46312  |
| 6        | 5/09/51  | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.75682  |
| 7        | 6/09/51  | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.04517  |
| 8        | 7/09/51  | 53                     | 0.074               | 31.30   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.32818  |
| 9        | 8/09/51  | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.62188  |
| 10       | 9/09/51  | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.91023  |
| 11       | 10/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.19858  |
| 12       | 11/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.48694  |
| 13       | 12/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.77529  |
| 14       | 13/09/51 | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.06898  |
| 15       | 14/09/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.33598  |
| 16       | 15/09/51 | 52                     | 0.072               | 30.71   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.61365  |

ค.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 15/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.90200  |
| 18       | 16/09/51 | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.19570  |
| 19       | 17/09/51 | 55                     | 0.076               | 32.48   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.48939  |
| 20       | 18/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.77774  |
| 21       | 19/09/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.07678  |
| 22       | 20/09/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.37581  |
| 23       | 21/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.66416  |
| 24       | 22/09/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.95252  |
| 25       | 23/09/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 0                       | 0                   | 100.00    | 7.25155  |
| 26       | 24/09/51 | 57                     | 0.079               | 33.66   | 2                       | 0.003               | 96.49     | 7.54524  |
| 27       | 25/09/51 | 55                     | 0.076               | 32.48   | 3                       | 0.004               | 94.55     | 7.82292  |
| 28       | 26/09/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 4                       | 0.006               | 92.45     | 8.08457  |
| 29       | 27/09/51 | 52                     | 0.072               | 30.71   | 5                       | 0.007               | 90.38     | 8.33554  |
| 30       | 28/09/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 7                       | 0.010               | 86.79     | 8.58118  |
| 31       | 29/09/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 8                       | 0.011               | 84.00     | 8.80545  |
| 32       | 30/09/51 | 51                     | 0.071               | 30.11   | 10                      | 0.014               | 80.39     | 9.02439  |

ค.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 33       | 1/10/51  | 56                     | 0.078               | 33.07   | 12                      | 0.017               | 78.57     | 9.25934  |
| 34       | 2/10/51  | 50                     | 0.070               | 29.52   | 13                      | 0.018               | 74.00     | 9.45692  |
| 35       | 3/10/51  | 52                     | 0.072               | 30.71   | 14                      | 0.019               | 73.08     | 9.65983  |
| 36       | 4/10/51  | 53                     | 0.074               | 31.30   | 15                      | 0.021               | 71.70     | 9.86275  |
| 37       | 5/10/51  | 51                     | 0.071               | 30.11   | 16                      | 0.022               | 68.63     | 10.04965   |
| 38       | 6/10/51  | 51                     | 0.071               | 30.11   | 17                      | 0.024               | 66.67     | 10.23120   |
| 39       | 7/10/51  | 57                     | 0.079               | 33.66   | 20                      | 0.028               | 64.91     | 10.42878   |
| 40       | 8/10/51  | 58                     | 0.081               | 34.25   | 21                      | 0.029               | 63.79     | 10.62635   |
| 41       | 9/10/51  | 56                     | 0.078               | 33.07   | 22                      | 0.031               | 60.71     | 10.80791   |
| 42       | 10/10/51 | 54                     | 0.075               | 31.89   | 23                      | 0.032               | 57.41     | 10.97344   |
| 43       | 11/10/51 | 55                     | 0.076               | 32.48   | 25                      | 0.035               | 54.55     | 11.13364   |
| 44       | 12/10/51 | 52                     | 0.072               | 30.71   | 26                      | 0.036               | 50.00     | 11.27248   |
| 45       | 13/10/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 28                      | 0.039               | 44.00     | 11.38995   |
| 46       | 14/10/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 29                      | 0.040               | 42.00     | 11.50209   |
| 47       | 15/10/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 31                      | 0.043               | 41.51     | 11.61957   |
| 48       | 16/10/51 | 51                     | 0.071               | 30.11   | 32                      | 0.044               | 37.25     | 11.72103   |

ค.2 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 49       | 17/10/51 | 58                     | 0.081               | 34.25   | 36                      | 0.050               | 37.93     | 11.83850   |
| 50       | 18/10/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 37                      | 0.051               | 33.93     | 11.93996   |
| 51       | 19/10/51 | 57                     | 0.079               | 33.66   | 39                      | 0.054               | 31.58     | 12.03608   |
| 52       | 20/10/51 | 57                     | 0.079               | 33.66   | 40                      | 0.056               | 29.82     | 12.12686   |
| 53       | 21/10/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 41                      | 0.057               | 26.79     | 12.20696   |
| 54       | 22/10/51 | 51                     | 0.071               | 30.11   | 42                      | 0.058               | 17.65     | 12.25501   |
| 55       | 23/10/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 43                      | 0.060               | 18.87     | 12.30841   |
| 56       | 24/10/51 | 57                     | 0.079               | 33.66   | 45                      | 0.063               | 21.05     | 12.37249   |
| 57       | 25/10/51 | 56                     | 0.078               | 33.07   | 46                      | 0.064               | 17.86     | 12.42589   |
| 58       | 26/10/51 | 52                     | 0.072               | 30.71   | 47                      | 0.065               | 9.62      | 12.45259   |
| 59       | 27/10/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 48                      | 0.067               | 4.00      | 12.46327   |
| 60       | 28/10/51 | 50                     | 0.070               | 29.52   | 49                      | 0.068               | 2.00      | 12.46861   |
| 61       | 29/10/51 | 52                     | 0.072               | 30.71   | 50                      | 0.070               | 3.85      | 12.47929   |
| 62       | 30/10/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 51                      | 0.071               | 3.77      | 12.48997   |
| 63       | 31/10/51 | 53                     | 0.074               | 31.30   | 52                      | 0.072               | 1.89      | 12.49531   |
| 64       | 1/11/51  | 53                     | 0.074               | 31.30   | 53                      | 0.074               | 0.00      | 12.49531   |



ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 1        | 25/10/51 | 52                     | 0.072               | 24.56   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.27767  |
| 2        | 26/10/51 | 57                     | 0.079               | 26.93   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.58204  |
| 3        | 27/10/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 0.87574  |
| 4        | 28/10/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.15875  |
| 5        | 29/10/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.45244  |
| 6        | 30/10/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 1.73546  |
| 7        | 31/10/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.02381  |
| 8        | 1/11/51  | 58                     | 0.081               | 27.40   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.33352  |
| 9        | 2/11/51  | 56                     | 0.078               | 26.45   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.53256  |
| 10       | 3/11/51  | 54                     | 0.075               | 25.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 2.92091  |
| 11       | 4/11/51  | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.20392  |
| 12       | 5/11/51  | 58                     | 0.081               | 27.40   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.51364  |
| 13       | 6/11/51  | 52                     | 0.072               | 24.56   | 0                       | 0                   | 100.00    | 3.79131  |
| 14       | 7/11/51  | 57                     | 0.079               | 26.93   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.09568  |
| 15       | 8/11/51  | 51                     | 0.071               | 24.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.36802  |
| 16       | 9/11/51  | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.65103  |

ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 17       | 10/11/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 4.93404  |
| 18       | 11/11/51 | 50                     | 0.070               | 23.62   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.20104  |
| 19       | 12/11/51 | 51                     | 0.071               | 24.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.47337  |
| 20       | 13/11/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 5.76706  |
| 21       | 14/11/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.06076  |
| 22       | 15/11/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.34377  |
| 23       | 16/11/51 | 57                     | 0.079               | 26.93   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.64814  |
| 24       | 17/11/51 | 50                     | 0.070               | 23.62   | 0                       | 0                   | 100.00    | 6.91514  |
| 25       | 18/11/51 | 50                     | 0.070               | 23.62   | 0                       | 0                   | 100.00    | 7.18213  |
| 26       | 19/11/51 | 52                     | 0.072               | 24.56   | 0                       | 0                   | 100.00    | 7.45980  |
| 27       | 20/11/51 | 50                     | 0.070               | 23.62   | 0                       | 0                   | 100.00    | 7.72680  |
| 28       | 21/11/51 | 51                     | 0.071               | 24.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 7.99913  |
| 29       | 22/11/51 | 51                     | 0.071               | 24.09   | 0                       | 0                   | 100.00    | 8.27147  |
| 30       | 23/11/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 8.55982  |
| 31       | 24/11/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 0                       | 0                   | 100.00    | 8.84817  |
| 32       | 25/11/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 9.14187  |

ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 33       | 26/11/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 0                       | 0                   | 100.00    | 9.43556  |
| 34       | 27/11/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 0                       | 0                   | 100.00    | 9.71857  |
| 35       | 28/11/51 | 56                     | 0.078               | 26.45   | 2                       | 0.003               | 96.43     | 10.00693   |
| 36       | 29/11/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 3                       | 0.004               | 94.55     | 10.28460   |
| 37       | 30/11/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 6                       | 0.008               | 88.89     | 10.54091   |
| 38       | 1/12/51  | 54                     | 0.075               | 25.51   | 8                       | 0.011               | 85.19     | 10.78655   |
| 39       | 2/12/51  | 52                     | 0.072               | 24.56   | 11                      | 0.015               | 78.85     | 11.00548   |
| 40       | 3/12/51  | 54                     | 0.075               | 25.51   | 13                      | 0.018               | 75.93     | 11.22442   |
| 41       | 4/12/51  | 53                     | 0.074               | 25.04   | 13                      | 0.018               | 75.47     | 11.43801   |
| 42       | 5/12/51  | 52                     | 0.072               | 24.56   | 16                      | 0.022               | 69.23     | 11.63025   |
| 43       | 6/12/51  | 53                     | 0.074               | 25.04   | 17                      | 0.024               | 67.92     | 11.82248   |
| 44       | 7/12/51  | 55                     | 0.076               | 25.98   | 19                      | 0.026               | 65.45     | 12.01472   |
| 45       | 8/12/51  | 55                     | 0.076               | 25.98   | 22                      | 0.031               | 60.00     | 12.19094   |
| 46       | 9/12/51  | 51                     | 0.071               | 24.09   | 23                      | 0.032               | 54.90     | 12.34045   |
| 47       | 10/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 25                      | 0.035               | 53.70     | 12.49531   |
| 48       | 11/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 26                      | 0.036               | 51.85     | 12.64483   |

ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 49       | 12/12/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 27                      | 0.038               | 49.06     | 12.78366   |
| 50       | 13/12/51 | 52                     | 0.072               | 24.56   | 28                      | 0.039               | 46.15     | 12.91182   |
| 51       | 14/12/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 29                      | 0.040               | 45.28     | 13.03998   |
| 52       | 15/12/51 | 52                     | 0.072               | 24.56   | 30                      | 0.042               | 42.31     | 13.15745   |
| 53       | 16/12/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 32                      | 0.044               | 41.82     | 13.28027   |
| 54       | 17/12/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 33                      | 0.046               | 40.00     | 13.39775   |
| 55       | 18/12/51 | 57                     | 0.079               | 26.93   | 35                      | 0.049               | 38.60     | 13.51523   |
| 56       | 19/12/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 36                      | 0.050               | 34.55     | 13.61668   |
| 57       | 20/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 37                      | 0.051               | 31.48     | 13.70746   |
| 58       | 21/12/51 | 53                     | 0.074               | 25.04   | 38                      | 0.053               | 28.30     | 13.78756   |
| 59       | 22/12/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 39                      | 0.054               | 29.09     | 13.87300   |
| 60       | 23/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 40                      | 0.056               | 25.93     | 13.94776   |
| 61       | 24/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 41                      | 0.057               | 24.07     | 14.01717   |
| 62       | 25/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 42                      | 0.058               | 22.22     | 14.08125   |
| 63       | 26/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 43                      | 0.060               | 20.37     | 14.13999   |
| 64       | 27/12/51 | 55                     | 0.076               | 25.98   | 44                      | 0.061               | 20.00     | 14.19873   |

ค.3 ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | H <sub>2</sub> S inlet |                     | loading rate H <sub>2</sub> S<br>(g/m <sup>3</sup> -hr) | H <sub>2</sub> S outlet |                     | % removal | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ถูกจับได้<br>ต่อปริมาณตัวกลาง (มิลลิกรัมต่อกรัม) |
|----------|----------|------------------------|---------------------|---|-------------------------|---------------------|-----------|--|
|          |          | (ppm)                  | (g/m <sup>3</sup> ) |   | (ppm)                   | (g/m <sup>3</sup> ) |           |  |
| 65       | 28/12/51 | 50                     | 0.070               | 23.62   | 45                      | 0.063               | 10.00     | 14.22543   |
| 66       | 29/12/51 | 52                     | 0.072               | 24.56   | 46                      | 0.064               | 11.54     | 14.25747   |
| 67       | 30/12/51 | 54                     | 0.075               | 25.51   | 47                      | 0.065               | 12.96     | 14.29485   |
| 68       | 1/01/52  | 55                     | 0.076               | 25.98   | 48                      | 0.067               | 12.73     | 14.33223   |
| 69       | 2/01/52  | 55                     | 0.076               | 25.98   | 49                      | 0.068               | 10.91     | 14.36427   |
| 70       | 3/01/52  | 54                     | 0.075               | 25.51   | 50                      | 0.070               | 7.41      | 14.38563   |
| 71       | 4/01/52  | 56                     | 0.078               | 26.45   | 51                      | 0.071               | 8.93      | 14.41233   |
| 72       | 5/01/52  | 56                     | 0.078               | 26.45   | 52                      | 0.072               | 7.14      | 14.43368   |
| 73       | 6/01/52  | 55                     | 0.076               | 25.98   | 53                      | 0.074               | 3.64      | 14.44436   |
| 74       | 7/01/52  | 54                     | 0.075               | 25.51   | 54                      | 0.075               | 0.00      | 14.44436   |

ค.4 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด - ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|------------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1             | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 3            | 1/09/51  | 5.71                   | 5.82       | 5.8        | 5.78   |
| 6            | 4/09/51  | 5.94                   | 5.99       | 6.13       | 6.02   |
| 9            | 7/09/51  | 6.49                   | 6.52       | 6.52       | 6.51   |
| 12           | 10/09/51 | 6.41                   | 6.37       | 6.38       | 6.39   |
| 15           | 13/09/51 | 6.24                   | 6.30       | 6.35       | 6.30   |
| 18           | 16/09/51 | 6.31                   | 6.32       | 6.36       | 6.33   |
| 21           | 19/09/51 | 6.30                   | 6.27       | 6.32       | 6.30   |
| 24           | 22/09/51 | 5.98                   | 6.18       | 6.24       | 6.13   |

ค.4 ความเป็นกรด-ต่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่มีความลึก 0.3 เมตร (ต่อ)  
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความเป็นกรด-ต่าง |            |            |        |
|----------|----------|------------------|------------|------------|--------|
|          |          | ครั้งที่ 1       | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 3        | 1/09/51  | 5.68             | 5.76       | 5.83       | 5.76   |
| 6        | 4/09/51  | 6.04             | 5.85       | 6.05       | 5.98   |
| 9        | 7/09/51  | 6.62             | 6.73       | 6.72       | 6.69   |
| 12       | 10/09/51 | 6.27             | 6.24       | 6.28       | 6.26   |
| 15       | 13/09/51 | 6.18             | 6.28       | 6.39       | 6.28   |
| 18       | 16/09/51 | 6.07             | 6.16       | 6.20       | 6.14   |
| 21       | 19/09/51 | 5.86             | 5.84       | 5.86       | 5.85   |
| 24       | 22/09/51 | 5.73             | 5.86       | 5.76       | 5.78   |
| 27       | 25/09/51 | 5.79             | 5.77       | 5.74       | 5.77   |
| 30       | 28/09/51 | 5.80             | 5.75       | 5.82       | 5.79   |
| 33       | 1/10/51  | 5.79             | 5.84       | 5.89       | 5.84   |
| 36       | 4/10/51  | 5.83             | 5.93       | 6.07       | 5.94   |
| 39       | 7/10/51  | 5.36             | 5.45       | 5.66       | 5.49   |
| 42       | 10/10/51 | 5.69             | 5.76       | 5.72       | 5.72   |
| 45       | 13/10/51 | 5.80             | 5.80       | 5.84       | 5.81   |
| 48       | 16/10/51 | 5.65             | 5.71       | 5.72       | 5.69   |
| 51       | 19/10/51 | 5.61             | 5.71       | 5.73       | 5.68   |
| 54       | 22/10/51 | 5.53             | 5.56       | 5.53       | 5.54   |
| 55       | 23/10/51 | 5.50             | 5.59       | 5.58       | 5.56   |

ค.5 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 3            | 2/09/51  | 6.52                 | 6.47       | 6.64       | 6.54   |
| 7            | 6/09/51  | 6.13                 | 6.26       | 6.33       | 6.24   |
| 11           | 10/09/51 | 6.73                 | 6.65       | 6.61       | 6.66   |
| 14           | 13/09/51 | 6.28                 | 6.35       | 6.40       | 6.34   |



ค.5 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร (ต่อ)  
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 3            | 2/09/51  | 6.36                 | 6.54       | 6.48       | 6.46   |
| 7            | 6/09/51  | 6.36                 | 6.42       | 6.39       | 6.39   |
| 11           | 10/09/51 | 6.51                 | 6.52       | 6.44       | 6.49   |
| 14           | 13/09/51 | 6.05                 | 6.03       | 6.15       | 6.08   |
| 18           | 16/09/51 | 6.14                 | 6.21       | 6.27       | 6.21   |
| 21           | 19/09/51 | 6.37                 | 6.35       | 6.32       | 6.35   |
| 25           | 23/09/51 | 6.12                 | 6.18       | 6.15       | 6.15   |
| 28           | 26/09/51 | 6.08                 | 6.07       | 6.04       | 6.06   |
| 32           | 30/09/51 | 6.32                 | 6.36       | 6.40       | 6.36   |
| 35           | 3/10/51  | 6.45                 | 6.51       | 6.47       | 6.48   |
| 38           | 6/10/51  | 6.45                 | 6.46       | 6.50       | 6.47   |
| 42           | 10/10/51 | 6.31                 | 6.40       | 6.35       | 6.35   |
| 46           | 14/10/51 | 6.18                 | 6.24       | 6.31       | 6.24   |
| 50           | 18/10/51 | 6.20                 | 6.18       | 6.24       | 6.21   |
| 53           | 21/10/51 | 6.13                 | 6.11       | 6.21       | 6.15   |
| 58           | 26/10/51 | 6.12                 | 6.07       | 6.10       | 6.10   |
| 61           | 29/10/51 | 6.05                 | 5.99       | 6.07       | 6.04   |
| 64           | 1/11/51  | 6.00                 | 5.97       | 5.99       | 5.99   |

ค.5 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร (ต่อ)  
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 3            | 2/09/51  | 6.12                 | 6.28       | 6.33       | 6.24   |
| 7            | 6/09/51  | 6.32                 | 6.39       | 6.38       | 6.36   |
| 11           | 10/09/51 | 6.47                 | 6.55       | 6.50       | 6.51   |
| 14           | 13/09/51 | 6.02                 | 6.00       | 5.98       | 6.00   |
| 18           | 16/09/51 | 6.23                 | 6.17       | 6.29       | 6.23   |
| 21           | 19/09/51 | 6.33                 | 6.31       | 6.34       | 6.33   |
| 25           | 23/09/51 | 6.19                 | 6.17       | 6.24       | 6.20   |
| 28           | 26/09/51 | 6.30                 | 6.42       | 6.34       | 6.35   |
| 32           | 30/09/51 | 5.92                 | 6.14       | 6.12       | 6.06   |
| 35           | 3/10/51  | 6.14                 | 6.25       | 6.21       | 6.20   |
| 38           | 6/10/51  | 6.03                 | 6.04       | 6.12       | 6.06   |
| 42           | 10/10/51 | 6.26                 | 6.34       | 6.32       | 6.31   |
| 46           | 14/10/51 | 6.06                 | 6.07       | 6.07       | 6.07   |
| 50           | 18/10/51 | 5.95                 | 6.05       | 6.07       | 6.02   |

ค.6 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วันที่   | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|----------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |          | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 26/10/51 | 6.06                 | 6.21       | 6.16       | 6.14   |
| 5            | 29/10/51 | 6.13                 | 6.24       | 6.31       | 6.23   |
| 8            | 1/11/51  | 6.23                 | 6.33       | 6.34       | 6.30   |
| 11           | 4/11/51  | 6.31                 | 6.47       | 6.42       | 6.40   |
| 14           | 7/11/51  | 6.45                 | 6.40       | 6.42       | 6.42   |

ค.6 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)  
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วัน/เดือน/ปี | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|--------------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |              | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 26/10/51     | 6.36                 | 6.3        | 6.25       | 6.30   |
| 5            | 29/10/51     | 6.47                 | 6.43       | 6.46       | 6.45   |
| 8            | 1/11/51      | 6.61                 | 6.54       | 6.57       | 6.57   |
| 11           | 4/11/51      | 6.83                 | 6.76       | 6.90       | 6.83   |
| 14           | 7/11/51      | 6.69                 | 6.59       | 6.65       | 6.64   |
| 17           | 10/11/51     | 6.34                 | 6.39       | 6.43       | 6.39   |
| 20           | 13/11/51     | 6.41                 | 6.37       | 6.43       | 6.40   |
| 23           | 16/11/51     | 6.39                 | 6.4        | 6.52       | 6.44   |
| 26           | 19/11/51     | 6.46                 | 6.54       | 6.55       | 6.52   |
| 29           | 22/11/51     | 6.25                 | 6.29       | 6.37       | 6.30   |
| 32           | 25/11/51     | 6.32                 | 6.25       | 6.42       | 6.33   |
| 35           | 28/11/51     | 6.48                 | 6.52       | 6.44       | 6.48   |
| 38           | 1/12/51      | 6.26                 | 6.32       | 6.32       | 6.30   |
| 41           | 4/12/51      | 6.37                 | 6.4        | 6.43       | 6.40   |
| 44           | 7/12/51      | 6.32                 | 6.51       | 6.49       | 6.44   |
| 48           | 11/12/51     | 6.25                 | 6.18       | 6.22       | 6.22   |
| 50           | 13/12/51     | 6.22                 | 6.17       | 6.13       | 6.17   |
| 53           | 16/12/51     | 6.20                 | 6.23       | 6.14       | 6.19   |
| 56           | 19/12/51     | 6.08                 | 6.15       | 6.22       | 6.15   |
| 62           | 25/12/51     | 6.11                 | 6.09       | 6.13       | 6.11   |
| 65           | 28/12/51     | 6.03                 | 6.08       | 6.07       | 6.06   |
| 69           | 2/01/52      | 5.98                 | 6.1        | 6.13       | 6.07   |
| 74           | 7/01/52      | 5.98                 | 5.89       | 5.92       | 5.93   |

ค.6 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วัน/เดือน/ปี | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|--------------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |              | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 26/10/51     | 6.41                 | 6.3        | 6.38       | 6.36   |
| 5            | 29/10/51     | 6.59                 | 6.55       | 6.52       | 6.55   |
| 8            | 1/11/51      | 6.52                 | 6.55       | 6.65       | 6.57   |
| 11           | 4/11/51      | 6.69                 | 6.60       | 6.64       | 6.64   |
| 14           | 7/11/51      | 6.53                 | 6.62       | 6.67       | 6.61   |
| 17           | 10/11/51     | 6.31                 | 6.33       | 6.37       | 6.34   |
| 20           | 13/11/51     | 6.35                 | 6.35       | 6.32       | 6.34   |
| 23           | 16/11/51     | 6.39                 | 6.38       | 6.4        | 6.39   |
| 26           | 19/11/51     | 6.21                 | 6.22       | 6.28       | 6.24   |
| 29           | 22/11/51     | 6.29                 | 6.24       | 6.34       | 6.29   |
| 32           | 25/11/51     | 6.29                 | 6.27       | 6.34       | 6.30   |
| 35           | 28/11/51     | 6.22                 | 6.17       | 6.34       | 6.24   |
| 38           | 1/12/51      | 6.04                 | 6.10       | 6.02       | 6.05   |
| 41           | 4/12/51      | 6.27                 | 6.24       | 6.33       | 6.28   |
| 44           | 7/12/51      | 6.29                 | 6.31       | 6.35       | 6.32   |
| 48           | 11/12/51     | 6.07                 | 5.98       | 6.02       | 6.02   |
| 50           | 13/12/51     | 5.99                 | 5.92       | 6.02       | 5.98   |
| 53           | 16/12/51     | 6.1                  | 6.15       | 6.25       | 6.17   |
| 56           | 19/12/51     | 6.15                 | 6.16       | 6.22       | 6.18   |

ค.6 ความเป็นกรด-ด่างของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร (ต่อ)  
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.4 เมตร

| ลำดับ<br>ที่ | วัน/เดือน/ปี | ความเป็น<br>กรด-ด่าง |            |            |        |
|--------------|--------------|----------------------|------------|------------|--------|
|              |              | ครั้งที่ 1           | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | เฉลี่ย |
| 2            | 26/10/51     | 6.44                 | 6.52       | 6.56       | 6.51   |
| 5            | 29/10/51     | 6.36                 | 6.47       | 6.48       | 6.44   |
| 8            | 1/11/51      | 6.55                 | 6.55       | 6.56       | 6.55   |
| 11           | 4/11/51      | 6.89                 | 6.82       | 6.80       | 6.84   |
| 14           | 7/11/51      | 6.68                 | 6.71       | 6.62       | 6.67   |
| 17           | 10/11/51     | 6.64                 | 6.59       | 6.61       | 6.61   |

ค.7 ความดันลดและการทรุดตัวของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล  
ที่ความลึก 0.3 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การทรุดตัวของตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|-------------------------------------|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.3 เมตร | ผลที่ได้ |                                     |
| 4        | 2/09/51  | 2.9                    | 2.0             | 0.9      | 0.8                                 |
| 7        | 5/09/51  | 2.8                    | 1.9             | 0.9      | 1.5                                 |
| 10       | 8/09/51  | 3.8                    | 2.7             | 1.1      | 2.1                                 |
| 13       | 11/09/51 | 4.2                    | 2.9             | 1.3      | 2.9                                 |
| 16       | 14/09/51 | 4.1                    | 2.9             | 1.2      | 3.6                                 |
| 19       | 17/09/51 | 4.1                    | 3.0             | 1.1      | 4.7                                 |
| 22       | 20/09/51 | 3.1                    | 1.9             | 1.2      | 5.3                                 |
| 25       | 23/09/51 | 2.9                    | 1.4             | 1.5      | 5.8                                 |
| 28       | 26/09/51 | 2.6                    | 1.0             | 1.6      | 6.4                                 |
| 31       | 29/09/51 | 4.6                    | 3.0             | 1.6      | 6.8                                 |
| 34       | 2/10/51  | 4.6                    | 3.2             | 1.4      | 7.2                                 |
| 37       | 5/10/51  | 4.2                    | 2.7             | 1.5      | 7.6                                 |
| 43       | 11/10/51 | 4.1                    | 2.8             | 1.3      | 8.4                                 |
| 49       | 17/10/51 | 4.5                    | 2.9             | 1.6      | 8.9                                 |
| 52       | 20/10/51 | 4.1                    | 2.7             | 1.4      | 9.5                                 |
| 55       | 23/10/51 | 4.1                    | 2.7             | 1.4      | 10.0                                |

ค.8 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

ที่ความลึก 0.4 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|-------------------------------------|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.4 เมตร | ผลที่ได้ |                                     |
| 3        | 2/09/51  | 3.2                    | 2.1             | 1.1      | 1.1                                 |
| 6        | 5/09/51  | 3.9                    | 2.9             | 1.0      | 2.0                                 |
| 10       | 9/09/51  | 3.9                    | 2.7             | 1.2      | 3.2                                 |
| 13       | 12/09/51 | 4.3                    | 2.9             | 1.4      | 4.4                                 |
| 15       | 14/09/51 | 4.2                    | 2.9             | 1.3      | 5.2                                 |
| 19       | 17/09/51 | 3.9                    | 2.5             | 1.4      | 6.1                                 |
| 22       | 20/09/51 | 4.0                    | 2.7             | 1.3      | 6.8                                 |
| 26       | 24/09/51 | 4.0                    | 2.5             | 1.5      | 7.7                                 |
| 30       | 28/09/51 | 3.6                    | 2.1             | 1.5      | 8.5                                 |
| 33       | 1/10/51  | 3.6                    | 2.2             | 1.4      | 9.4                                 |
| 37       | 5/10/51  | 3.6                    | 2.0             | 1.6      | 10.1                                |
| 41       | 9/10/51  | 3.8                    | 2.1             | 1.7      | 10.9                                |
| 44       | 12/10/51 | 3.3                    | 1.7             | 1.6      | 11.6                                |
| 47       | 15/10/51 | 3.8                    | 2.3             | 1.5      | 12.3                                |
| 50       | 18/10/51 | 3.8                    | 2.5             | 1.3      | 12.9                                |
| 54       | 22/10/51 | 4.1                    | 2.7             | 1.4      | 13.3                                |
| 58       | 26/10/51 | 3.9                    | 2.5             | 1.4      | 13.7                                |
| 61       | 29/10/51 | 3.9                    | 2.2             | 1.7      | 14.1                                |
| 64       | 1/11/51  | 3.7                    | 2.2             | 1.5      | 14.5                                |



ค.9 ความดันลดและการหลุดตัวของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวล

ที่ความลึก 0.5 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ความดันลด (นิ้วของน้ำ) |                 |          | การหลุดตัวของตัวกลาง<br>(เซนติเมตร) |
|----------|----------|------------------------|-----------------|----------|-------------------------------------|
|          |          | จุดทางเข้าก๊าซ         | จุดที่ 0.5 เมตร | ผลที่ได้ |                                     |
| 3        | 27/10/51 | 3.6                    | 2.4             | 1.2      | 1.6                                 |
| 6        | 30/10/51 | 4.2                    | 2.9             | 1.3      | 3.1                                 |
| 9        | 2/11/51  | 3.8                    | 2.6             | 1.2      | 4.9                                 |
| 12       | 5/11/51  | 4.0                    | 2.7             | 1.3      | 6.9                                 |
| 15       | 8/11/51  | 4.0                    | 2.8             | 1.2      | 8.0                                 |
| 18       | 11/11/51 | 4.2                    | 2.9             | 1.3      | 9.4                                 |
| 21       | 14/11/51 | 2.6                    | 1.3             | 1.3      | 10.1                                |
| 24       | 17/11/51 | 3.9                    | 2.6             | 1.3      | 11.3                                |
| 27       | 20/11/51 | 4.0                    | 2.6             | 1.4      | 11.9                                |
| 30       | 23/11/51 | 3.5                    | 2.2             | 1.3      | 12.9                                |
| 33       | 26/11/51 | 4.3                    | 2.8             | 1.5      | 13.9                                |
| 39       | 2/12/51  | 4.1                    | 2.7             | 1.4      | 15.0                                |
| 42       | 5/12/51  | 4.2                    | 2.8             | 1.4      | 15.9                                |
| 45       | 8/12/51  | 4.0                    | 2.5             | 1.5      | 17.1                                |
| 48       | 11/12/51 | 4.2                    | 2.6             | 1.6      | 17.9                                |
| 51       | 14/12/51 | 3.9                    | 2.4             | 1.5      | 18.6                                |
| 54       | 17/12/51 | 4.0                    | 2.6             | 1.4      | 19.5                                |
| 57       | 20/12/51 | 3.9                    | 2.2             | 1.7      | 20.0                                |
| 63       | 26/12/51 | 4.4                    | 2.6             | 1.8      | 20.4                                |
| 66       | 29/12/51 | 4.4                    | 2.7             | 1.7      | 20.8                                |
| 70       | 3/01/52  | 4.3                    | 2.5             | 1.8      | 21.1                                |
| 72       | 5/01/52  | 4.2                    | 2.5             | 1.7      | 21.3                                |
| 74       | 7/01/52  | 4.1                    | 2.5             | 1.6      | 21.6                                |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ชวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 4        | 2/09/51  | 1        | 34.6413          | 1.0114               | 35.6527                    | 35.6363                    | 1.622                | 1.601              |
|          |          | 2        | 57.3864          | 1.0234               | 58.4098                    | 58.3933                    | 1.612                |                    |
|          |          | 3        | 102.9387         | 1.0000               | 103.9387                   | 103.9230                   | 1.570                |                    |
| 7        | 5/09/51  | 1        | 107.6138         | 1.0085               | 108.6223                   | 108.6048                   | 1.735                | 1.603              |
|          |          | 2        | 49.6631          | 1.0113               | 50.6744                    | 50.6594                    | 1.483                |                    |
|          |          | 3        | 50.2865          | 1.0306               | 51.3171                    | 51.3007                    | 1.591                |                    |
| 10       | 8/09/51  | 1        | 50.3094          | 1.0269               | 51.3363                    | 51.3191                    | 1.675                | 1.659              |
|          |          | 2        | 105.1066         | 1.0099               | 106.1165                   | 106.0997                   | 1.664                |                    |
|          |          | 3        | 112.8027         | 1.0371               | 113.8398                   | 113.8228                   | 1.639                |                    |
| 13       | 11/09/51 | 1        | 102.2542         | 1.0108               | 103.2650                   | 103.2473                   | 1.751                | 1.791              |
|          |          | 2        | 106.7269         | 1.0065               | 107.7334                   | 107.7144                   | 1.888                |                    |
|          |          | 3        | 47.5199          | 1.0273               | 48.5472                    | 48.5294                    | 1.733                |                    |
| 16       | 14/09/51 | 1        | 100.4236         | 1.0107               | 101.4343                   | 101.4165                   | 1.761                | 1.780              |
|          |          | 2        | 50.4414          | 1.0143               | 51.4557                    | 51.4374                    | 1.804                |                    |
|          |          | 3        | 102.4835         | 1.0090               | 103.4925                   | 103.4746                   | 1.774                |                    |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 19       | 17/09/51 | 1        | 107.5524         | 1.0077               | 108.5601                   | 108.5419                   | 1.806                | 1.831              |
|          |          | 2        | 49.9103          | 1.0281               | 50.9384                    | 50.9204                    | 1.751                |                    |
|          |          | 3        | 102.4439         | 1.0174               | 103.4613                   | 103.4416                   | 1.936                |                    |
| 22       | 20/09/51 | 1        | 51.2755          | 1.0074               | 52.2829                    | 52.2652                    | 1.757                | 1.846              |
|          |          | 2        | 49.8874          | 1.0061               | 50.8935                    | 50.8737                    | 1.968                |                    |
|          |          | 3        | 34.6053          | 1.0308               | 35.6361                    | 35.6174                    | 1.814                |                    |
| 25       | 23/09/51 | 1        | 112.926          | 1.0138               | 113.9398                   | 113.9198                   | 1.973                | 1.952              |
|          |          | 2        | 49.4866          | 1.0232               | 50.5098                    | 50.4895                    | 1.984                |                    |
|          |          | 3        | 47.5178          | 1.0166               | 48.5344                    | 48.5151                    | 1.898                |                    |
| 28       | 26/09/51 | 1        | 128.2299         | 1.0036               | 129.2335                   | 129.2141                   | 1.933                | 1.939              |
|          |          | 2        | 106.7361         | 1.0169               | 107.7530                   | 107.7328                   | 1.986                |                    |
|          |          | 3        | 127.0896         | 1.0015               | 128.0911                   | 128.0721                   | 1.897                |                    |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 4        | 2/09/51  | 1        | 102.4925         | 1.0294               | 103.5219                   | 103.5069                   | 1.457                | 1.520              |
|          |          | 2        | 50.4577          | 1.0119               | 51.4696                    | 51.4515                    | 1.789                |                    |
|          |          | 3        | 112.7646         | 0.8520               | 113.6166                   | 113.6054                   | 1.315                |                    |
| 7        | 5/09/51  | 1        | 102.2116         | 1.0046               | 103.2162                   | 103.2008                   | 1.533                | 1.585              |
|          |          | 2        | 57.3232          | 1.0328               | 58.3560                    | 58.3395                    | 1.598                |                    |
|          |          | 3        | 101.1516         | 1.0161               | 102.1677                   | 102.1512                   | 1.624                |                    |
| 10       | 8/09/51  | 1        | 106.5365         | 1.0405               | 107.5770                   | 107.5607                   | 1.567                | 1.632              |
|          |          | 2        | 126.8689         | 1.0143               | 127.8832                   | 127.8675                   | 1.548                |                    |
|          |          | 3        | 127.9837         | 1.0213               | 129.0050                   | 128.9868                   | 1.782                |                    |
| 13       | 11/09/51 | 1        | 112.8567         | 1.0179               | 113.8746                   | 113.8583                   | 1.601                | 1.661              |
|          |          | 2        | 102.4728         | 1.0320               | 103.5048                   | 103.4878                   | 1.647                |                    |
|          |          | 3        | 50.4079          | 1.0142               | 51.4221                    | 51.4045                    | 1.735                |                    |
| 16       | 14/09/51 | 1        | 126.9737         | 1.0129               | 127.9866                   | 127.9702                   | 1.619                | 1.673              |
|          |          | 2        | 128.1382         | 1.0040               | 129.1422                   | 129.1245                   | 1.763                |                    |
|          |          | 3        | 106.7211         | 1.0262               | 107.7473                   | 107.7305                   | 1.637                |                    |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 19       | 17/09/51 | 1        | 51.2105          | 1.0014               | 52.2119                    | 52.1934                    | 1.847                | 1.856              |
|          |          | 2        | 34.6042          | 1.0193               | 35.6235                    | 35.6043                    | 1.884                |                    |
|          |          | 3        | 49.4526          | 1.0173               | 50.4699                    | 50.4512                    | 1.838                |                    |
| 22       | 20/09/51 | 1        | 126.9529         | 1.0171               | 127.9700                   | 127.9515                   | 1.819                | 1.858              |
|          |          | 2        | 106.7597         | 1.0242               | 107.7839                   | 107.7645                   | 1.894                |                    |
|          |          | 3        | 128.0791         | 0.9994               | 129.0785                   | 129.0599                   | 1.861                |                    |
| 25       | 23/09/51 | 1        | 127.0140         | 1.0146               | 128.0286                   | 128.0092                   | 1.912                | 1.849              |
|          |          | 2        | 128.1992         | 1.0011               | 129.2003                   | 129.1821                   | 1.818                |                    |
|          |          | 3        | 106.7430         | 1.0243               | 107.7673                   | 107.7487                   | 1.816                |                    |
| 28       | 26/09/51 | 1        | 128.2299         | 1.0036               | 129.2335                   | 129.2138                   | 1.963                | 1.916              |
|          |          | 2        | 106.7361         | 1.0169               | 107.7530                   | 107.7338                   | 1.888                |                    |
|          |          | 3        | 127.0896         | 1.0015               | 128.0911                   | 128.0721                   | 1.897                |                    |
| 31       | 29/09/51 | 1        | 52.3101          | 1.0138               | 53.3239                    | 53.3041                    | 1.953                | 1.962              |
|          |          | 2        | 100.3520         | 1.0213               | 101.3733                   | 101.3535                   | 1.939                |                    |
|          |          | 3        | 112.8184         | 1.0127               | 113.8311                   | 113.8109                   | 1.995                |                    |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 34       | 2/10/51  | 1        | 112.9267         | 1.0049               | 113.9316                   | 113.9117                   | 1.980                | 1.981              |
|          |          | 2        | 106.7032         | 1.0156               | 107.7188                   | 107.6986                   | 1.989                |                    |
|          |          | 3        | 57.3750          | 1.0189               | 58.3939                    | 58.3738                    | 1.973                |                    |
| 37       | 5/10/51  | 1        | 107.5166         | 0.9994               | 108.5160                   | 108.4935                   | 2.251                | 2.016              |
|          |          | 2        | 57.3140          | 1.0199               | 58.3339                    | 58.3145                    | 1.902                |                    |
|          |          | 3        | 112.8902         | 1.0085               | 113.8987                   | 113.8796                   | 1.894                |                    |
| 40       | 8/10/51  | 1        | 112.8527         | 1.0035               | 113.8562                   | 113.8362                   | 1.993                | 1.992              |
|          |          | 2        | 51.2826          | 1.0130               | 52.2956                    | 52.2757                    | 1.964                |                    |
|          |          | 3        | 101.2118         | 1.0063               | 102.2181                   | 102.1978                   | 2.017                |                    |
| 43       | 11/10/51 | 1        | 112.8339         | 1.0049               | 113.8388                   | 113.8195                   | 1.921                | 2.028              |
|          |          | 2        | 57.3465          | 1.0194               | 58.3659                    | 58.3461                    | 1.942                |                    |
|          |          | 3        | 49.7829          | 1.0219               | 50.8048                    | 50.7821                    | 2.221                |                    |
| 46       | 14/10/51 | 1        | 50.5181          | 1.0021               | 51.5202                    | 51.4992                    | 2.096                | 2.039              |
|          |          | 2        | 102.4005         | 0.9916               | 103.3921                   | 103.3716                   | 2.067                |                    |
|          |          | 3        | 49.4275          | 1.0087               | 50.4362                    | 50.4165                    | 1.953                |                    |

ค.10 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.3 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 49       | 17/10/51 | 1        | 102.4868         | 0.9982               | 103.4850                   | 103.4652                   | 1.984                | 2.040              |
|          |          | 2        | 47.4916          | 1.0265               | 48.5181                    | 48.4982                    | 1.939                |                    |
|          |          | 3        | 54.3416          | 0.9969               | 55.3385                    | 55.3166                    | 2.197                |                    |
| 52       | 20/10/51 | 1        | 105.4534         | 1.0099               | 106.4633                   | 106.4422                   | 2.089                | 2.118              |
|          |          | 2        | 49.4683          | 0.9995               | 50.4678                    | 50.4462                    | 2.161                |                    |
|          |          | 3        | 57.3882          | 1.0077               | 58.3959                    | 58.3747                    | 2.104                |                    |
| 55       | 23/10/51 | 1        | 106.7927         | 0.9996               | 107.7923                   | 107.7708                   | 2.151                | 2.118              |
|          |          | 2        | 51.4226          | 1.0093               | 52.4319                    | 52.4106                    | 2.110                |                    |
|          |          | 3        | 102.5503         | 1.0176               | 103.5679                   | 103.5466                   | 2.093                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 5        | 4/09/51  | 1        | 106.7575         | 1.0074               | 107.7649                   | 107.7469                   | 1.787                | 1.760              |
|          |          | 2        | 127.0754         | 1.0261               | 128.1015                   | 128.0833                   | 1.774                |                    |
|          |          | 3        | 128.1657         | 1.0004               | 129.1661                   | 129.1489                   | 1.719                |                    |
| 9        | 8/09/51  | 1        | 102.5217         | 1.0002               | 103.5219                   | 103.5034                   | 1.850                | 1.897              |
|          |          | 2        | 47.5628          | 1.0137               | 48.5765                    | 48.5572                    | 1.904                |                    |
|          |          | 3        | 57.4163          | 1.0066               | 58.4229                    | 58.4034                    | 1.937                |                    |
| 12       | 11/09/51 | 1        | 112.9255         | 1.0072               | 113.9327                   | 113.9127                   | 1.986                | 1.937              |
|          |          | 2        | 51.2479          | 1.0054               | 52.2533                    | 52.2336                    | 1.959                |                    |
|          |          | 3        | 49.4530          | 1.0129               | 50.4659                    | 50.4470                    | 1.866                |                    |
| 15       | 14/09/51 | 1        | 112.8824         | 1.0186               | 113.9010                   | 113.8813                   | 1.934                | 1.961              |
|          |          | 2        | 105.4317         | 1.0168               | 106.4485                   | 106.4283                   | 1.987                |                    |
|          |          | 3        | 49.5184          | 1.0044               | 50.5228                    | 50.5031                    | 1.961                |                    |



ค.11 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 5        | 4/09/51  | 1        | 57.4544          | 0.9997               | 58.4541                    | 58.4368                    | 1.731                | 1.717              |
|          |          | 2        | 47.5524          | 1.0016               | 48.5540                    | 48.5372                    | 1.677                |                    |
|          |          | 3        | 102.5385         | 1.0044               | 103.5429                   | 103.5254                   | 1.742                |                    |
| 9        | 8/09/51  | 1        | 106.629          | 1.0186               | 107.6476                   | 107.6299                   | 1.738                | 1.698              |
|          |          | 2        | 128.1206         | 1.0040               | 129.1246                   | 129.1089                   | 1.564                |                    |
|          |          | 3        | 127.0470         | 1.0102               | 128.0572                   | 128.0391                   | 1.792                |                    |
| 12       | 11/09/51 | 1        | 106.6352         | 1.0149               | 107.6501                   | 107.6317                   | 1.813                | 1.769              |
|          |          | 2        | 128.0671         | 1.0078               | 129.0749                   | 129.0573                   | 1.746                |                    |
|          |          | 3        | 126.8928         | 1.0079               | 127.9007                   | 127.8831                   | 1.746                |                    |
| 15       | 14/09/51 | 1        | 106.6416         | 1.0143               | 107.6559                   | 107.6383                   | 1.735                | 1.792              |
|          |          | 2        | 127.1121         | 1.0140               | 128.1261                   | 128.1075                   | 1.834                |                    |
|          |          | 3        | 128.0766         | 1.0069               | 129.0835                   | 129.0653                   | 1.808                |                    |
| 19       | 17/09/51 | 1        | 127.0404         | 1.0077               | 128.0481                   | 128.0295                   | 1.846                | 1.830              |
|          |          | 2        | 128.1586         | 1.0016               | 129.1602                   | 129.1418                   | 1.837                |                    |
|          |          | 3        | 106.7094         | 1.0186               | 107.728                    | 107.7096                   | 1.806                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 21       | 19/09/51 | 1        | 47.5170          | 1.0179               | 48.5349                    | 48.5142                    | 2.034                | 2.033              |
|          |          | 2        | 49.8273          | 1.0091               | 50.8364                    | 50.8158                    | 2.041                |                    |
|          |          | 3        | 52.3330          | 0.9983               | 53.3313                    | 53.3111                    | 2.023                |                    |
| 25       | 23/09/51 | 1        | 106.7275         | 1.0131               | 107.7406                   | 107.7206                   | 1.974                | 1.952              |
|          |          | 2        | 128.1926         | 1.0094               | 129.2020                   | 129.1827                   | 1.912                |                    |
|          |          | 3        | 127.0667         | 0.9997               | 128.0664                   | 128.0467                   | 1.971                |                    |
| 32       | 30/09/51 | 1        | 126.9471         | 1.0060               | 127.9531                   | 127.9338                   | 1.918                | 1.950              |
|          |          | 2        | 128.0543         | 0.9992               | 129.0535                   | 129.0343                   | 1.922                |                    |
|          |          | 3        | 106.7245         | 1.0153               | 107.7398                   | 107.7194                   | 2.009                |                    |
| 38       | 6/10/51  | 1        | 128.1040         | 1.0104               | 129.1144                   | 129.0935                   | 2.068                | 2.036              |
|          |          | 2        | 126.9636         | 1.0150               | 127.9786                   | 127.9582                   | 2.010                |                    |
|          |          | 3        | 106.7585         | 1.0153               | 107.7738                   | 107.7532                   | 2.029                |                    |
| 43       | 11/10/51 | 1        | 49.4469          | 1.0135               | 50.4604                    | 50.4389                    | 2.121                | 2.155              |
|          |          | 2        | 51.3016          | 1.0097               | 52.3113                    | 52.2882                    | 2.288                |                    |
|          |          | 3        | 49.7961          | 1.0017               | 50.7978                    | 50.7772                    | 2.057                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 48       | 16/10/51 | 1        | 112.7734         | 1.0035               | 113.7769                   | 113.7566                   | 2.023                | 2.079              |
|          |          | 2        | 57.3678          | 1.0279               | 58.3957                    | 58.3747                    | 2.043                |                    |
|          |          | 3        | 102.3676         | 1.0173               | 103.3849                   | 103.3628                   | 2.172                |                    |
| 52       | 20/10/51 | 1        | 49.4578          | 1.0035               | 50.4613                    | 50.4408                    | 2.043                | 2.052              |
|          |          | 2        | 50.9661          | 1.0213               | 51.9874                    | 51.9662                    | 2.076                |                    |
|          |          | 3        | 52.4128          | 1.0009               | 53.4137                    | 53.3933                    | 2.038                |                    |
| 55       | 23/10/51 | 1        | 106.7469         | 1.0104               | 107.7573                   | 107.7356                   | 2.148                | 2.109              |
|          |          | 2        | 128.1098         | 0.9998               | 129.1096                   | 129.0882                   | 2.140                |                    |
|          |          | 3        | 126.9596         | 1.0206               | 127.9802                   | 127.9594                   | 2.038                |                    |
| 58       | 26/10/51 | 1        | 112.7698         | 1.0002               | 113.7700                   | 113.7492                   | 2.080                | 2.104              |
|          |          | 2        | 51.3007          | 0.9991               | 52.2998                    | 52.2786                    | 2.122                |                    |
|          |          | 3        | 49.4621          | 1.0145               | 50.4766                    | 50.4552                    | 2.109                |                    |
| 61       | 29/10/51 | 1        | 126.9578         | 1.0234               | 127.9812                   | 127.9577                   | 2.296                | 2.161              |
|          |          | 2        | 128.1143         | 1.0007               | 129.1150                   | 129.0935                   | 2.148                |                    |
|          |          | 3        | 106.7696         | 1.0114               | 107.7810                   | 107.7604                   | 2.037                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่  | ครั้งที่ | ชวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|---------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 64       | 1/11/51 | 1        | 128.2159         | 1.0005               | 129.2164                   | 129.1941                   | 2.229                | 2.269              |
|          |         | 2        | 106.7397         | 1.0105               | 107.7502                   | 107.7271                   | 2.286                |                    |
|          |         | 3        | 127.0312         | 0.9994               | 128.0306                   | 128.0077                   | 2.291                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 5        | 4/09/51  | 1        | 52.4635          | 1.0134               | 53.4769                    | 53.4603                    | 1.638                | 1.620              |
|          |          | 2        | 49.8803          | 1.0141               | 50.8944                    | 50.8783                    | 1.588                |                    |
|          |          | 3        | 112.8540         | 0.9971               | 113.8511                   | 113.8348                   | 1.635                |                    |
| 9        | 8/09/51  | 1        | 102.5145         | 0.9947               | 103.5092                   | 103.4918                   | 1.749                | 1.732              |
|          |          | 2        | 57.4717          | 1.0033               | 58.4750                    | 58.4575                    | 1.744                |                    |
|          |          | 3        | 47.6189          | 1.0157               | 48.6346                    | 48.6173                    | 1.703                |                    |
| 12       | 11/09/51 | 1        | 102.6223         | 1.0032               | 103.6255                   | 103.6077                   | 1.774                | 1.763              |
|          |          | 2        | 47.4930          | 1.0161               | 48.5091                    | 48.4912                    | 1.762                |                    |
|          |          | 3        | 57.4378          | 1.0156               | 58.4534                    | 58.4356                    | 1.753                |                    |
| 15       | 14/09/51 | 1        | 112.8916         | 1.0085               | 113.9001                   | 113.8818                   | 1.815                | 1.829              |
|          |          | 2        | 102.5141         | 1.0034               | 103.5175                   | 103.4988                   | 1.864                |                    |
|          |          | 3        | 57.4050          | 1.0114               | 58.4164                    | 58.3981                    | 1.809                |                    |
| 19       | 17/09/51 | 1        | 102.6305         | 1.0085               | 103.6390                   | 103.6211                   | 1.775                | 1.805              |
|          |          | 2        | 112.9007         | 1.0038               | 113.9045                   | 113.8864                   | 1.803                |                    |
|          |          | 3        | 57.4412          | 1.0070               | 58.4482                    | 58.4297                    | 1.837                |                    |

ค.11 ความชื้นของดินลูกรังมาเชื่อมผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.4 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 21       | 19/09/51 | 1        | 57.4162          | 1.0188               | 58.4350                    | 58.4149                    | 1.973                | 1.954              |
|          |          | 2        | 112.9005         | 1.0006               | 113.9011                   | 113.8817                   | 1.939                |                    |
|          |          | 3        | 102.5020         | 1.0108               | 103.5128                   | 103.4931                   | 1.949                |                    |
| 25       | 23/09/51 | 1        | 112.8995         | 1.0077               | 113.9072                   | 113.8874                   | 1.965                | 1.947              |
|          |          | 2        | 57.4694          | 1.0280               | 58.4974                    | 58.4775                    | 1.936                |                    |
|          |          | 3        | 102.4632         | 0.9991               | 103.4623                   | 103.4429                   | 1.942                |                    |
| 32       | 30/09/51 | 1        | 47.5520          | 1.0234               | 48.5754                    | 48.5557                    | 1.925                | 1.913              |
|          |          | 2        | 49.8501          | 1.0126               | 50.8627                    | 50.8436                    | 1.886                |                    |
|          |          | 3        | 52.3884          | 1.0005               | 53.3889                    | 53.3696                    | 1.929                |                    |
| 38       | 6/10/51  | 1        | 102.3747         | 1.0083               | 103.3830                   | 103.3636                   | 1.924                | 1.889              |
|          |          | 2        | 112.7760         | 1.0022               | 113.7782                   | 113.7593                   | 1.886                |                    |
|          |          | 3        | 57.3479          | 1.0170               | 58.3649                    | 58.3460                    | 1.858                |                    |
| 43       | 11/10/51 | 1        | 128.1341         | 1.0207               | 129.1548                   | 129.1356                   | 1.881                | 1.892              |
|          |          | 2        | 126.9534         | 1.0192               | 127.9726                   | 127.9536                   | 1.864                |                    |
|          |          | 3        | 106.7122         | 1.0254               | 107.7376                   | 107.7178                   | 1.931                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.1 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 27/10/51 | 1        | 102.2232         | 1.0013               | 103.2245                   | 103.2067                   | 1.778                | 1.771              |
|          |          | 2        | 52.4509          | 1.0116               | 53.4625                    | 53.4449                    | 1.740                |                    |
|          |          | 3        | 57.3784          | 1.0142               | 58.3926                    | 58.3744                    | 1.795                |                    |
| 6        | 30/10/51 | 1        | 49.4988          | 1.0180               | 50.5168                    | 50.4976                    | 1.886                | 1.817              |
|          |          | 2        | 107.6056         | 1.0019               | 108.6075                   | 108.5896                   | 1.787                |                    |
|          |          | 3        | 51.3320          | 1.0064               | 52.3384                    | 52.3205                    | 1.779                |                    |
| 9        | 2/11/51  | 1        | 102.9828         | 1.0004               | 103.9832                   | 103.9623                   | 2.089                | 1.995              |
|          |          | 2        | 106.5926         | 0.9997               | 107.5923                   | 107.5731                   | 1.921                |                    |
|          |          | 3        | 50.4119          | 1.0119               | 51.4238                    | 51.4038                    | 1.976                |                    |
| 12       | 5/11/51  | 1        | 57.4143          | 1.0334               | 58.4477                    | 58.4262                    | 2.081                | 2.083              |
|          |          | 2        | 101.1406         | 1.0126               | 102.1532                   | 102.1314                   | 2.153                |                    |
|          |          | 3        | 107.5303         | 1.0115               | 108.5418                   | 108.5214                   | 2.017                |                    |
| 15       | 8/11/51  | 1        | 49.8591          | 1.0256               | 50.8847                    | 50.8640                    | 2.018                | 2.058              |
|          |          | 2        | 47.5372          | 1.0246               | 48.5618                    | 48.5406                    | 2.069                |                    |
|          |          | 3        | 51.3120          | 1.0016               | 52.3136                    | 52.2927                    | 2.087                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 27/10/51 | 1        | 51.3259          | 1.0116               | 52.3375                    | 52.3209                    | 1.641                | 1.576              |
|          |          | 2        | 49.3980          | 1.0035               | 50.4015                    | 50.3863                    | 1.515                |                    |
|          |          | 3        | 49.7709          | 1.0239               | 50.7948                    | 50.7787                    | 1.572                |                    |
| 6        | 30/10/51 | 1        | 102.4631         | 1.0028               | 103.4659                   | 103.4497                   | 1.615                | 1.656              |
|          |          | 2        | 52.3519          | 1.0146               | 53.3665                    | 53.3491                    | 1.715                |                    |
|          |          | 3        | 49.8100          | 1.0378               | 50.8478                    | 50.8308                    | 1.638                |                    |
| 9        | 2/11/51  | 1        | 52.3667          | 1.0161               | 53.3828                    | 53.3644                    | 1.811                | 1.830              |
|          |          | 2        | 103.0417         | 1.0092               | 104.0509                   | 104.0321                   | 1.863                |                    |
|          |          | 3        | 49.3342          | 1.0403               | 50.3745                    | 50.3556                    | 1.817                |                    |
| 12       | 5/11/51  | 1        | 106.6389         | 1.00185              | 107.6408                   | 107.6217                   | 1.901                | 1.874              |
|          |          | 2        | 57.3653          | 1.0174               | 58.3827                    | 58.3638                    | 1.858                |                    |
|          |          | 3        | 102.2239         | 1.0305               | 103.2544                   | 103.2352                   | 1.863                |                    |
| 15       | 8/11/51  | 1        | 106.7698         | 1.0228               | 107.7926                   | 107.7736                   | 1.858                | 1.866              |
|          |          | 2        | 128.1989         | 1.0016               | 129.2005                   | 129.1815                   | 1.897                |                    |
|          |          | 3        | 127.0946         | 1.0088               | 128.1034                   | 128.0848                   | 1.844                |                    |



ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 18       | 11/11/51 | 1        | 100.4040         | 1.0161               | 101.4201                   | 101.4006                   | 1.919                | 1.944              |
|          |          | 2        | 102.2666         | 1.0188               | 103.2854                   | 103.2651                   | 1.993                |                    |
|          |          | 3        | 102.5119         | 1.0053               | 103.5172                   | 103.4979                   | 1.920                |                    |
| 21       | 14/11/51 | 1        | 57.4684          | 1.0035               | 58.4719                    | 58.4523                    | 1.953                | 1.968              |
|          |          | 2        | 105.4333         | 1.0012               | 106.4345                   | 106.4145                   | 1.998                |                    |
|          |          | 3        | 52.3544          | 1.0138               | 53.3682                    | 53.3484                    | 1.953                |                    |
| 24       | 17/11/51 | 1        | 51.4177          | 1.0022               | 52.4199                    | 52.3999                    | 1.996                | 1.995              |
|          |          | 2        | 101.1927         | 0.9987               | 102.1914                   | 102.1714                   | 2.003                |                    |
|          |          | 3        | 49.8924          | 1.0163               | 50.9087                    | 50.8885                    | 1.988                |                    |
| 27       | 20/11/51 | 1        | 107.5490         | 1.0012               | 108.5502                   | 108.5298                   | 2.038                | 1.972              |
|          |          | 2        | 102.5021         | 1.0096               | 103.5117                   | 103.4921                   | 1.941                |                    |
|          |          | 3        | 49.7563          | 1.0224               | 50.7787                    | 50.7589                    | 1.937                |                    |
| 30       | 23/11/51 | 1        | 128.2275         | 1.0040               | 129.2315                   | 129.2113                   | 2.012                | 2.004              |
|          |          | 2        | 127.0838         | 1.0114               | 128.0952                   | 128.0750                   | 1.997                |                    |
|          |          | 3        | 106.6735         | 1.0043               | 107.6778                   | 107.6577                   | 2.001                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 33       | 26/11/51 | 1        | 49.8733          | 1.0124               | 50.8857                    | 50.8649                    | 2.055                | 2.013              |
|          |          | 2        | 102.4547         | 1.0095               | 103.4642                   | 103.4442                   | 1.981                |                    |
|          |          | 3        | 52.3419          | 0.9931               | 53.3350                    | 53.3151                    | 2.004                |                    |
| 36       | 29/11/51 | 1        | 106.7166         | 1.0105               | 107.7271                   | 107.7071                   | 1.979                | 2.017              |
|          |          | 2        | 126.9703         | 1.0248               | 127.9951                   | 127.9744                   | 2.020                |                    |
|          |          | 3        | 128.0778         | 1.0086               | 129.0864                   | 129.0657                   | 2.052                |                    |
| 39       | 2/12/51  | 1        | 128.0456         | 1.0097               | 129.0553                   | 129.0342                   | 2.090                | 2.098              |
|          |          | 2        | 127.0063         | 1.0028               | 128.0091                   | 127.9883                   | 2.074                |                    |
|          |          | 3        | 106.7108         | 0.9998               | 107.7106                   | 107.6893                   | 2.130                |                    |
| 42       | 5/12/51  | 1        | 126.9532         | 0.9990               | 127.9522                   | 127.9313                   | 2.092                | 2.057              |
|          |          | 2        | 128.1072         | 1.0052               | 129.1124                   | 129.0917                   | 2.059                |                    |
|          |          | 3        | 106.6816         | 1.0102               | 107.6918                   | 107.6714                   | 2.019                |                    |
| 45       | 8/12/51  | 1        | 50.4007          | 1.0132               | 51.4139                    | 51.3933                    | 2.033                | 2.096              |
|          |          | 2        | 112.8103         | 0.9972               | 113.8075                   | 113.7861                   | 2.146                |                    |
|          |          | 3        | 52.2998          | 1.0052               | 53.305                     | 53.2838                    | 2.109                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 48       | 11/12/51 | 1        | 112.8332         | 0.9977               | 113.8309                   | 113.8094                   | 2.155                | 2.101              |
|          |          | 2        | 52.3655          | 1.0105               | 53.3760                    | 53.3551                    | 2.068                |                    |
|          |          | 3        | 49.8024          | 1.0093               | 50.8117                    | 50.7907                    | 2.081                |                    |
| 51       | 14/12/51 | 1        | 106.6491         | 1.0208               | 107.6699                   | 107.6477                   | 2.175                | 2.086              |
|          |          | 2        | 128.2154         | 1.0048               | 129.2202                   | 129.1997                   | 2.040                |                    |
|          |          | 3        | 127.0138         | 0.9987               | 128.0125                   | 127.9921                   | 2.043                |                    |
| 54       | 17/12/51 | 1        | 52.4418          | 1.0131               | 53.4549                    | 53.4319                    | 2.270                | 2.239              |
|          |          | 2        | 49.8779          | 1.0188               | 50.8967                    | 50.8745                    | 2.179                |                    |
|          |          | 3        | 112.9994         | 1.0136               | 114.0130                   | 113.9900                   | 2.269                |                    |
| 57       | 20/12/51 | 1        | 128.1651         | 1.0035               | 129.1686                   | 129.1469                   | 2.162                | 2.214              |
|          |          | 2        | 106.6094         | 1.0000               | 107.6094                   | 107.5870                   | 2.240                |                    |
|          |          | 3        | 126.8755         | 0.9998               | 127.8753                   | 127.8529                   | 2.240                |                    |
| 63       | 26/12/51 | 1        | 49.5167          | 1.0263               | 50.5430                    | 50.5201                    | 2.231                | 2.239              |
|          |          | 2        | 51.3752          | 1.0097               | 52.3849                    | 52.3611                    | 2.357                |                    |
|          |          | 3        | 112.9412         | 1.0094               | 113.9506                   | 113.9291                   | 2.130                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.2 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 66       | 29/12/51 | 1        | 128.1160         | 1.0081               | 129.1241                   | 129.1015                   | 2.242                | 2.241              |
|          |          | 2        | 106.7232         | 1.0170               | 107.7402                   | 107.7174                   | 2.242                |                    |
|          |          | 3        | 127.0132         | 1.0044               | 128.0176                   | 127.9951                   | 2.240                |                    |
| 70       | 3/01/52  | 1        | 47.6093          | 1.0141               | 48.6234                    | 48.5992                    | 2.386                | 2.383              |
|          |          | 2        | 52.4143          | 1.0052               | 53.4195                    | 53.3944                    | 2.497                |                    |
|          |          | 3        | 49.9001          | 1.0017               | 50.9018                    | 50.8791                    | 2.266                |                    |
| 74       | 7/01/52  | 1        | 47.4908          | 1.0132               | 48.5040                    | 48.4799                    | 2.379                | 2.421              |
|          |          | 2        | 49.8201          | 1.0191               | 50.8392                    | 50.8144                    | 2.434                |                    |
|          |          | 3        | 52.3461          | 1.0002               | 53.3463                    | 53.3218                    | 2.450                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังฆ่าเชื้อผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมีมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 27/10/51 | 1        | 128.0264         | 1.0086               | 129.0350                   | 129.0196                   | 1.527                | 1.539              |
|          |          | 2        | 126.8760         | 1.0223               | 127.8983                   | 127.8828                   | 1.516                |                    |
|          |          | 3        | 106.6631         | 0.9981               | 107.6612                   | 107.6455                   | 1.573                |                    |
| 6        | 30/10/51 | 1        | 102.9171         | 1.0132               | 103.9303                   | 103.9136                   | 1.648                | 1.655              |
|          |          | 2        | 57.3527          | 1.0294               | 58.3821                    | 58.3651                    | 1.651                |                    |
|          |          | 3        | 101.2243         | 1.0210               | 102.2453                   | 102.2283                   | 1.665                |                    |
| 9        | 2/11/51  | 1        | 128.0336         | 1.0091               | 129.0427                   | 129.0262                   | 1.635                | 1.674              |
|          |          | 2        | 126.8593         | 1.0016               | 127.8609                   | 127.8435                   | 1.737                |                    |
|          |          | 3        | 106.5493         | 1.0245               | 107.5738                   | 107.5569                   | 1.650                |                    |
| 12       | 5/11/51  | 1        | 101.1655         | 1.0029               | 102.1684                   | 102.1505                   | 1.785                | 1.748              |
|          |          | 2        | 49.7130          | 1.0417               | 50.7547                    | 50.7367                    | 1.728                |                    |
|          |          | 3        | 112.8628         | 1.0045               | 113.8673                   | 113.8499                   | 1.732                |                    |
| 15       | 8/11/51  | 1        | 47.5101          | 1.0320               | 48.5421                    | 48.5245                    | 1.705                | 1.731              |
|          |          | 2        | 106.6310         | 1.0080               | 107.639                    | 107.6213                   | 1.756                |                    |
|          |          | 3        | 101.2331         | 1.0109               | 102.244                    | 102.2265                   | 1.731                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ชวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 18       | 11/11/51 | 1        | 106.6173         | 1.0024               | 107.6197                   | 107.6015                   | 1.816                | 1.813              |
|          |          | 2        | 57.3890          | 1.0167               | 58.4057                    | 58.3875                    | 1.790                |                    |
|          |          | 3        | 52.3603          | 1.0036               | 53.3639                    | 53.3455                    | 1.833                |                    |
| 21       | 14/11/51 | 1        | 102.4687         | 1.0230               | 103.4917                   | 103.4727                   | 1.857                | 1.805              |
|          |          | 2        | 102.1414         | 1.0273               | 103.1687                   | 103.1503                   | 1.791                |                    |
|          |          | 3        | 107.5243         | 1.0019               | 108.5262                   | 108.5085                   | 1.767                |                    |
| 24       | 17/11/51 | 1        | 105.1748         | 1.0207               | 106.1955                   | 106.1770                   | 1.812                | 1.816              |
|          |          | 2        | 102.5330         | 1.0157               | 103.5487                   | 103.5302                   | 1.821                |                    |
|          |          | 3        | 107.5987         | 0.9875               | 108.5862                   | 108.5683                   | 1.813                |                    |
| 27       | 20/11/51 | 1        | 128.2416         | 1.0025               | 129.2441                   | 129.2253                   | 1.875                | 1.864              |
|          |          | 2        | 126.9579         | 1.0112               | 127.9691                   | 127.9508                   | 1.810                |                    |
|          |          | 3        | 106.7447         | 1.0385               | 107.7832                   | 107.7634                   | 1.907                |                    |
| 30       | 23/11/51 | 1        | 47.6148          | 1.0037               | 48.6185                    | 48.5994                    | 1.903                | 1.961              |
|          |          | 2        | 102.2398         | 1.0093               | 103.2491                   | 103.2291                   | 1.982                |                    |
|          |          | 3        | 49.7936          | 1.0112               | 50.8048                    | 50.7846                    | 1.998                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ชวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 33       | 26/11/51 | 1        | 127.0246         | 1.0045               | 128.0291                   | 128.0091                   | 1.991                | 1.965              |
|          |          | 2        | 128.1457         | 0.9980               | 129.1437                   | 129.1242                   | 1.954                |                    |
|          |          | 3        | 106.7565         | 1.0098               | 107.7663                   | 107.7466                   | 1.951                |                    |
| 36       | 29/11/51 | 1        | 102.7005         | 1.0055               | 103.7060                   | 103.6868                   | 1.909                | 1.947              |
|          |          | 2        | 49.4168          | 1.0163               | 50.4331                    | 50.4130                    | 1.978                |                    |
|          |          | 3        | 47.5797          | 1.0028               | 48.5825                    | 48.5629                    | 1.955                |                    |
| 39       | 2/12/51  | 1        | 101.3101         | 1.0054               | 102.3155                   | 102.2956                   | 1.979                | 1.941              |
|          |          | 2        | 105.1348         | 0.9993               | 106.1341                   | 106.1147                   | 1.941                |                    |
|          |          | 3        | 32.7263          | 1.0300               | 33.7563                    | 33.7367                    | 1.903                |                    |
| 42       | 5/12/51  | 1        | 52.2698          | 1.0203               | 53.2901                    | 53.2704                    | 1.931                | 1.946              |
|          |          | 2        | 112.7758         | 1.0136               | 113.7894                   | 113.7696                   | 1.953                |                    |
|          |          | 3        | 105.12741        | 1.0135               | 106.14091                  | 106.1211                   | 1.955                |                    |
| 45       | 8/12/51  | 1        | 128.0218         | 1.0079               | 129.0297                   | 129.0098                   | 1.974                | 1.977              |
|          |          | 2        | 106.6906         | 0.9979               | 107.6885                   | 107.6688                   | 1.974                |                    |
|          |          | 3        | 126.9388         | 1.0096               | 127.9484                   | 127.9284                   | 1.981                |                    |

ค.12 ความชื้นของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.3 เมตร (ต่อ)

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 48       | 11/12/51 | 1        | 128.0452         | 1.0033               | 129.0485                   | 129.0287                   | 1.973                | 1.993              |
|          |          | 2        | 126.9310         | 1.0199               | 127.9509                   | 127.9306                   | 1.990                |                    |
|          |          | 3        | 106.6261         | 1.0129               | 107.6390                   | 107.6186                   | 2.014                |                    |
| 51       | 14/12/51 | 1        | 57.4517          | 1.0129               | 58.4646                    | 58.4435                    | 2.083                | 2.006              |
|          |          | 2        | 112.8726         | 1.0040               | 113.8766                   | 113.8569                   | 1.962                |                    |
|          |          | 3        | 52.3954          | 1.0142               | 53.4096                    | 53.3896                    | 1.972                |                    |
| 54       | 17/12/51 | 1        | 106.7457         | 0.9989               | 107.7446                   | 107.7236                   | 2.102                | 2.024              |
|          |          | 2        | 126.9811         | 1.0069               | 127.988                    | 127.9681                   | 1.976                |                    |
|          |          | 3        | 128.1362         | 1.0085               | 129.1447                   | 129.1246                   | 1.993                |                    |
| 57       | 20/12/51 | 1        | 102.4781         | 1.0067               | 103.4848                   | 103.4639                   | 2.076                | 2.030              |
|          |          | 2        | 52.4353          | 1.0166               | 53.4519                    | 53.4312                    | 2.036                |                    |
|          |          | 3        | 49.9044          | 1.0271               | 50.9315                    | 50.9112                    | 1.976                |                    |



ค.12 ความชื้นของดินลูกรังผสมผงเหล็กร้อยละ 20 โดยมวลที่ความลึก 0.5 เมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 0.4 เมตร

| ลำดับที่ | วันที่   | ครั้งที่ | ขวด+ฝา<br>(กรัม) | น้ำหนักดิน<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมก่อนอบ<br>(กรัม) | น้ำหนักรวมหลังอบ<br>(กรัม) | ความชื้น<br>(ร้อยละ) | เฉลี่ย<br>(ร้อยละ) |
|----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|
| 3        | 27/10/51 | 1        | 52.2808          | 1.0075               | 53.2883                    | 53.2725                    | 1.568                | 1.547              |
|          |          | 2        | 47.4476          | 1.0086               | 48.4562                    | 48.4410                    | 1.507                |                    |
|          |          | 3        | 105.5608         | 1.0027               | 106.5635                   | 106.5478                   | 1.566                |                    |
| 6        | 30/10/51 | 1        | 128.0234         | 1.0080               | 129.0314                   | 129.0161                   | 1.518                | 1.518              |
|          |          | 2        | 126.8522         | 1.0145               | 127.8667                   | 127.8513                   | 1.518                |                    |
|          |          | 3        | 106.5538         | 1.0003               | 107.5541                   | 107.5389                   | 1.520                |                    |
| 9        | 2/11/51  | 1        | 105.1928         | 1.0232               | 106.2160                   | 106.2002                   | 1.544                | 1.542              |
|          |          | 2        | 49.7188          | 1.0291               | 50.7479                    | 50.7319                    | 1.555                |                    |
|          |          | 3        | 49.7750          | 1.0291               | 50.8041                    | 50.7884                    | 1.526                |                    |
| 12       | 5/11/51  | 1        | 126.8990         | 1.0000               | 127.8990                   | 127.8836                   | 1.540                | 1.581              |
|          |          | 2        | 106.5944         | 1.0332               | 107.6276                   | 107.6108                   | 1.626                |                    |
|          |          | 3        | 128.0103         | 1.0018               | 129.0121                   | 128.9963                   | 1.577                |                    |
| 15       | 8/11/51  | 1        | 112.8694         | 1.0045               | 113.8739                   | 113.8582                   | 1.563                | 1.595              |
|          |          | 2        | 105.4208         | 1.0428               | 106.4636                   | 106.4467                   | 1.621                |                    |
|          |          | 3        | 49.4433          | 1.0171               | 50.4604                    | 50.4441                    | 1.603                |                    |

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอมรราวดี มานะจิตต์ เกิดเมื่อวันที่ 10 ธันวาคม พ.ศ.2524 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548